

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

---

Институт Энергетический (ЭНИИ)

Направление подготовки 13.04.02 - Электроэнергетика и электротехника

Кафедра Электропривода и электрооборудования (ЭПЭО)

**МАГИСТЕРСКАЯ ДИССЕРТАЦИЯ**

Тема работы
<b>Исследование вентильного электропривода колебательного движения при потенциально фазовой модуляции</b>

УДК 62-83-52:621. 376.2

Студент

Группа	ФИО	Подпись	Дата
5ГМ5А	Бабичев А.В.		

Руководитель

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Профессор	Аристов А.В.	д.т.н.		

**КОНСУЛЬТАНТЫ:**

По разделу «Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение»

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Ст. преподаватель	Кузьмина Н.Г.			

По разделу «Социальная ответственность»

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Доцент	Дашковский А.Г.	к.т.н.		

**ДОПУСТИТЬ К ЗАЩИТЕ:**

Зав. кафедрой	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
ЭПЭО	Дементьев Ю.Н.	к.т.н.		

Томск - 2017 г.

## ПЛАНИРУЕМЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ ОБУЧЕНИЯ ПО ООП

Направление ООП: 130302 Электроэнергетика и электротехника

Профиль: Электропривод и системы управления электроприводом

Кафедра, институт: кафедра «Электропривода и электрооборудования», Энергетический институт

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

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

Институт ЭНИН

Направление подготовки 13.04.02 - Электроэнергетика и электротехника

Кафедра ЭПЭО

УТВЕРЖДАЮ:

Зав. кафедрой ЭПЭО

\_\_\_\_\_  
 (Подпись)      \_\_\_\_\_  
 (Дата)      Дементьев Ю.Н.  
 (Ф.И.О.)

**ЗАДАНИЕ**

**на выполнение выпускной квалификационной работы**

В форме:

<b>магистерской диссертации</b>
---------------------------------

Студенту:

Группа	ФИО
5ГМ5А	Бабичев Александр Васильевич

Тема работы:

<b>Исследование вентильного электропривода колебательного движения при потенциально фазовой модуляции</b>	
Утверждена приказом директора (дата, номер)	20.02.2017, №1109/с

Срок сдачи студентом выполненной работы:

--	--

**ТЕХНИЧЕСКОЕ ЗАДАНИЕ:**

<p><b>Исходные данные к работе</b></p> <p><i>(наименование объекта исследования или проектирования; производительность или нагрузка; режим работы (непрерывный, периодический, циклический и т. д.); вид сырья или материал изделия; требования к продукту, изделию или процессу; особые требования к особенностям функционирования (эксплуатации) объекта или изделия в плане безопасности эксплуатации, влияния на окружающую среду, энергозатратам; экономический анализ и т. д.).</i></p>	<p><i>Двигатели ДБМ185-6-0,2-2; ДБМ150-4-1,5-2</i></p> <p><i>Диапазон изменения частоты шага (2, 4, 6, 8, 10);</i></p> <p><i>Диапазон изменения нагрузки <math>J_n = (2, 4, 6, 8, 10) J_d</math>;</i></p> <p><i>Диапазон изменения демпфирующей нагрузки <math>R_{дем} = 0.2 о.е.</math>;</i></p>
---	---

<p><b>Перечень подлежащих исследованию, проектированию и разработке вопросов</b></p> <p><i>(аналитический обзор по литературным источникам с целью выяснения достижений мировой науки техники в рассматриваемой области; постановка задачи исследования, проектирования, конструирования; содержание процедуры исследования, проектирования, конструирования; обсуждение результатов выполненной работы; наименование дополнительных разделов, подлежащих разработке; заключение по работе).</i></p>	<p><i>Современное состояние развития электроприводов колебательного движения;</i></p> <p><i>Математическое моделирование вентильного электропривода колебательного движения;</i></p> <p><i>Анализ рабочих характеристик вентильного электропривода колебательного движения.</i></p>
--	---

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

<p><b>Консультанты по разделам выпускной квалификационной работы</b></p> <p><i>(с указанием разделов)</i></p>
---

Раздел	Консультант
Финансовый менеджмент	старший преподаватель, Кузьмина Н.Г.
Социальная ответственность	к.т.н., доцент Дашковский А.Г.
Иностранный язык	к.п.н., доцент Пташкин А.С.

<p><b>Названия разделов, которые должны быть написаны на русском и иностранном языках:</b></p>
Введение
Обзор литературы
Заключение

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

**Задание выдал руководитель:**

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Профессор	Аристов А.В.	д.т.н.		

**Задание принял к исполнению студент:**

Группа	ФИО	Подпись	Дата
5ГМ5А	Бабичев А.В.		

**ЗАДАНИЕ ДЛЯ РАЗДЕЛА  
«СОЦИАЛЬНАЯ ОТВЕТСТВЕННОСТЬ»**

Студенту:

<b>Группа</b>	<b>ФИО</b>
5ГМ5А	Бабичев Александр Васильевич

<b>Институт</b>	<b>ЭНИН</b>	<b>Кафедра</b>	<b>ЭПЭО</b>
<b>Уровень образования</b>	Магистратура	<b>Направление/специальность</b>	Энергетики и электротехника

**Исходные данные к разделу «Социальная ответственность»:**

1. Характеристика объекта исследования	Помещение лаборатории для работы с всережимным моделирующим комплексом реального времени
2. Знакомство и отбор законодательных и нормативных документов по теме	СанПиН 2.2.2/2.4.1340-03» Гигиенические требования к персональным электронно-вычислительным машинам и организации работы

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

1. Анализ выявленных вредных и опасных факторов проектируемой производственной среды	- Микроклимат; - Освещенность рабочей поверхности; - Шум и вибрация; - пожарная опасность; - Электромагнитное излучение.
2. Экологическая безопасность	Вредное влияние на окружающую среду оказывает недостаточная утилизация устаревших комплектующих компьютера.
3. Защита в чрезвычайных ситуациях	Наиболее вероятным ЧС при работе в аудитории является пожар. План эвакуации
4. Права и охрана труда	Социальные вопросы обеспечения безопасности труда

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

**Задание выдал консультант:**

<b>Должность</b>	<b>ФИО</b>	<b>Ученая степень, звание</b>	<b>Подпись</b>	<b>Дата</b>
Доцент каф. ЭБЖ	Дашковский Анатолий Григорьевич	к.т.н.		

**Задание принял к исполнению студент:**

<b>Группа</b>	<b>ФИО</b>	<b>Подпись</b>	<b>Дата</b>
5ГМ5А	Бабичев Александр Васильевич		

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

Студенту:

<b>Группа</b>	<b>ФИО</b>
5ГМ5А	Бабичев Александр Васильевич

<b>Институт</b>	<b>Энергетический</b>	<b>Кафедра</b>	<b>ЭПЭО</b>
<b>Уровень образования</b>	Магистратура	<b>Направление/специальность</b>	Электроэнергетика и электротехника

<b>Исходные данные к разделу «Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение»:</b>	
<i>1. Стоимость затрат технического проекта (ТП): материальные затраты на канцелярские товары; амортизация компьютерной техники; выплата зарплат рабочим, а также отчисления на социальные нужды; накладные расходы.</i>	<i>Затраты на специальное оборудование определяются согласно стоимости оборудования по прейскурантам или по договорной цене. Зарботная плата определяется исходя из тарифной ставки и коэффициентов, зависящих от различных условий: организация, регион. Страховые отчисления определяются согласно Федеральному закону от 24.07.2009 №212-ФЗ Прочие и накладные расходы определяются исходя из суммы остальных статей расходов.</i>
<i>Продолжительность выполнения ТП</i>	<i>Приблизительная оценка продолжительности выполнения ТП составляет 111 календарных дней</i>
<b>Перечень вопросов, подлежащих исследованию, проектированию и разработке:</b>	
<i>1. Планирование и оформление графика работ по реализации ТП</i>	<i>Определение затрат на проект</i>
<i>2. Формирование сметы</i>	<i>Смета затрат на оборудование</i>
<i>3. Оценка потенциала и перспективности реализации ТП с позиции ресурсоэффективности и ресурсосбережения</i>	<i>Оценка технического уровня электропривода</i>

<b>Дата выдачи задания для раздела по линейному графику</b>	
---	--

**Задание выдал консультант:**

<b>Должность</b>	<b>ФИО</b>	<b>Ученая степень, звание</b>	<b>Подпись</b>	<b>Дата</b>
Старший преподаватель	Кузьмина Н.Г.			

**Задание принял к исполнению студент:**

<b>Группа</b>	<b>ФИО</b>	<b>Подпись</b>	<b>Дата</b>
5ГМ5А	Бабичев А.В.		

## Реферат

Данная магистерская диссертация включает в себя 61 страницу, 98 таблиц, 19 рисунков.

В пояснительной записке этой выпускной квалификационной работе используются следующие ключевые слова: электропривод, вентильный двигатель, резонансный режим работы, анализ полученных характеристик, энергетические показатели.

Объектом исследования является вентильный электропривод колебательного движения.

Целью работы - исследование вентильного двигателя колебательного движения при потенциальной фазовой модуляции.

В процессе исследования проводилось имитационное моделирование вентильного электропривода с теоретическим исследованием резонансного режима работы, а также оценка влияния параметров нагрузки на его характеристики.

Область применения вентильных двигателей охватывает широкий круг приборов: от приборов бытовой техники с мощностью в единицы ватт до двигателей электромобилей с мощностью в десятки киловатт.

Работа была выполнена в текстовом редакторе Microsoft Office Word 2013, графическом редакторе Microsoft Office Visio 2010. Расчеты проводились с помощью пакета прикладных программ MathCad 15 и Matlab Simulink 2012b.

В результате выполнения работы была смоделирована и исследована система вентильного электропривода с колебательным режимом работы при потенциальной фазовой модуляции. Отчет распечатан на белых листах формата А4.

## Обозначения и сокращения

ВД - вентильный двигатель;

ДБМ - двигатель бесконтактный моментный;

ДПР - датчик положения ротора;

ВДПТ - вентильный двигатель постоянного тока;

СМ - синхронная машина;

КПД - коэффициент полезного действия;

ЧЭ - чувствительный элемент;

ВИД - вентильно - индукторные двигатели;

ПЧ - преобразователь частоты;

МДС - магнитодвижущая сила;

АЧХ - амплитудно - частотная характеристика;

ПК - персональный компьютер;

ПЭВМ - персональная электронная вычислительная машина;

СИЗ - средства индивидуальной защиты;

ПУЭ - правила устройства электроустановок;

ПБ - правила безопасности;

НТИ - научно-техническое исследование;

НР - научный руководитель.



Оглавление	
Реферат .....	7
Введение.....	10
1. Принципы построения и технические требования, предъявляемые к электроприводам с периодическим законом движения. ....	13
1.2. Классификация ВД и общее описание двигателей серии ДБМ. ....	19
1.2.1 Вентильные электродвигатели постоянного тока .....	23
1.2.2. Вентильные электродвигатели переменного тока .....	26
1.2.3. Вентильно - индуктивные электродвигатели .....	28
1.3. Методы повышения энергетических характеристик электроприводов колебательного движения. ....	38
2. Математическое моделирование вентильного электропривода колебательного движения .....	42
2.1 Математическое описание ВД в режиме колебательного движения.....	42
2.2. Расчет параметров двигателей, применяемых для создания модели. ....	46
2.3. Модель вентильной машины во вращающейся системе координат.....	48
2.4. Модель вентильного электропривода колебательного движения с регулируемой собственной частотой. ....	50
3. Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение..	52
3.1 Организация работ технического проекта.....	52
3.2 Смета затрат на проектирование .....	56
3.2.1 Материальные затраты на канцелярские товары.....	56
3.2.2 Затраты на амортизацию .....	56
3.2.3 Затраты на заработную плату .....	57
3.2.4 Затраты на социальные нужды .....	58
3.2.5 Прочие затраты.....	58
3.2.6 Накладные затраты .....	58
Заключение .....	60

## **Введение**

### **Общая характеристика работы**

#### **Актуальность и степень разработанности проблемы**

Вентильные двигатели являются весьма перспективным классом электрических машин, бурно развивающимся в настоящее время и приобретающим все большее распространение в различных областях техники. Эти двигатели имеют ряд существенных преимуществ по сравнению с коллекторными двигателями, а именно они более надежны в работе ввиду отсутствия у них щеточноколлекторного узла, являющегося самым ненадежным узлом в коллекторных двигателях; у них высокие электромеханические и энергетические показатели, удельная мощность и удельный момент, а, кроме того, вентильные двигатели позволяют в широких пределах регулировать скорость вращения ротора.

**Цель диссертационного исследования заключается в исследовании вентильного двигателя колебательного движения при потенциальной фазовой модуляции.**

**Идея работы:** заключается в необходимости разработки научных основ и практических рекомендаций по проектированию вентильных двигателей колебательного движения при потенциально фазовой модуляции.

**Для достижения цели необходимо решить следующие задачи:**

-Произвести математическое описание ВД в режиме колебательного движения;

-Разработать математическую модель вентильного электропривода во вращающейся системе координат в прикладном пакете MATLAB, работающего непосредственно в режиме колебательного движения;

-Выполнить расчет коэффициентов модели;

-Произвести анализ рабочих характеристик вентильного электропривода колебательного движения.

**Методы исследования:** В процессе решения поставленных задач применялись имитационное моделирование в программной среде Matlab Simulink 2012b.

**Научная новизна:** Теоретическое обоснование и предложения способов создания резонансного режима работы вентильного электропривода колебательного движения при потенциально фазовой модуляции;

Создана математическая модель вентильного двигателя, которая позволяет исследовать резонансный режим работы вентильного двигателя;

Создана модель вентильного двигателя, позволяющая оценить влияние параметров нагрузки на характеристики электропривода;

Получены зависимости формы, амплитуды и частоты колебаний от питающего напряжения и нагрузки.

**Практическая ценность:** Область применения вентильных двигателей охватывает широкий круг приборов: от приборов бытовой техники с мощностью в единицы ватт до двигателей электромобилей с мощностью в десятки киловатт.

**Личный вклад:** Предложены основные способы возбуждения резонансного режима работы вентильного двигателя;

Предложена методика анализа и возбуждения резонансного режима работы;

Выявлена собственная позиционная нагрузка у магнитного поля вентильного двигателя.

### **Основное содержание работы:**

Во **введении** сказано, что вентильный двигателя более надежен чем коллекторные двигатели в связи отсутствия у него щеточноколлекторного узла.

В **первой** главе производилась работа с теорией и основными понятиями вентильного электропривода. Рассматривались принципы построения и технические требования, предъявляемые к электроприводам с прерывистым законом движения.

Во **второй** главе производилось математическое описание вентильного двигателя в режиме колебательного движения. Представлены математические модели для создания резонансного режима работы различными способами.

В **третьей** главе производился анализ результатов исследования. Показан результат анализа зависимости полученных характеристик от вида и характера нагрузки.

В **четвертой** главе рассмотрены вопросы охраны окружающей среды и охраны труда обуславливающего социальную ответственность энергетического комплекса предприятий.

В **пятой** главе представлены затраты на выполнения данного научно технического исследования.

## **1. Принципы построения и технические требования, предъявляемые к электроприводам с периодическим законом движения.**

В настоящее время все более широкое распространение приобретают безредукторные электропривода, работающие в режиме колебательного движения, выполненные на базе почти всех существующих типов серийно выпускаемых электрических двигателей. Такой выбор объясняется рядом таких достоинств, как: устранение потерь энергии в добавочных механических звеньях преобразователя движения, уменьшения мощности управления и повышения безотказной работы всей системы. Простота и удобство соединения электрических двигателей с узлами системы управления, способность плавно и на ходу изменять параметры колебаний при получении высокой периодичности движения, позволяет обеспечить широкий диапазон изменения колебаний по амплитуде, форме и частоте – все это предполагает широкое использование колебательных электроприводов выполненных на базе вентильных двигателей. [1].

В основном, для создания колебательного режима работы электропривода применяются такие же принципы управления, что и в следящих электроприводах, которые работают в режиме колебательного движения: питание переменным напряжением обмотки возбуждения для двигателя постоянного тока, использование разнообразных модуляций напряжения питания для двигателя переменного тока. Самым перспективным способом возбуждения колебаний является применение линейной фазовой модуляции, которая, может быть реализована различными методами, наиболее распространение из которых представлены на рисунке 1.1. Фазовая модуляция дает возможность получить плавный диапазон регулирования частоты и амплитуды, позволяет создавать колебания самых разнообразных законов без применения специальных устройств периодических сигналов [2].

Для того чтобы получить непрерывно изменяющийся сдвиг фаз между питающими напряжениями используются как электрические схемы, так и фазовращатели, которые выполняются на информационных машинах, а именно, на поворотных трансформаторах. Изменение периодичности вращения поворотных трансформаторов осуществляется регулированием частоты колебаний системы. Самым большим недостатком данного устройства является присутствие в нем большого числа добавочных механических звеньев преобразователя движения: приводного электродвигателя имеющего собственную схему регулирования частоты вращения, а также редуктора в случае применения нескольких поворотных трансформаторов для управления формой колебаний.

Из-за всего этого ухудшаются энергетические характеристики электропривода, а также увеличиваются его массогабаритные показатели [1].

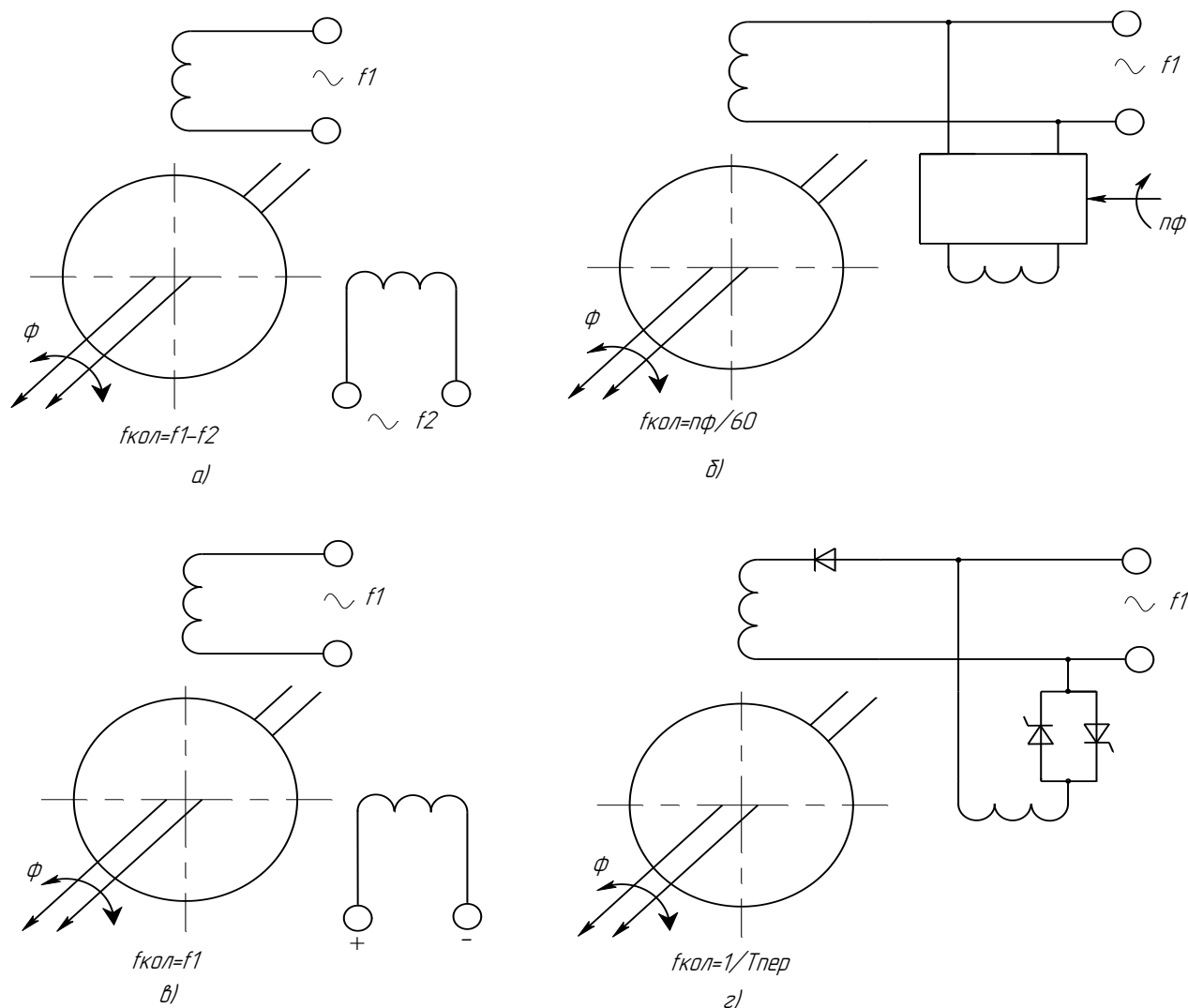


Рисунок 1.1 - Схемы возбуждения колебательного режима работы.

а, б, в – подключение обмоток к источникам напряжения различных частот, одна частота должна быть с непрерывным сдвигом фаз, нулевой и ненулевой частоты.

Вышеперечисленные недостатки можно устранить, используя фазовый способ возбуждения колебаний, который основан на питании двухфазного двигателя напряжениями различной частоты. Каждая из обмоток двигателя в данном случае запитываются от генераторов стабильных частот, а именно от несинхронизированных колебательных электроприводов. Частота колебаний изменяется при помощи регулирования одной из частот питающего напряжения. Диапазон регулирования частот колебаний определяется стабильностью частот питающих генераторов [2].

Для вентильных двигателей процесс возбуждения колебаний происходит немного по-другому. Рассмотрим самый простой вентильный двигатель, который представлен на рисунке 1.2.

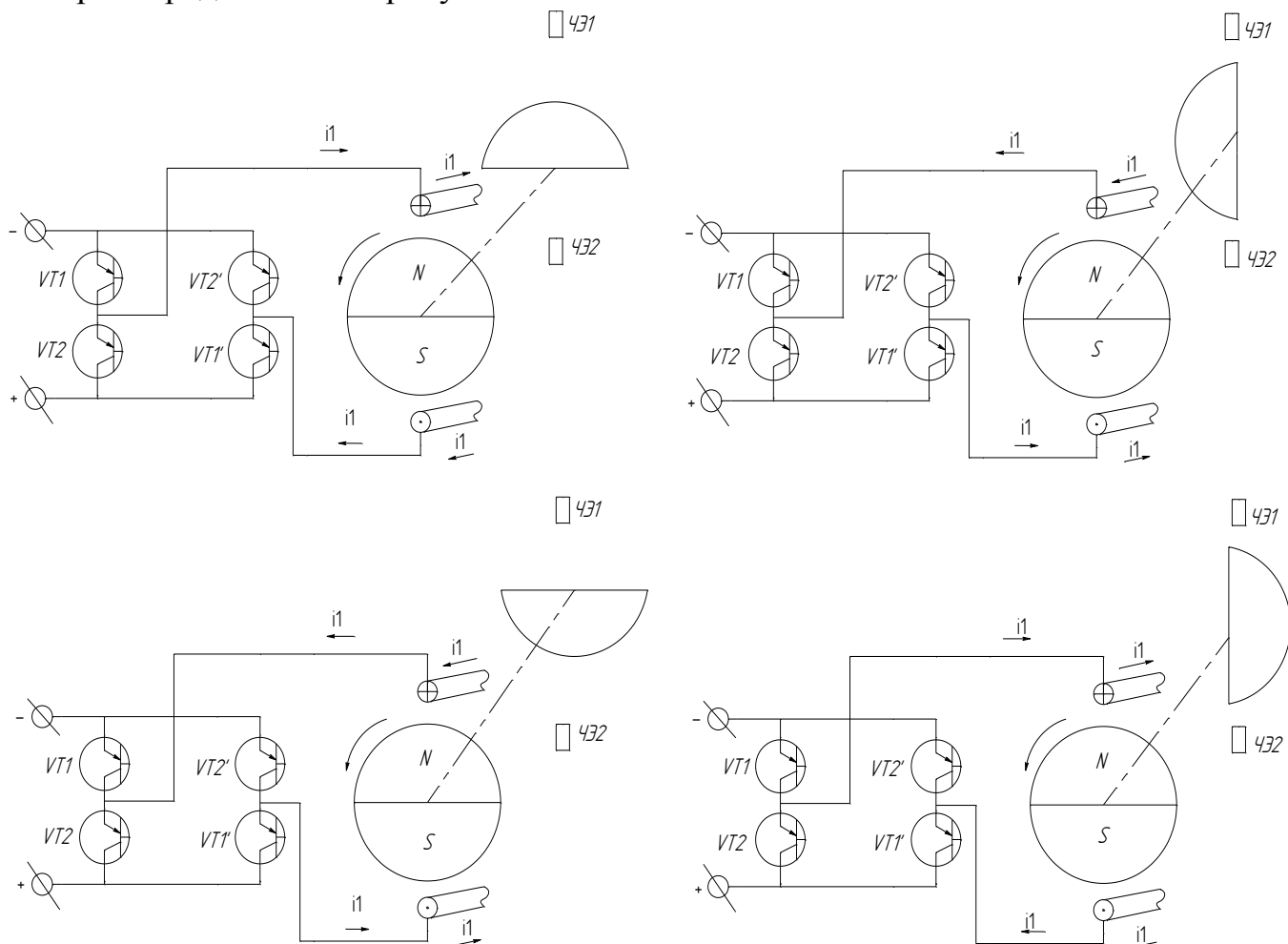


Рисунок 1.2 - Схема простого вентильного двигателя.

Самый простой вентильный двигатель оснащен мостовым коммутатором состоящего из четырех транзисторов  $V1V2^1V1^1V2$ , обмоткой в виде простого витка, датчиком положения, имеющим чувствительный элемент, разделённый на две части ЧЭ1 и ЧЭ2.

Первый чувствительный элемент ЧЭ1 предназначен для управления транзисторами  $V1V1^1$ , а чувствительный элемент ЧЭ2 управляет транзисторами  $V2V2^1$  соответственно. Для данной конструкции датчика положения ротора предусматривается, то что когда чувствительный элемент будет находиться в зоне действия сектора, то он будет формировать сигнал, который отпирать одну из двух пар транзисторов, а если чувствительный элемент будет находиться вне этой зоны, то одна из пар будет закрываться.

В первом положении, когда возбуждается ЧЭ1, открывается пара транзисторов  $V1V1^1$ . Ток по обмотки начинает протекать в направлении стрелок, на роторе появляется воздействие электромагнитного момента, который приводит его во вращения. В этом положении ЭДС вращения е максимальная.

Во втором положении сектор датчика положения ротора выходит из зоны действия с ЧЭ1. Происходит закрытие пары транзисторов  $V1V1^1$ , и в то же время открывается другая пара транзисторов  $V2V2^1$ . Ток, протекающий по обмотке меняет знак, а, следовательно, меняется и направление вращения двигателя. В этом случае ЭДС вращения равна нулю.

В третьем положении и момент двигателя и ЭДС вращения приобретают максимальное значение.

В четвертом положении датчик положения ротора выходит из зоны действия ЧЭ2 и заново пере возбуждает чувствительный элемент ЧЭ1. Происходит закрытие транзисторов  $V2V2^1$  и открывается вторая пара транзисторов  $V1V1^1$ . Ток, протекающий по обмотке меняет свой знак. В этом положении точно также, как и в положении 2 момент двигателя и его ЭДС вращения будут равны нулю, ротор будет продолжать вращаться по инерции, переходя при этом снова в положение 1. Дальше этот процесс снова повторяется.

В таблице 1.1 представлены сведения о наиболее распространённых областях применения электроприводов колебательного движения и предъявляемые к ним требования. Ряд операций, которые выполняются с использованием колебательного движения рабочего инструмента, относятся к отрасли народного хозяйства условно. Это, в частности, относится к операциям многоотраслевого назначения, таким как: виброударное бурение, виброосушка, виброизмельчение.

Колебания должны быть регулируемы, так как правильный выбор их параметров значительно уменьшит усилие обработки, увеличит стойкость инструмента, повысит качество изготавливаемой продукции. Режим колебания рабочего инструмента для многих операций однокоординатен и может быть гармоническим, трапецеидальным, пилообразным и т.д.

Наиболее жесткие требования предъявляются к точности колебаний виброобкатке. Здесь чаще всего требуется синусоидальные колебания откатывающего инструмента, стабильные одновременно амплитуде, частоте и фазе. Для виброобразивной обработки самыми эффективными оказываются двухкоординатные и трехкоординатные колебания: винтовые, круговые и эллиптические. [3].



В сельском хозяйстве, строительстве, горной промышленности, химической промышленности, бытовой технике используются периодические колебания рабочего инструмента с частотой  $1 \dots 10^3$  Гц, амплитудой  $10^{-5} \dots 3$  м, ускорением  $10^{-3} \dots 10^4$  м/с<sup>2</sup> и угловой с частотой  $1 \dots 400$  Гц.

Особое место здесь занимают сейсморазведка, текстильная промышленность и виброкалибровочная техника по уникальности технических требований, предъявляемые к электроприводам. Так, при вибрационном просвечивании земли амплитуда колебательного усилия достигает  $10^6$  Н, вибропрокидка челноков в ткацких станках производится с амплитудой до 3 м, а стабильность пилообразных колебаний нитеводителя намоточных устройств и гармонических колебаний виброголовок калибровочных станков должна быть равной по амплитуде  $1 \dots 3$  %, по частоте  $0,1 \dots 1$  % и фазе  $2 \dots 3$  %.

Современные электропривода работающие в режиме колебательного движения должны обеспечивать плавное изменения на ходу частоты, фазы и амплитуды во всей или части области необходимых колебаний рабочей инструмента, но и создавать многокоординатные колебания самых разнообразных законов [4].

Таблица № 1.1 - Технические параметры основных типов колебательных электроприводов

Сферы применения		Виды операций	Параметры режима колебаний			Параметры нагрузки	
			Частота, Гц	Амплитуда $10^{-3}$ м/град	Ускорение, Рад/с <sup>2</sup>	Масса, кг	Активная мощность кВт
						Момент инерции, кг·м	
Машиностроение	Сборочное производство	Транспортировка заготовок	$1 \dots 10^4$	$10^{-3} \dots 0,1$	$1 \dots 10^4$	0,01...1	0,5...10
	Металлообрабатывающее производство	Вибрационное гашение колебаний	$1 \dots 10^4$	$10^{-4} \dots 0,1$	$1 \dots 10^4$	0,1...1	0,5...10
		Вибросверление	$50 \dots 10^4$	$10^{-3} \dots 0,1$	$1 \dots 40$	0,1...1	0,5...2
		Виброфрезерование	$10 \dots 2 \cdot 10^4$	$10^{-4} \dots 2 \cdot 10^{-2}$	$0,5 \dots 10^4$	0,1...1	0,5...2
		Виброточение	$1 \dots 2 \cdot 10^4$	$5 \cdot 10^{-4} \dots 10$		0,1...1	0,5...2
		Виброшлифование	$10 \dots 2 \cdot 10^4$	$10^{-4} \dots 2 \cdot 10^4$	$0,5 \dots 10^4$	0,1...1	0,5...2
		Вибронакалка	$10 \dots 10^4$	$10^{-4} \dots 0,1$	$0,1 \dots 10$	1...20	0,12...12
Металлургия	Литейное производство	Вибролитье заготовок	$100 \dots 10^4$	$10^{-2} \dots 1$	$0,1 \dots 10$	1...20	1...10
		Вибрационная очистка литейных форм	$50 \dots 40$	$10^{-2} \dots 10$	$0,5 \dots 50$	1...20	1...15
	Электрошлаковый переплав	Плавление металла с вибрацией электродов	$10 \dots 10^2$	$10^{-4} \dots 10^{-2}$	$0,5 \dots 10$	1...10	1...5
	Порошковая металлургия	Получение порошков с применением вибрации	$10^2 \dots 10^4$	$10^{-4} \dots 10^{-2}$	$0,5 \dots 10^4$	0,01...1	0,5...2
Перерабатывающая промышленность	Переработка отходов	Вибрационное измельчение металлов и пластмасс	$1 \dots 800$	$10^{-4} \dots 10^{-2}$	$0,1 \dots 10^4$	0,1...20	0,5...10
		Вибрационное измельчение хрупких металлов	$10 \dots 1500$	$10^{-4} \dots 0,1$	$1 \dots 10^4$	0,1...20	0,5...10
Сельское хозяйство	Производство кормов	Измельчение с колебаниями ножей	$100 \dots 10^4$	$10^{-4} \dots 0,1$	$1 \dots 10^4$	$0,1 \dots 10^2$	1...10
Строительство	Производство строительных материалов	Сегрегация	$1 \dots 10^4$	$10^{-4} \dots 10^{-2}$	$10^{-4} \dots 10$		2...50

## 1.2. Классификация ВД и общее описание двигателей серии ДБМ.

Электрические машины - являются одними из наиболее используемых типов преобразователей энергии, поэтому их совершенствование является важнейшей задачей современной науки и техники.

Одним из рациональных путей расширения функциональных возможностей, повышения надежности и улучшения характеристик электрических машин является замена контактной коммутации, выполняемой щеточно-коллекторным узлом на бесконтактную коммутацию, выполняемую полупроводниковыми приборами силовой электроники.

Отличительной чертой вентильных электродвигателей является объединение в единой структуре электромеханического преобразователя энергии, собственно электрической машины, и управляемого полупроводникового коммутатора такое объединение обеспечивает бесконтактность при преобразовании энергии и тем самым, позволяет применять ВД в тяжелых эксплуатационных условиях: глубокого вакуума, пониженной и повышенной температуры, высокой влажности и агрессивных сред, когда требуется обеспечить низкий уровень электромагнитных помех.

По своему конструктивному исполнению вентильные двигатели выполняются как синхронные машины. Они могут быть выполнены в цилиндрической или дисковой форме исполнения.

Конструкция вентильного двигателя цилиндрической формы исполнения включает в себя:

- 1- Статор и его обмотку, которая состоит из  $m$  числа фаз;
- 2- Ротор возбужденного или не возбужденного типа;
- 3- Якорь ДПР – подвижная часть датчика положения ротора;
- 4- Чувствительный элемент ДПР;
- 5- Обойма, на которую закрепляется чувствительный элемент ДПР.

Чувствительный элемент ДПР и обойма, на которую он устанавливается формируют неподвижную часть ДПР, которая крепится на статоре. Главным конструктивным отличием синхронной машины от вентильного двигателя является наличие датчика положения ротора. Вентильные двигатели дискового исполнения могут иметь в своем составе ротор состоящий из одного или двух дисков, на которые устанавливаются постоянные магниты, создающие полюсную систему. Конструкцию дисковых двигателей можно разделить на два типа. На рисунке 1.3 (б) в двигателе имеется дисковый ротор 1, который находится между статорами 2 с их обмоткой. Статоры 2 для уменьшения магнитных потерь

изготавливаются из стальной ленты, выполненной в виде листов электротехнической, стали, или с помощью прессования из магнитопроводящего порошка. На рисунке 1.3 (в) изображён двигатель, имеющий ротор, состоящий из двух дисков 1 включающих в себя магниты, установленные на магнитопроводе выполненном из стали.

Статор, расположенный между двумя дисками 1 в виде обмотки 2, прикрепленной к дисковому диэлектрическому каскаду.

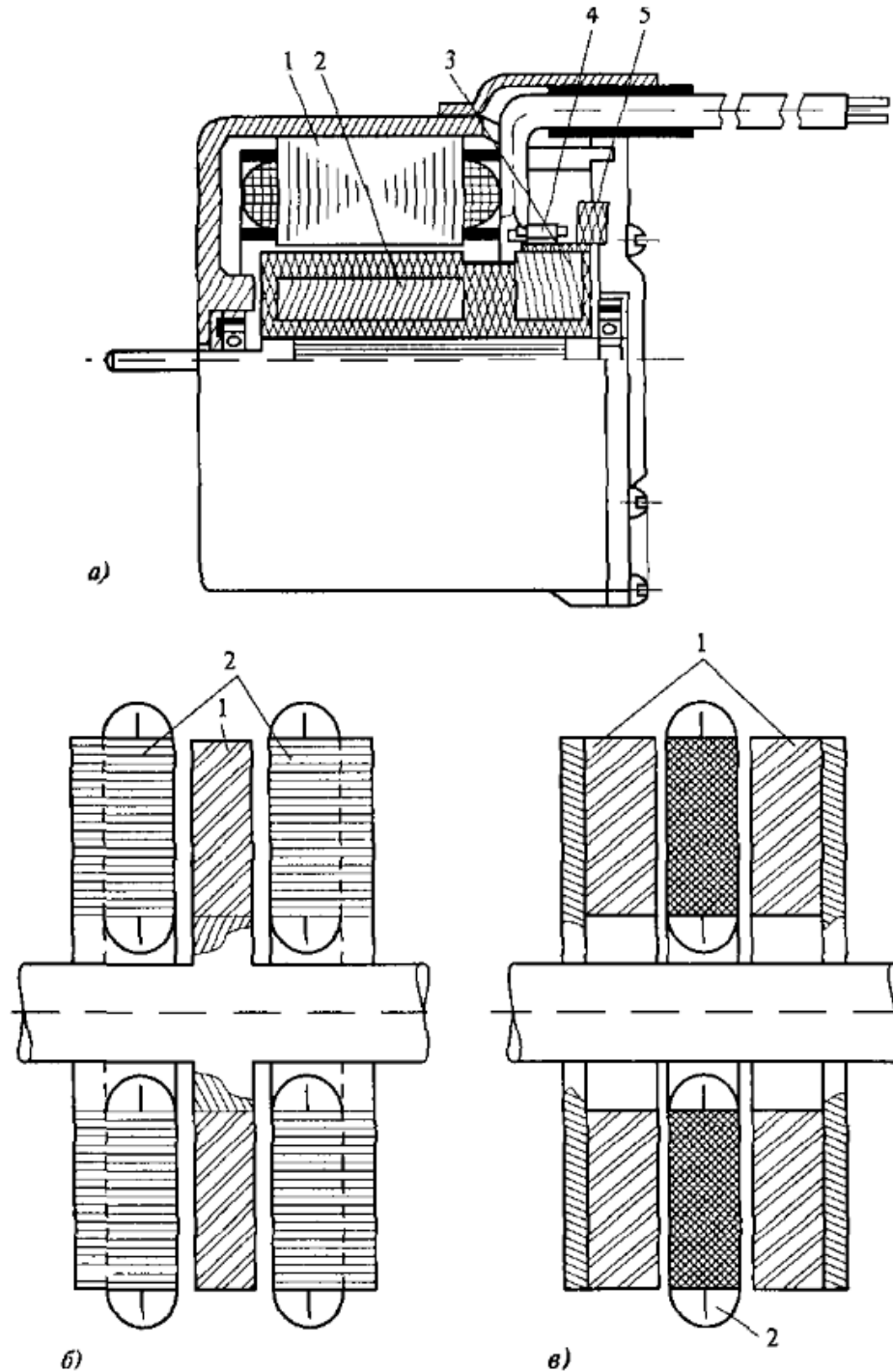


Рисунок 1.3 - Конструктивные схемы вентильных двигателей дискового (б,в) и цилиндрического (а) исполнений

Более широкое представление о конструкции дисковых и цилиндрических вентильных электродвигателей можно получить из рисунка 1.4, где изображены образцы, используемые в регулируемых электроприводах подач металлорежущих станков с применением цифровых и программных управлений во многих промышленных работах.

На рисунке 1.4 (а) вентильный электродвигатель имеет углубленный подшипниковый щит 1 с установленным на нем электромагнитным тормозом 2. Электромагнитный тормоз используется в тех случаях, когда нужно заблокировать вал электродвигателя при исчезновении напряжения питания. Электромагнитный тормоз, который для работы электродвигателя не является необходимым и в основном используется как дополнительная опция. Двигатель включает в себя статор с обмоткой 3, находящейся в корпусе 4.

Ротор 5 состоящий из сердечника, на поверхности которого закреплены пластины постоянных магнитов. Датчики обратных связей присоединены к заднему щиту электродвигателя. Это: бесконтактный и импульсный датчик пути 8, датчик положения ротора 6. Импульсный и бесконтактный датчик пути дает информацию о пути, который прошёл рабочий орган электропривода, пересчитанным через количество оборотов ротора.

Дисковый электродвигатель, который показан на рисунке 1.4 (б) содержит в своей конструкции корпуса 1, и два статора с обмотками 2 и 4, между которыми вращается ротор 3 с закреплёнными на нем постоянными магнитами. Электродвигатель оснащен электромагнитным тормозом 5. Бесконтактный тахогенератор, датчики положения ротора и, если потребуется, датчик пути, который присоединен к валу и закрепляется на заднем щитке электродвигателя.

Наиболее широкое применение в промышленности получили цилиндрические электродвигатели. Дисковые двигатели применяются в тех случаях, когда требуется плоская конструкция электродвигателя. Данный тип двигателей обладает специальными технологиями производства, которые не совсем подходят обычным технологиям, которые были приняты для электрических машин.

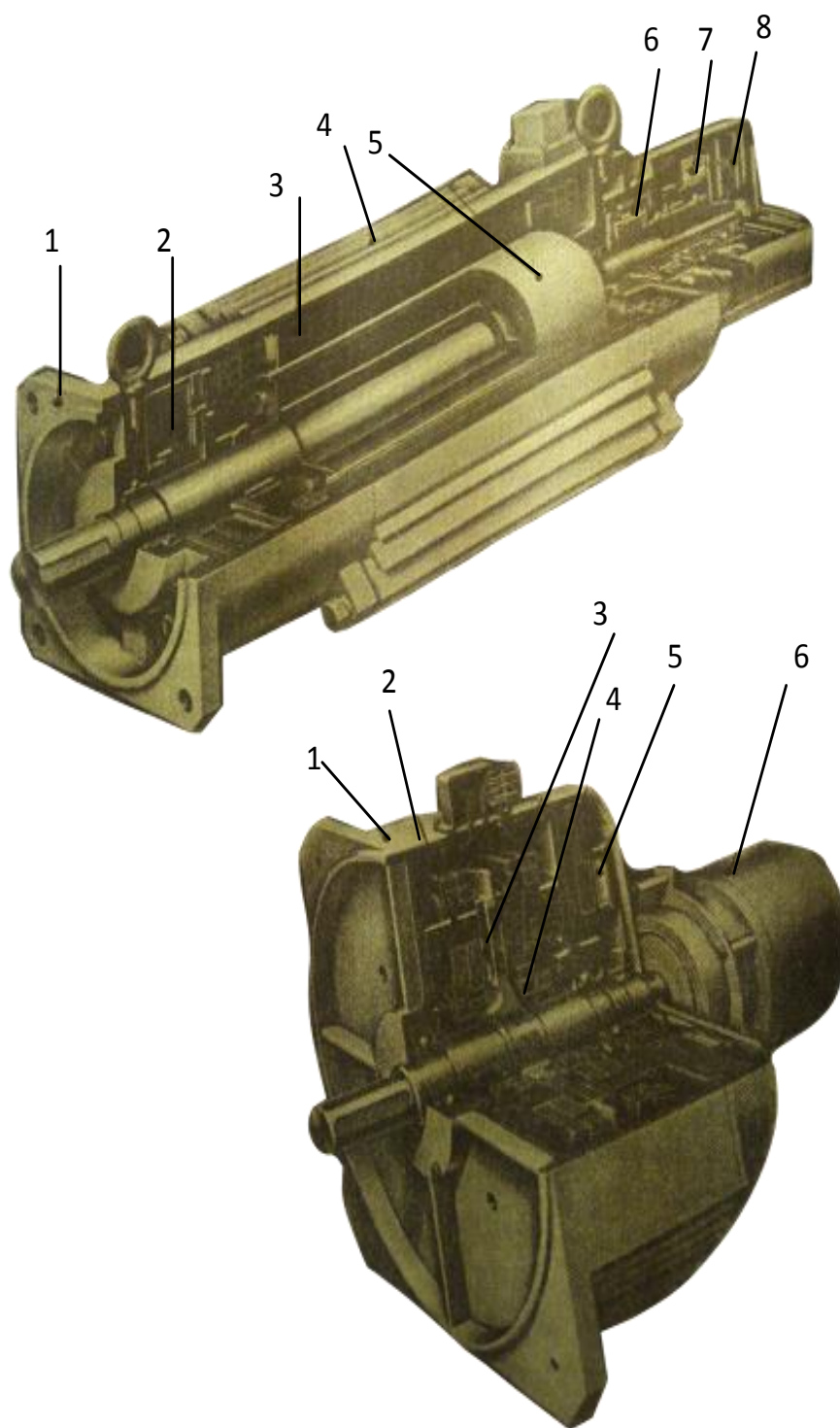


Рисунок 1.4 - Конструкция вентильных двигателей дискового (б, в) и цилиндрического (а) исполнений

Из большого количества бесконтактных электрических машин, которые были охвачены классификацией, приведенной на рисунке 1.5, которая включает в себя вентильные электродвигатели, содержащие инверторы, выполненные на полупроводниковых приборах.

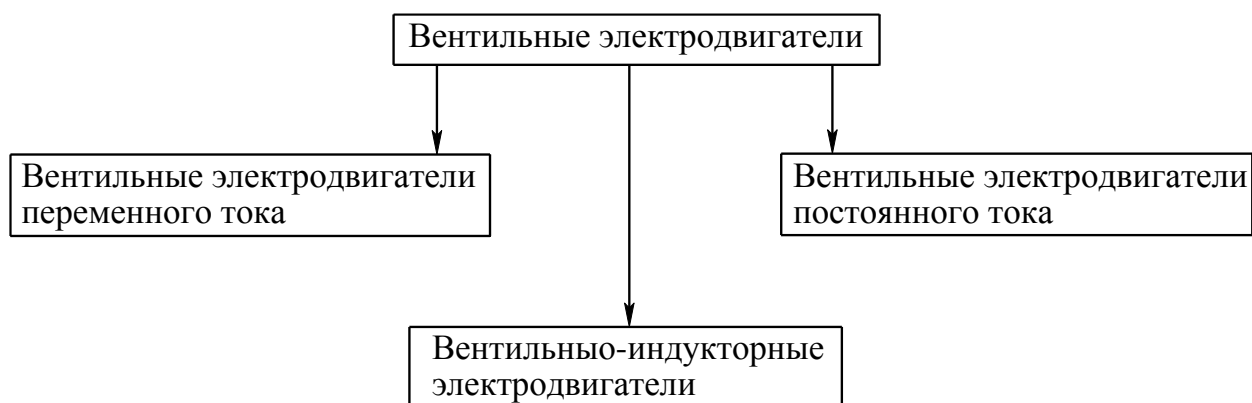


Рисунок 1.5 - Классификация вентильных электродвигателей

Вентильные электродвигатели в классификации охватывают такие двигатели, которые содержат источник постоянного тока или другими словами имеют звено постоянного тока. Источниками постоянного тока могут быть: аккумуляторные батареи, генераторы постоянного тока, выпрямительные устройства.

Особенностью ВД, источником питания которых служит выпрямительные устройства, является то, что эти устройства как правило входят в состав ВД.

### 1.2.1 Вентильные электродвигатели постоянного тока

Вентильный электродвигатель постоянного тока - это электрическая машина постоянного тока, вентильное коммутирующее устройство, которое представляет собой инвертор, управляющий либо по положению ротора, либо по положению магнитного поля.

Другими словами, можно сказать синхронный двигатель, питающийся от сети постоянного тока через полупроводниковый коммутатор, управляемый в функции углового положения ротора называется вентильным двигателем постоянного тока.

Инвертор - устройство преобразующие постоянный ток в переменный ток. Принцип действия ВДПТ можно представить на примере электродвигателя с двухполупериодным инвертором и синхронной машины с постоянными магнитами, имеющий трехфазную якорную обмотку, как наиболее распространенный, так как наряду с умеренной сложностью имеет широкие функциональные возможности в части реализации регулировочных характеристик и высоких показателей по КПД, удельной энергоотдаче на единицу массы.

Функциональная схема представлена на рисунке 1.6

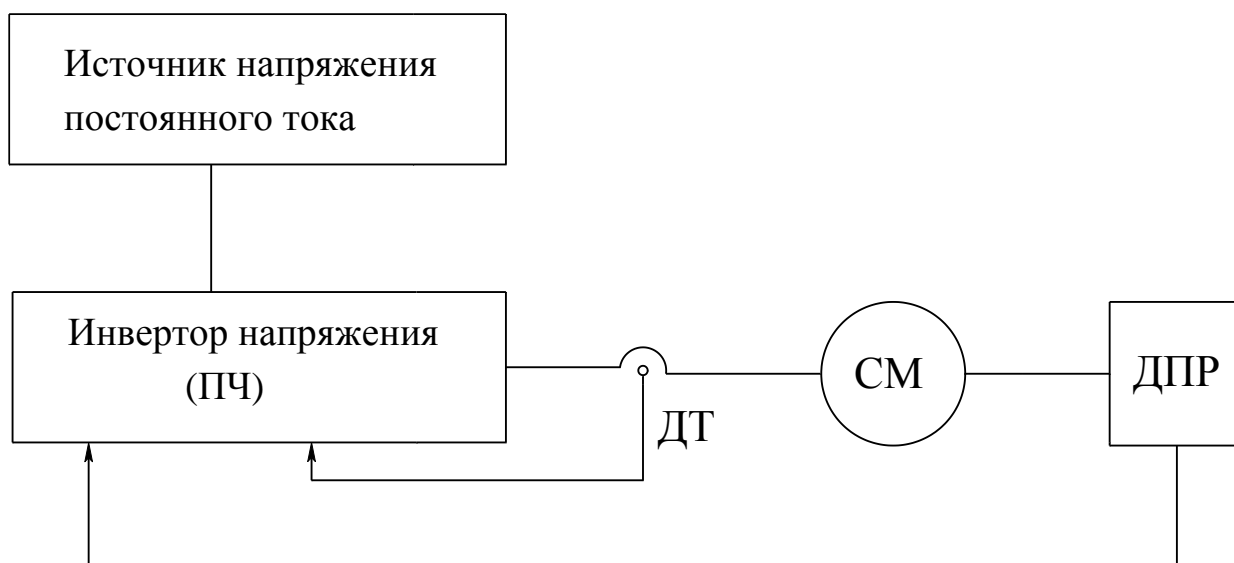


Рисунок 1.6 - Функциональная схема ВДТП

Электромеханическая часть ВДТП представляет собой синхронную машину СМ с постоянными магнитами на роторе. В отличие от двигателя постоянного тока число секций в синхронной машине равно числу фаз. Электропитание от источника напряжения постоянного тока подается на инвертор напряжения (или преобразователь частоты).

Инвертор преобразует постоянное напряжение в переменное напряжение. Частота и фаза которого определяется датчиком положения ротора ДПР. Переменное напряжение подается на обмотку синхронной машины, которая работает в двигательном режиме, когда ось потока статора опережает ось потока ротора на угол  $\varphi$ , как показано на рисунке 7 и электродвигатель создает движущий вращающий момент. В коллекторной машине постоянного тока ось результирующего потока секций якорной обмотки отстает от оси потока возбуждения электродвигателя. Механические характеристики ВДТП напоминают характеристики двигателя постоянного тока с независимым возбуждением, поэтому их также называют бесконтактными, бесколлекторными или бесщеточными двигателями постоянного тока. Отличие ВДТП от коллекторного электродвигателя постоянного тока состоит в том, что у коллекторной машины поле обмотки возбуждения и поле обмотки якоря неподвижны в пространстве, а у ВДТП поле якорной обмотки вращается синхронно с полем возбуждения ротора.



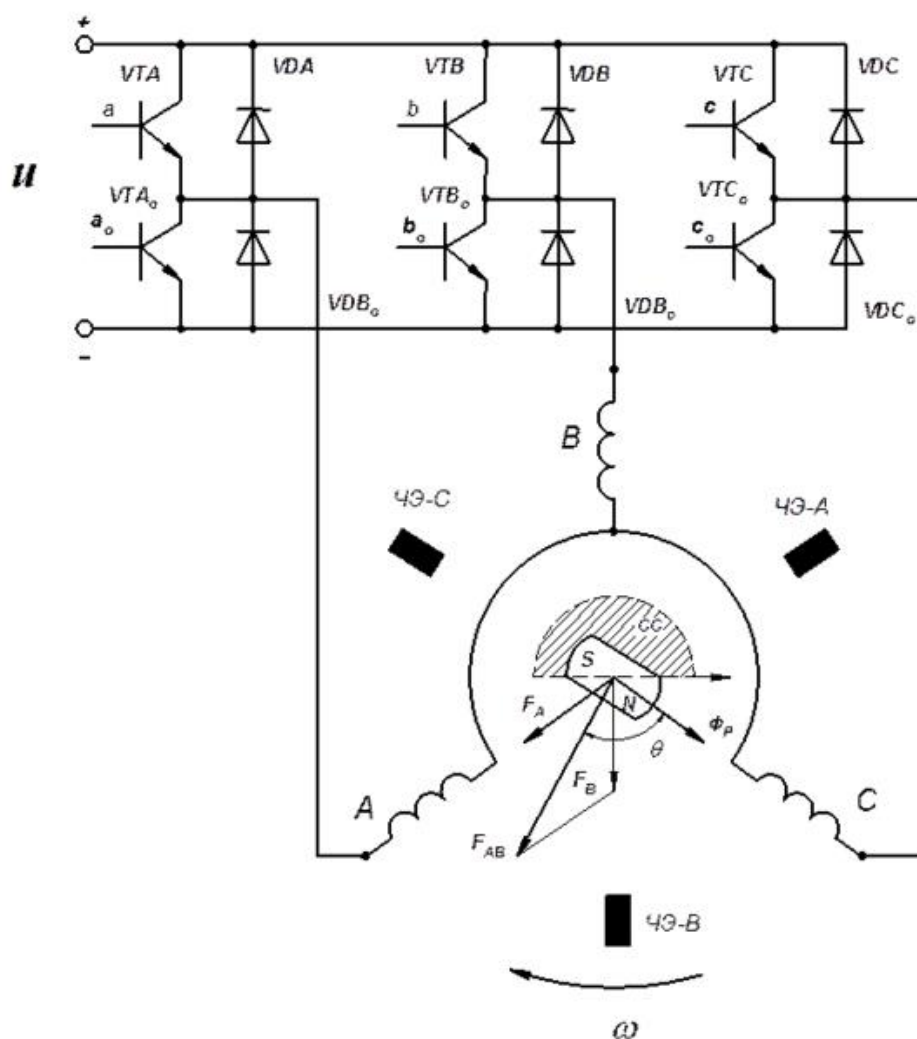


Рисунок 1.7 - Упрощенная схема трехфазного ВДТП

Инвертор, питаемый от источника постоянного тока, играющий роль коммутатора выполнен по схеме трехфазного мостового инвертора на шести транзисторных ключах что позволяет реализовать двухполярную коммутацию фаз обмотки якоря и обеспечить шесть дискретных положений вектора МДС в пространстве. Для защиты от напряжения обратной полярности, рекуперации электрической энергии в сеть постоянного тока при помогающей нагрузке, и организации тормозного момента и создания цепи, замыкающей ЭДС самоиндукции при выключении транзисторного ключа, каждый транзистор  $VTA$ ,  $VTB$ ,  $VTC$ ,  $VTA_0$ ,  $VTB_0$ ,  $VTC_0$  трехфазного мостового инвертора шунтируется обратным диодом  $VDA$ ,  $VDB$ ,  $VDC$ ,  $VDA_0$ ,  $VDB_0$  и  $VDC_0$ , соответственно. Трехфазная обмотка якоря А, В, С, расположенная на статоре синхронной машины соединена в звезду без вывода общей точки

Ротор СМ выполнен с постоянными магнитами, создающими полюсную систему N-S. Сигнальный сектор датчика положений ротора ДПР, занимает на окружности 180 электрических градусов и жестки связан с

ротором СМ. Чувствительные элементы ЧЭ—А, ЧЭ—В, ЧЭ—С по количеству фаз якорной обмотки сдвинуты в пространстве на 120 электрических градусов и расположены на статоре СМ. При каждом повороте ротора на электрический угол, равный меж коммутационному интервалу  $\alpha_k=60$  происходит очередное переключение фаз. Таким образом, управляющие сигналы ДПР обеспечивают автокоммутацию и синхронное увеличение частоты вращения ротора  $\omega$ . До тех пор, пока вращающий момент ВДПТ превышает момент нагрузки на его валу, ротор будет ускоряться. При равенстве вращающего момента моменту сопротивления наступает установившийся режим - автокоммутация продолжается с постоянной частотой. Достоинства и недостатки данного двигателя приведены в таблице 1.2.

### **1.2.2. Вентильные электродвигатели переменного тока**

Вентильный электродвигатель переменного тока - это бесконтактная электрическая машина переменного тока, в которой обмотка якоря связана с внешней цепью через вентильное коммутирующее устройство и у которого соотношение частоты вращения ротора и частоты тока в цепи, подключенной к машине зависит от нагрузки и изменяется через фазовое положение импульсов управления, подаваемых на вентили. Вентильная машина переменного тока, содержит ротор, статор с трехфазной рабочей обмоткой, соединенной в звезду, и трехфазную обмотку управления, подключенную к выходу мостового автономного инвертора, состоящего из ветвей на транзисторах различной проводимости, к базам которых подключены токоограничительные сопротивления. Причем она дополнительно содержит трехфазную синхронизирующую обмотку, каждый конец которой соединен с концом рабочей обмотки предыдущей фазы, а начала подключены к выходу мостового автономного инвертора, вторую трехфазную обмотку управления, каждый конец которой соединен с концом первой обмотки управления предыдущей фазы, вольтодобавочный трансформатор с тремя вторичными обмотками, начала которых соединены через токоограничительные сопротивления с базами транзисторов инвертора, а концы - с началами второй обмотки управления, и первичной обмоткой, конец которой присоединен к средней точке источника постоянного напряжения, образованной двумя конденсаторами одинаковой емкости, а начало - к нулевой точке звезды, образованной трехфазной рабочей обмоткой, а также полумостовой каскад на транзисторах, подключенный параллельно инвертору по цепи питания, управляемый от генератора.

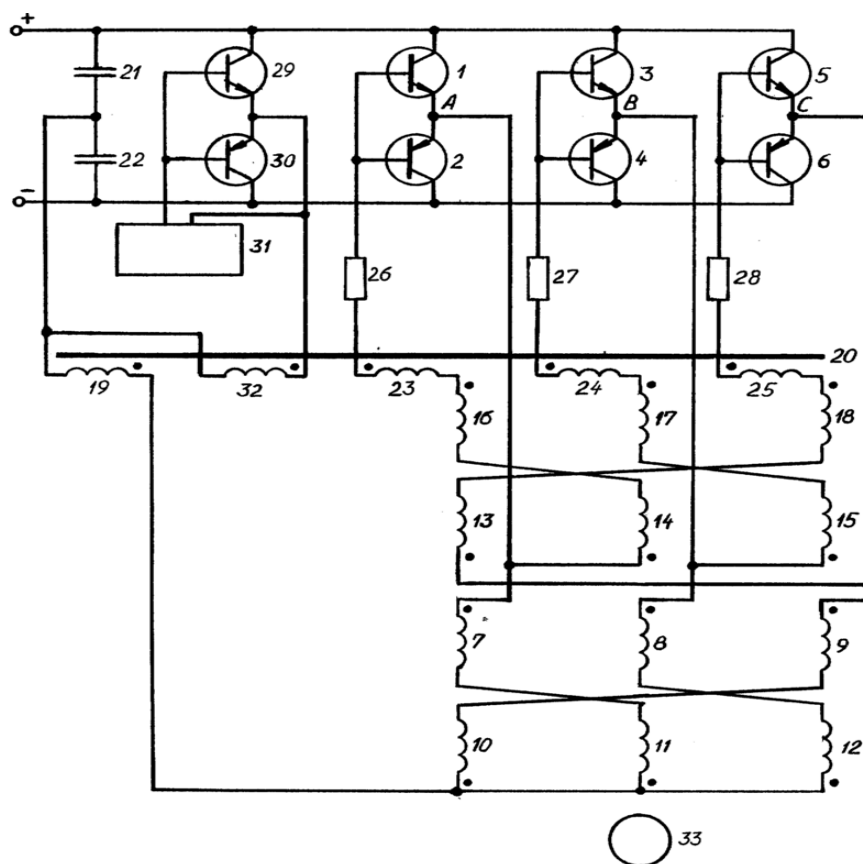


Рисунок 1.8 - Вентильный двигатель переменного тока

Трехфазный мостовой инвертор, входящий в состав вентильной машины переменного тока, выполнен на транзисторах 1-6. Транзисторы 1 и 2, 3 и 4, 5 и 6 образуют комплементарные пары. К выходам трехфазного инвертора подключены начала синхронизирующей обмотки 7, 8, 9 соответствующих фаз. Концы синхронизирующей обмотки 7, 8, 9 соединены с концами рабочей обмотки 11, 12, 10 соответственно. Начала рабочей обмотки соединены в звезду. Концы первой обмотки управления 13, 14, 15 соединены с концами второй обмотки управления 18, 16, 17 соответственно. Начала первой обмотки управления 13, 14, 15 подключены к выходам фаз С, А, В инвертора. Начало первичной обмотки 19 вольтодобавочного трансформатора 20 соединено с нулевой точкой звезды, которую образует трехфазная рабочая обмотка, а конец - со средней точкой источника постоянного напряжения, образованной конденсаторами 21 и 22 одинаковой емкости. Начала вторичных обмоток 23, 24, 25 вольтодобавочного трансформатора подключены к токоограничительным сопротивлениям 26, 27, 28 соответственно, а концы вторичных обмоток 23, 24, 25 подключены к началам второй обмотки управления 16, 17, 18 соответственно.

Дополнительный полумостовой каскад на комплементарных транзисторах 29, 30, управляемый задающим генератором 31, подключен параллельно трехфазному инвертору по цепи питания. Нагрузкой этого каскада является обмотка управления 32 вольтодобавочного трансформатора. Конец этой обмотки подключен к средней точке источника питания, начало -

к выходу полумостового каскада. Период работы вентильной машины состоит из шести интервалов постоянства структуры одинаковой длительности. В течение каждого интервала постоянства структуры открыты три какие-либо транзистора инвертора и одна из фаз находится в области насыщения. Достоинства и недостатки данного двигателя приведены в таблице 1.2.

### 1.2.3. Вентильно - индуктивные электродвигатели

Качественный скачок в этом направлении обозначен разработкой интеллектуальных преобразователей энергии, которые одновременно осуществляют преобразование энергии и управление этими преобразователями. Эти устройства представляют собой электрическую машину, а с другой стороны интегрированную в это устройство систему регулируемого электропривода. К таким преобразователям можно отнести вентильно-индукторные двигатели (ВИД).

ВИД - это совершенно новый тип преобразователя энергии, объединяющий в себе как свойства самой электрической машины, так и встроенной системы регулируемого электропривода. Также, как и любой электродвигатель, он выполняет преобразование электрической энергии, которая поступает в двигатель из питающей его сети, в механическую энергию, которую двигатель отдает в нагрузку. Как система регулируемого электропривода, ВИД позволяет выполнять управление этим процессом в соответствии с характеристикой определенной нагрузки: регулировать момент, мощность, частоту вращения и так далее.

ВИД имеет сложную электромехатронную систему, со структурной схемой, представленной на рисунке 1.9

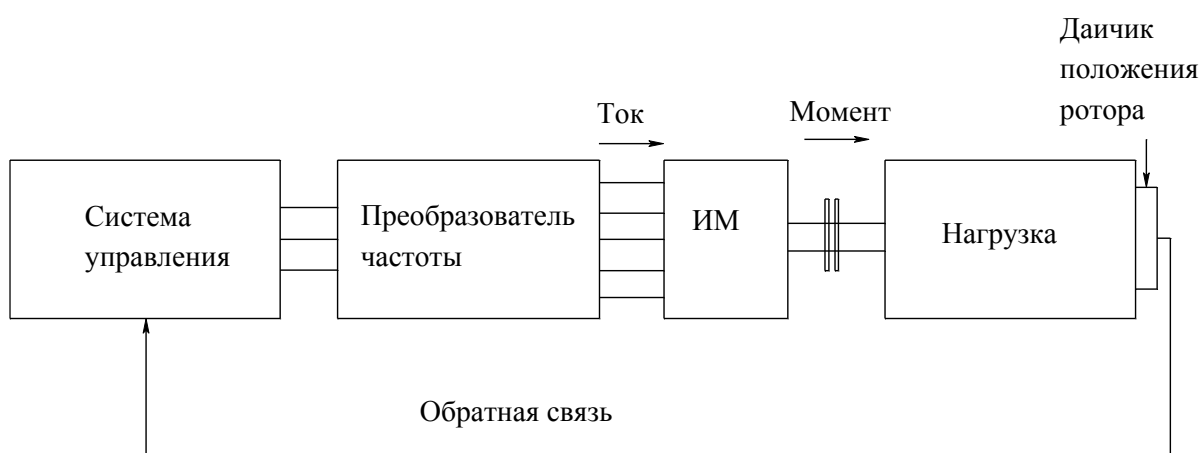


Рисунок 1.9 - Структурная схема ВИД.

В состав структурной схемы ВИД входят: индукторная машина, система управления, и преобразователь частоты.

Функциональное применение этих элементов очевидно: Индукторная машина предназначена для преобразования энергии; преобразователь частоты служит для питания фаз индукторной машины однополярными импульсами напряжения прямоугольной формы; система управления в соответствии с сигналами, обратной связи, которые поступают от датчика положения ротора и установленными на этой системе алгоритмами, управляет этим процессом.

Структурное исполнение ВИД не имеет существенных отличий от обычной системы регулируемого электропривода. В следствии чего ВИД обладает всеми ее качествами. Но есть одно существенное различие, в отличии от регулируемого электропривода, который выполнен на асинхронного двигателя, индукторная машина не является самостоятельной и не может работать без преобразователя частоты. Система управления с преобразователем частоты является важными частями индукторной машины, которые необходимы для электромеханического преобразования энергии.

В следствии этого можно сказать что множество структурных элементов, изображённых на рисунке 1.9, представляют собой не только саму систему регулируемого электропривода, а также электромеханический преобразователь энергии. Индукторная машина, которая входит в состав вид приведена на рисунке 1.10.

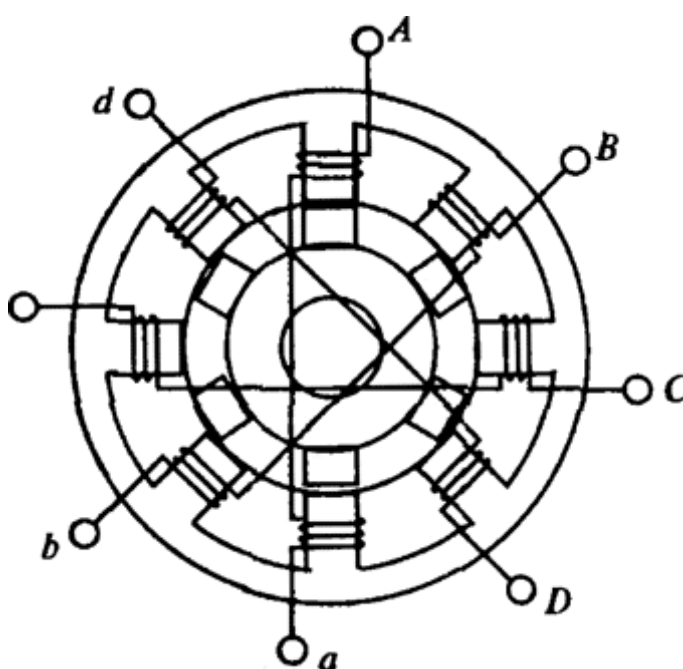


Рисунок 1.10 - Схема электрической машины, которая входит в состав ВИД.

### Конструкция индукторной машины:

- 1) Сердечник статора и ротора имеют явнополюсную структуру;
- 2) Число полюсов ротора меньше числа полюсов статора;
- 3) Сердечник статора выполняется шихтованным;
- 4) Обмотка статора может быть одна, она имеет сосредоточенное расположение;
- 5) Как правило фазы индукторной машины, состоящие из двух катушек, располагаются на полюсах статора;
- 6) Катушки фазы в магнитопроводе могут быть включены согласно или встречно.

Индукторная машина, система управления с преобразователем частоты в ВИД могут бы сконструированы раздельно друг от друга. В процессе работы они могут располагаться на большом расстоянии друг от друга. Но в настоящее время такой вид конструкции не применяется. Широкое применение в мире на данное время находит конструкция выполнения двигателя с преобразователем частоты в одной корпусе регулируемого электропривода. Объединение в одном корпусе ВИД преобразователя частоты и индукторной машины более выгодно чем использование частотного-управления асинхронным электродвигателем. Это объясняется тем, что по сравнению с асинхронной машиной, индукторная машина электрически не связана между собой. Вследствие чего для соединения простого трехфазного двигателя и преобразователя частоты потребуется три соединительных кабеля, а для трех фазной индукторной машины и преобразователя частоты применение соединительных кабелей не понадобится.

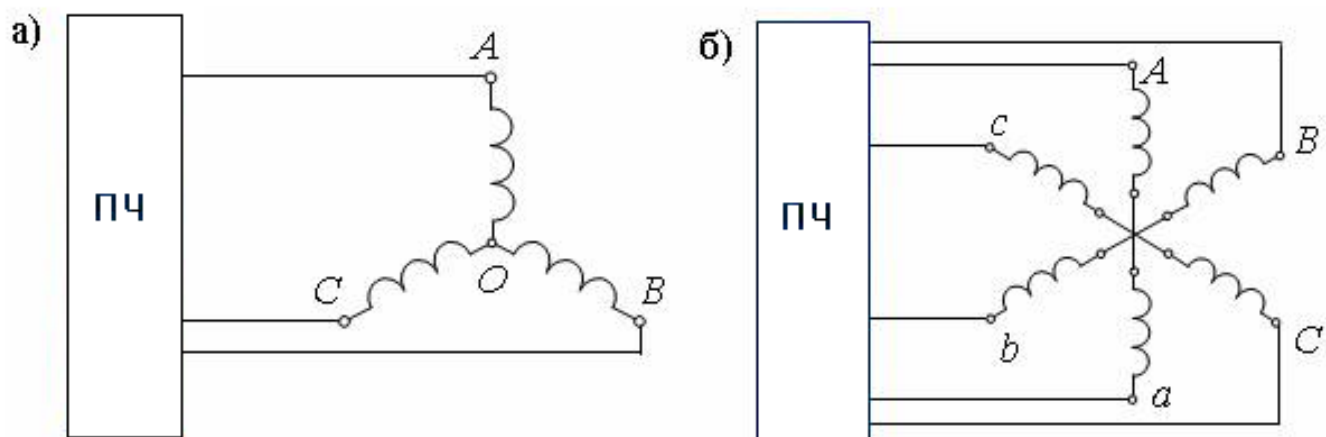


Рисунок 1.11 - Схема соединений электрической машины и ПЧ.

Принцип работы ВИД основан на свойстве ферромагнитных тел изменять свое расположение во внешнем магнитном поле таким образом, чтобы проходящий через них магнитный поток приобретал свое максимальное значение.

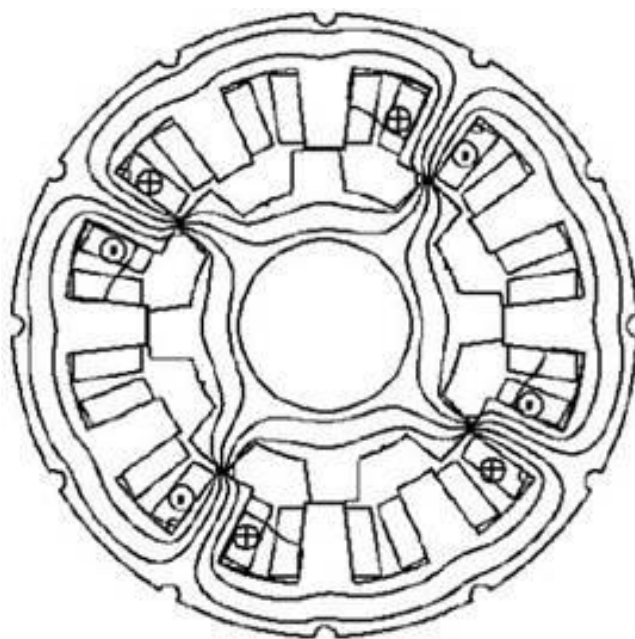


Рисунок 1.12 - Распределение магнитного поля в ВИД.

Разберемся с принципом работы ВИД. На рисунке 1.13 изображено рассогласованное расположение сердечников ротора и статора для данной электрической машины.

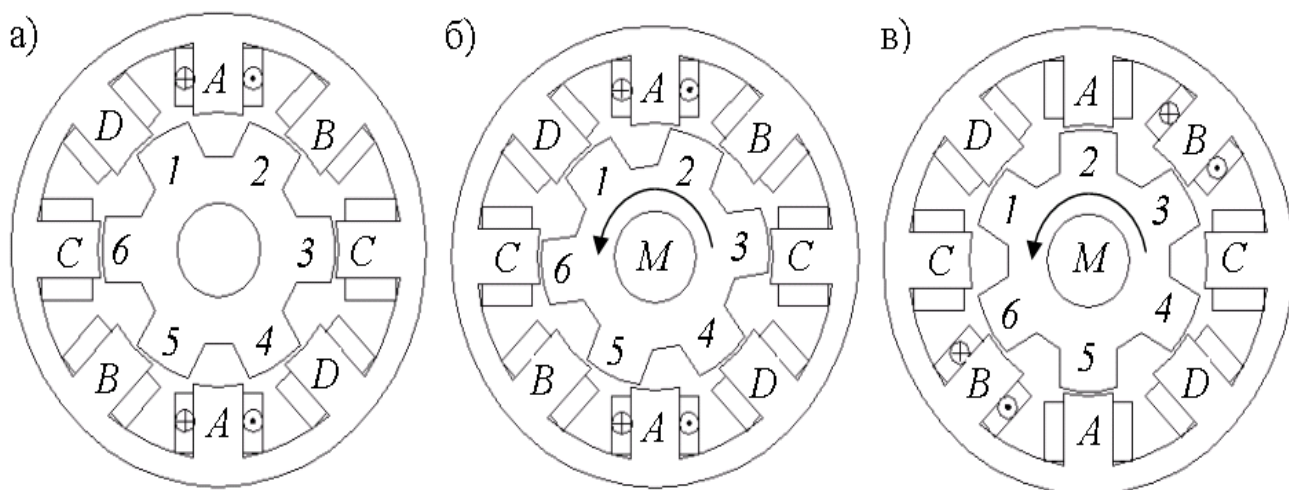


Рисунок 1.13 - Принцип работы ВИД:

а) рассогласованное положение сердечников; в) согласованное положение сердечников; б) промежуточное положение сердечников.

Положение сердечников ротора и статора для одной из фаз индукторной машины будет называться рассогласованным, когда ось катушки каждой из фаз соприкоснется с осью ротора, а именно зубцы фазы должны оказаться напротив пазов ротора. Такое положение обладает минимальной индуктивностью фазы и магнитного потока, что можно объяснить большим значением магнитного сопротивления зазора между сердечниками. Рассогласованное положение фазы используют для провидения начального отсчета углового расположения сердечников ротора и статора. В нашем случае начальной точкой отсчета было выбрано рассогласованное расположение фазы А. В этом положении сигнал, исходящий от системы управления произведет коммутацию ключей преобразователя частоты и фаза А будет подключена к источнику постоянного напряжения  $U_A$ , по катушкам фазы А начнет протекать ток  $i_A$ , создающий МДС  $F_A$ . Данная МДС наведет в машине магнитное поле. В этом магнитном поле ротор будет стремиться занять такое положение, при котором проходящий через него магнитный поток приобретет максимальное значение. В это время на сердечники ротора и статор действуют равные по величине, но различные по направлению пондеромоторные силы. Эти силы действуют на первый и четвертый зубец ротора, будет пытаться повернуть ротор в направлении по часовой стрелке, а силы, которые действуют на второй и пятый зубец ротора будут пытаться повернуть его в противоположном направлении. В этом положении ротора составляющая этих сил равна нулю. В данном положении индукторная машина и ВИД не имеют вращающего момента.

Положение рассогласованного расположение ротора является точкой неустойчивого равновесия. Если под воздействием любого внешнего воздействия произойдет отклонения ротора от рассогласованного положения в каком ни будь направлении, то равнодействующая этих сил не будет равна нулю. Возникнет вращающий момент, который начнет поворачивать ротор в сторону от рассогласованного расположения ротора. Рассмотрим второе расположение ротора, которое изображено на рисунке 13 (б). Тут у фазы А имеется высокое потокосцепление и индуктивность. Это можно объяснить небольшой величиной воздушного зазора между сердечниками. Равнодействующая составляющих сил сердечников не равна нулю, а, следовательно, создается вращающийся момент, который пытается повернуть ротор индукторной машины в направлении против часовой стрелки. Ротор будет продолжать вращаться, пока он не примет положение, которое изображено на рисунке 13 (в). Его называют согласованным расположением фазы А.



Согласованным расположением сердечников ротора и статора индукторной машины для фазы А является такое расположение, для которого каждая катушка данной фазы пересекается с осью ротора, а именно зубцы фазы А находятся напротив зубцов ротора. Такое расположение обуславливается максимальным значением

Это положение характеризуется максимальным значением индуктивности фазы А и наведенного в ней магнитного потока, что можно объяснить минимальным значением величины магнитного сопротивления зазора. В данном положении вращающий момент равен нулю. Согласованное расположение является точкой устойчивого равновесия. Если под воздействием любой силы произойдет отклонение ротора в сторону от согласованного расположения, то созданный момент вернет ротор снова в согласованное расположение. Достоинства и недостатки данного двигателя приведены в таблице 1.2.

Таблица № 1.2 - Преимущества и недостатки вентильных двигателей

Тип двигателя	Преимущества	Недостатки
Вентильные электродвигатели постоянного тока	1) Возможность выполнения ротора большого диаметра; 2) Высокий КПД; 3) Отсутствие осевых сил, действующих на подшипник; 4) Отсутствие стальных участков магнитной цепи на статоре, и как следствие, малая индуктивность обмотки и высокая жесткость внешних характеристик.	1) Высокие аэродинамические потери из-за малого отношения длин ротора; 2) Сложность сборки ротора; 3) Сложность упаковки обмотки в пространстве между двумя роторами; 4) Трудности с обеспечением механической прочности обмотки.

Продолжение Таблицы № 1.2

Тип двигателя	Преимущества	Недостатки
Вентильно-индукторный электродвигатель	1) Простота и технологичность конструкции ИМ; 2) Низкая себестоимость; 3) Высокая надежность; 4) Высокая ремонтпригодность; 5) Низкие потери в роторе; 6) Низкий момент инерции; 7) Возможность работы на больших частотах вращения; 8) Возможность работы в агрессивных средах. 9) Минимальные температурные эффекты.	1) Высокий уровень шумов и вибраций; 2) Плохое использование стали; 3) Работа возможна только совместно с преобразователем частоты; 4) Значительные отходы при штамповке.
Вентильные электродвигатели переменного тока	1) Широкая распространённость; 2) Прочность конструкции; 3) Низкая цена электродвигателя за счет массового выпуска.	1) Сложность конструкции ротора; 2) Сложность регулирования и нелинейные характеристики; 3) Инерционность управления; 4) Высокая цена преобразователя.

По результатам анализа таблицы 1.2 можно сказать, что вентильные двигатели способны объединять лучшие показатели качества двигателей постоянного и переменного тока. Это и характеризует их основные преимущества

Большой диапазон регулирования частоты вращения;

- 1) Отсутствие узлов, которые требуют специального обслуживания;
- 2) Возможность работы двигателя в тяжёлых условиях эксплуатации;
- 3) Высокая перегрузочная устойчивость по моменту;
- 4) Повышенные энергетические характеристики;
- 5) Высокая надежность и большой срок эксплуатации двигателя.

Вентильные двигатели обладают и некоторыми существенными недостатками, одним из которых является высокая стоимость двигателя. Когда мы говорим о высокой стоимости двигателя необходимо учитывать, что вентильные двигатели применяются в система с высокими требованиями по надежности, точности и энергетическим показателям. Высокую стоимость двигателя можно так же объяснить частым применением в конструкции ротора дорогостоящих постоянных магнитов. Стоимость электропривода, выполненного на базе ВД, сравнима с аналогичным электроприводом выполненным на основе ДПТ независимого возбуждения. Одним из самых распространённых типов бесконтактных электродвигателей является бесконтактные моментные двигатели. Которые нашли широкое применения во многих областях промышленности. Бесконтактные моментные электродвигатели серии ДБМ предназначены для работы в локально замкнутой или разомкнутой по углу системах регулирования и находят широкое применение в следующих областях: в быстродействующих программных или следящих системах и системах угловой стабилизации высокой точности с динамической ошибкой 1-3 угловых минуты и мене; в системах автоматического управления различного назначения в редукторном или без редукторном исполнении повышенной надежности и срока службы, в том числе работающих в особо тяжёлых условиях эксплуатации; в исполнительных системах управления роботов и манипуляторов; приводе лентопотяжных механизмов звуко- и видеозаписывающей аппаратуры, а также устройствах внешней памяти ЭВМ; в приводах мотор-колес электрифицированных транспортных средств, а также в качестве генераторов, например в ветросиловых установках, для создания регулируемой нагрузки в велотренажерах и т.д.

Двигатель серии ДБМ 185-6-0,2-2 - это тихоходный двух обмоточный шаговый двигатель. Каждой обмоткой двигателя управляет свой усилитель мощности. Направление вращения ротора задается последовательностью намагничивания обмоток и их взаимное расположения. С целью обеспечения максимально возможной статической добротности в роторах электродвигателей серии ДБМ использованы высококоэрцитивные постоянные магниты, как правило из магнитных материалов на основе редкоземельных элементов. Применение высококоэрцитивных магнитов решает также задачу обеспечения устойчивости электродвигателя к значительным перегрузкам по току и моменту и позволяет не предусматривать специальных мер защиты их от размагничивания. Применение высококоэрцитивных постоянных магнитов позволяет

увеличить воздушный зазор между статором и ротором, что облегчает монтаж двигателя и механизмов.

В двигателях серии ДБМ приняты два конструктивных исполнения статора:

1) Гладкий статор с обмоткой, расположенной непосредственно в воздушном зазоре; это позволяет обеспечить отсутствие реактивного остаточного момента сопротивления и пульсации вращающего момента;

2) Пазовый статор с обмоткой, уложенной в пазы сердечника, позволяющей обеспечить более высокую статическую добротность.

Применяемый двигатель сконструирован с пазовым статором. Габариты и чертеж двигателя представлены на рисунке 1.14

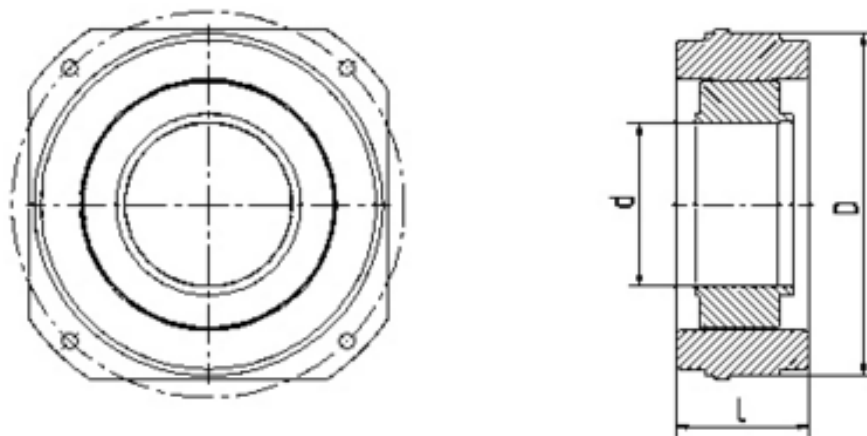


Рисунок 1.14 - Двигатель ДБМ с пазовым статором

ДБМ 185-6-0,2-2 - данная серия шаговых двигателей является тихоходной и имеет в своем составе две обмотки. Каждой из которых управляет свой отдельный усилитель мощности. Направление поворота ротора будет задаваться очередностью намагничивания обмоток и их расположение. Для получения максимальной возможной добротности ротора бесконтактного моментного двигателя применяются дорогие высококоэрцитивные магниты, которые выполняются из редкоземельных элементов. Например, из Самарий-Кобальта. То же самое можно сказать и о двигатели ДБМ 150-4-1,5-3. Технические параметры двигателей серии ДБМ представлены в таблице 1.3.

Таблица № 1.3 - технические параметры двигателей серии ДБМ

Условное обозначение двигателя	ДБМ 185-6-0,2-2	ДБМ 150-4-1,5-3
Наружный диаметр статора D	185	150
Внутренний диаметр ротора d	66	72
Осевая длина, L не более	66,5	63,5
Число пар полюсов	8	8
Число фаз	2	3
Номинальное напряжение питания	27	27
Частота вращения при идеальном холостом ходе, об/мин	190-230	1720-1910
Пусковой момент	11,2	37,4
Сопротивление секции фазы постоянному току при температуре 20 <sup>0</sup> С, Ом	1,13-1,4	0,1-0,13
Электромагнитная постоянная времени фазы, мс, не более	2,0	1,8
Момент инерции ротора	0,009	0,003
Момент сопротивления при обесточенных обмотках	0,6	0,4
Предельно допустимая амплитуда тока в фазе обмотки статора	37,5	165
Термическое сопротивление статора	0,1-0,15	0,15-0,2
Масса	5,4	3,0
Электромеханическая постоянная времени	15,0	14,3
Материал магнитов	Самарий-Кобальт	Самарий-Кобальт

### 1.3. Методы повышения энергетических характеристик электроприводов колебательного движения.

В настоящее время с целью энергосбережения все более большое внимание уделяется области разработки и эксплуатации вибрационных машин, а именно к электроприводам колебательного движения которые получили широкое распространение во многих областях промышленности. Исходя из этого можно сказать что создание энергоэффективных управляемых колебательных электроприводов на базе специализированных электрических двигателей является актуальной проблемой. Определение соотношений для энергетических показателей колебательных электроприводов позволяет решать, как задачу анализа, то есть определения энергетических характеристик спроектированного привода, так и задачу синтеза, то есть создания такого привода, который бы обеспечивал заданные параметры колебаний при минимальном расходе энергии. В колебательной системе кроме параметров нагрузки необходимо учитывать наличие инерционных, демпфирующих и позиционных нагрузочных усилий, присущих собственно электродвигателю и определяемых постоянной времени двигателя  $T_d$ , относительными усилиями демпфирования  $f_d$  и  $e_d$ , обратной связи  $f_{oc}$  и упругости  $p_{мех}$  компенсатора механической энергии. Сильное влияние этих параметров на характеристики колебательных электроприводов не позволяет непосредственно воспользоваться результатами анализа энергетики механических колебательных систем, описываемых уравнениями второго порядка. Необходимо совместное рассмотрение уравнения механического движения и уравнений, описывающих процессы, происходящие в колебательном электродвигателе.

$$T_n \frac{d^2\chi}{dt^2} + \varepsilon_n \frac{d\chi}{dt} + \rho_n \chi = \frac{\xi_n}{\chi_0} f_{n,m} \sin(\Omega t + \delta_n);$$

$$T_d \frac{d^2\chi}{dt^2} + \varepsilon_d \frac{d\chi}{dt} + \rho_d \chi = \frac{\xi_n}{\chi_0} f_{d,m} \sin(\Omega t + \delta_d);$$

$$f_m \sin(\Omega t + \delta) = f_e \sin(\Omega t + \gamma) - \frac{\chi_0}{\xi_n} f_d \frac{d\chi}{dt} + \frac{\chi_0}{\xi_n} f_{oc} \chi =$$

$$= f_{d,m} \sin(\Omega t + \delta_d) + f_{n,m} \sin(\Omega t + \delta_n).$$

Где  $T_n$ ,  $T_d$ ,  $\varepsilon_n$ ,  $\varepsilon_d$ ,  $f_d$ ,  $f_{oc}$ ,  $\rho_n$ ,  $\rho_d$  - постоянные времени и относительные демпфирующие и позиционные усилия, определяемые через электромеханические коэффициенты нагрузки и двигателя.

Для колебательного электропривода построим электрическую схему, эквивалентную механической.

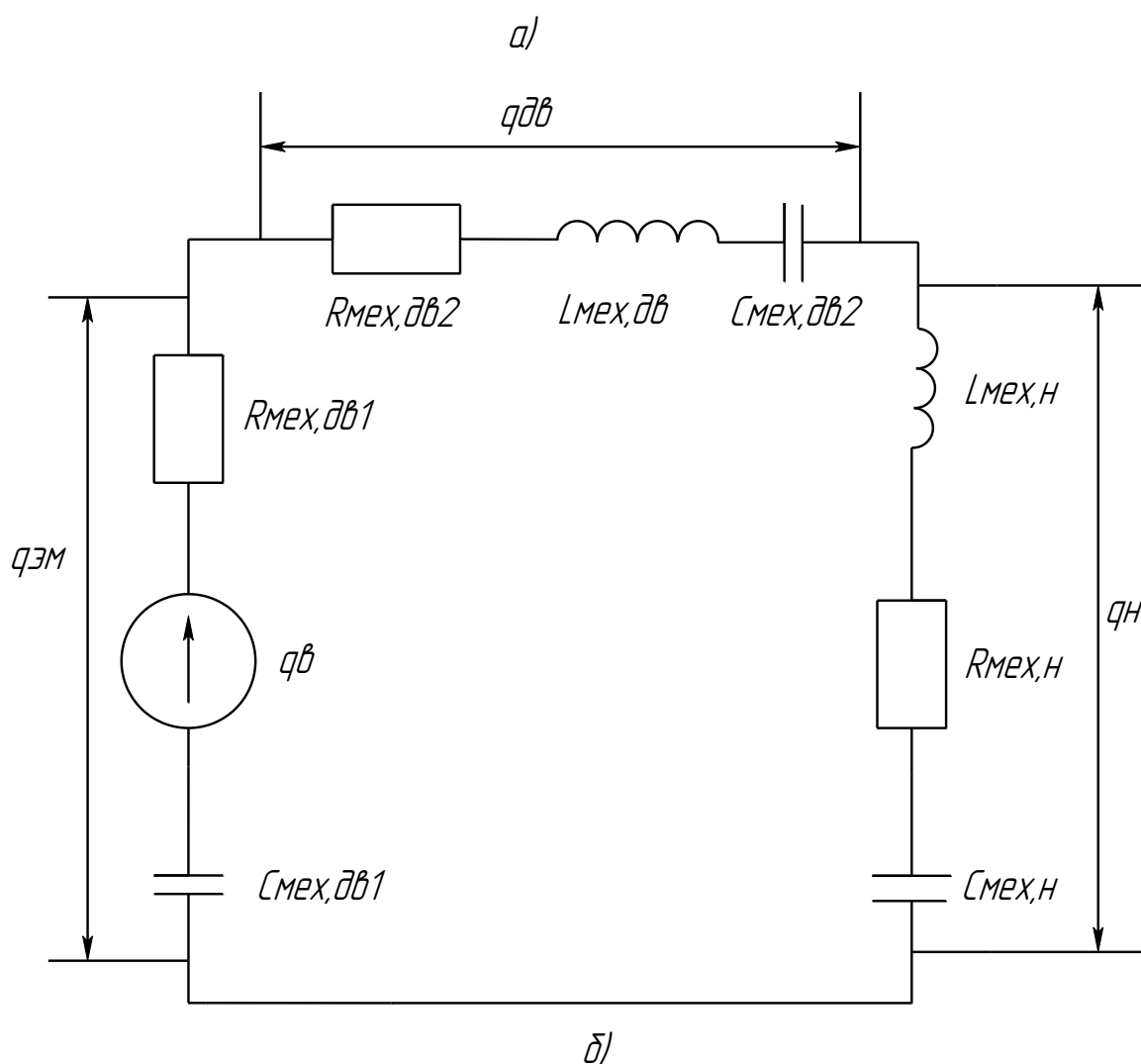
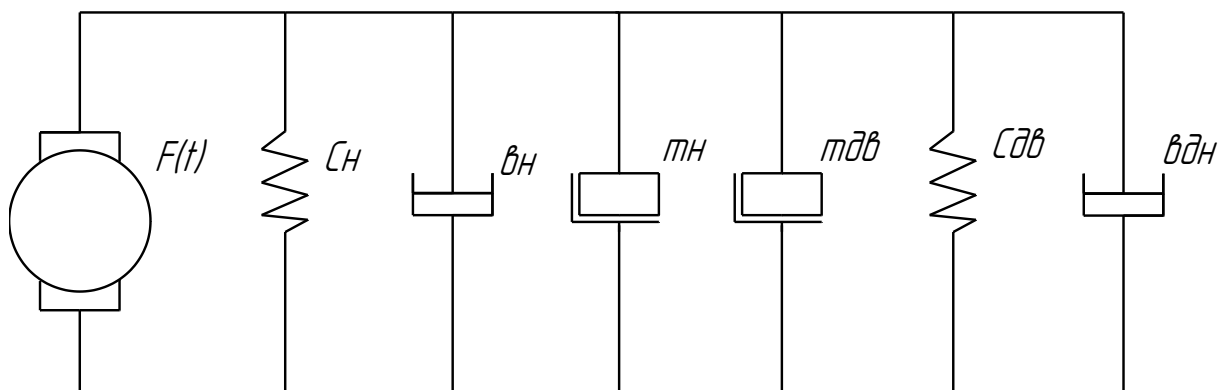


Рисунок 1.15 - Механическая цепь колебательного электропривода (а) и эквивалентная ей электрическая схема (б)

$L_{мех}$ ,  $C_{мех}$ ,  $R_{мех}$  - коэффициенты позиционной, демпфирующего и инерционного усиления нагрузки.

Данная система позволяет определить какие будут потери механической мощности в отдельных узлах колебательного электропривода.

Средняя механическая мощность, отдаваемая в нагрузку и механическая мощность, развиваемая электродвигателем, достигается в резонансном режиме значения близкой к предельной величине  $f_v^2 / 2e_n$ , если при изготовлении двигателя обеспечить низкое к нулю  $f_d$  и  $e_d$  или отрицательное  $f_d$ . Мощности потерь могут быть понижены также за счет уменьшения электромеханического демпфирования двигателя  $f_d$  и  $e_d$ . Резонансную частоту колебаний системы можно регулировать, изменяя относительное усилие электромеханической обратной связи  $f_{oc}$ , поддерживая тем самым резонансный режим работы.

$$\Omega_0 = \sqrt{\frac{\rho_\partial + \rho_M + f_{oc}}{T_\partial + T_M}}$$

Для достижение максимальной мощности, отдаваемой в нагрузку, необходимо использовать резонансный режим работы и управлять частотой колебания за счет электромеханической обратной связи. При этом необходимо иметь большие возмущающие усилия обратной связи  $f_{oc}$  и малое демпфирование электромеханической колебательной системы  $f_d$  и  $e_d$ . В реальном случае, когда демпфирование  $e$  не равно нулю, появляется необходимость применения для компенсации отрицательное демпфирование двигателя которое может быть достигнуто путем изменения параметров нагрузки колебательного электропривода. Отсюда можно сделать вывод что, наиболее эффективным направлением повышения энергетических характеристик колебательного электропривода является обеспечение резонансного режима его работы.

Режим резонансной работы можно получить при введении в систему колебательного движения позиционной нагрузки в виде гидравлических, механических, а также пневматических упругих связей. В этом случае режим резонансной работы будет обеспечен только для одной установившейся частоты колебаний. Не смотря на этот недостаток, такие колебательные системы находят широкое применение в различных областях промышленности, а также разнообразных технологических процессов. Для колебательного электропривода построим электрическую схему, эквивалентную механической.

Второй способ достижения резонансного режима работы заключается в изменении динамических параметров колебательной системы путем введения добавочных дополнительных электромагнитных связей, которые



создают усилие, соответствующие изменению нейтрали колебаний и ориентированное против вынужденной силы. По средству, изменения величины обратной связи, а, следовательно, и частоты собственных колебаний имеется возможность регулирования жесткости системы.

На основании проведенного анализа можно сделать следующие основные выводы, характеризующие современное состояние вопроса разработки, исследования, создания и применения колебательных электроприводов, а также определяющие цель и задачи работы:

- Дальнейшее развитие производства, при котором применяют новое оборудование, которое позволяет обеспечить рост производства, повышение качества выпускаемой продукции в различных областях современной промышленности, использующих вибрационные технологические операции, требуют широкого и целенаправленного использования колебательного режима работы электропривода;
- Построение энергоэффективных управляемых электроприводов колебательного движения на базе специализированных электрических двигателей, режим колебательной работы которых возбуждается с помощью мягкого периодического реверса с линейной фазовой модуляцией, а регулирование собственной частоты и стабилизация параметров колебаний осуществляется за счет введения дополнительных электрических сил;
- Наиболее эффективным направлением повышения энергетических характеристик колебательного электропривода является обеспечение колебательного режима его работы. Режим резонансной работы можно получить при введении в систему колебательного движения позиционной нагрузки в виде гидравлических, механических, а также пневматических упругих связей.

Изложенное обуславливает необходимость изучить влияния параметров нагрузки на выходные характеристики колебательного электропривода, оценить динамические характеристики вентильного электропривода колебательного движения, а также оценить возможность построения вентильных электроприводов с регулируемой собственной частотой. Все сказанное и является целью настоящей магистерской диссертации.

Для достижения поставленной цели необходимо решить следующие задачи:

- Произвести математическое описание ВД в режиме колебательного движения;
- Разработать математическую модель вентильного электропривода во вращающейся системе координат в прикладном пакете MATLAB, работающего непосредственно в режиме колебательного движения с учетом введения фиктивной жесткости;
- Выполнить расчет коэффициентов модели;
- Произвести анализ рабочих характеристик вентильного электропривода колебательного движения.

## **2. Математическое моделирование вентильного электропривода колебательного движения**

### **2.1 Математическое описание ВД в режиме колебательного движения**

Электропривод колебательного движения может применяться в качестве управляемых источников колебательного перемещения или усиления. Это зависит от того, какая из выходных величин является основной, то есть имеет небольшое изменение по своей форме и величине, а зависимости от нагрузки. Этот раздел работы колебательного электропривода можно назвать условным, так как во всех предложенных случаях в нагрузку будет отдаваться колебательная мощность. Которая указывает, какая из выходных величин помогает в компенсации изменения параметров нагрузки. Известно, что двигатель имеет свойства «источника силы», если он запутывается от источника тока, а в других случаях от источника напряжения.

Для большинства отраслей промышленности в которых применяются колебательные электропривода, необходимы источники колебательного перемещения и мощности, в частности, для приводов испытательной и регулировочной технике, виброобрабатывающих механизмов, сканирующих устройств, колебательных электроприводах различных технологических систем (вибросмещения, для вибросортировки и т.д.).

При составлении дифференциальных уравнений будем считать напряжения колебательного электропривода известными.

Моделирование вентильного двигателя производится в ортогональной системе координат.

При построении математической модели вентильного двигателя и электропривода принимается следующий ряд допущений:

- Вентильная машина электрически симметрична, потери в стали не учитываются;
- Реакция якоря считается незначительной при влиянии на магнитный поток в вентильной машине;
- Магнитная цепь машины не насыщена. Энергия магнитного поля сосредоточена в воздушном зазоре;
- Явление гистерезиса и потери в стали не учитываются;
- Энергия электрического поля невелика;
- Распределение намагничивающих сил и индукций в пространстве принимается синусоидальным;
- Оси обмоток взаимно перпендикулярны.

При исследовании режимов работы во вращающихся электрических машинах, целесообразно использовать координатную систему, жестко связанную с ротором. Поскольку ротор исследуемой машины обладает магнитной асимметрией, т.е. различными магнитными проводимостями в двух взаимно перпендикулярных осях, пространственные векторы будут раскладываться на две составляющие, рисунок 1.16

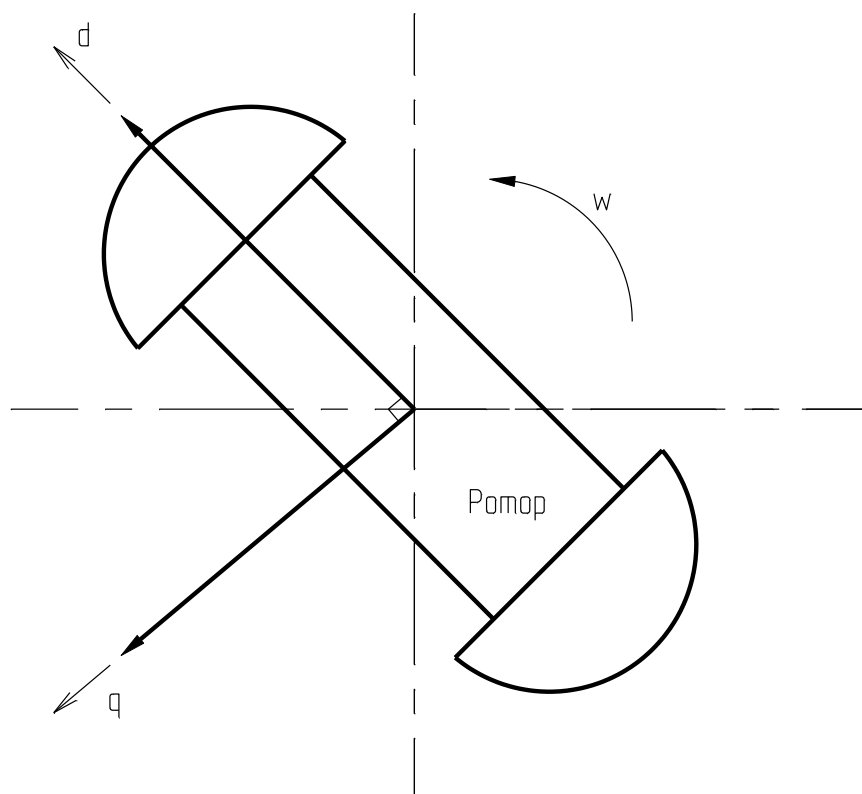


Рисунок 1.16 - Разложение векторов во вращающейся со скоростью ротора системе координат.

В направлении продольной (d) и поперечной (q) осях, причем направление оси d принимается за вещественную ось, а q – за мнимую. Принцип управления вентильного двигателя, основан на использовании датчика положения ротора (ДПР), преобразователя координат и силового полупроводникового преобразователя. Они совместно формируют на обмотках статора машины напряжения  $U_a, U_b, U_c$  таким образом, чтобы результирующий вектор напряжения  $U_s$  всегда был сдвинут на угол  $\Theta = 90^\circ$  и неподвижен относительно оси магнитного поля ротора. В этом случае и результирующий вектор тока будет сдвинут и неподвижен относительно потока ротора  $\Phi_0$ , что и создает момент на валу двигателя.

Связь между вращающейся и неподвижной системами координат рассмотрена ниже.

$$\vec{i}_{S.Bp} = \vec{i}_{S.H} \cdot e^{-j\omega t}, \quad i_d = i_{S\alpha} \cdot \cos \omega t + i_{S\beta} \cdot \sin \omega t, \quad i_q = i_{S\beta} \cdot \cos \omega t - i_{S\alpha} \cdot \sin \omega t$$

$$\vec{i}_{S.H} = \vec{i}_{S.Bp} \cdot e^{j\omega t}, \quad i_{S\alpha} = i_d \cdot \cos \omega t - i_q \cdot \sin \omega t, \quad i_{S\beta} = i_q \cdot \cos \omega t + i_d \cdot \sin \omega t$$

При переходе к вращающимся координатам уравнение электрического равновесия преобразуется к виду:

$$\vec{u}_s = R_s \cdot \vec{i}_s + L_s \cdot \frac{d\vec{i}_s}{dt} + j \cdot \omega \cdot L_s \cdot \vec{i}_s + j \cdot \omega \cdot \vec{\Phi}_0$$

Где  $\vec{u}_s = u_{sd} - j u_{sq}$  – результирующий вектор напряжения на статорной обмотке;

$R_s, L_s$  – активное сопротивление и полная индуктивность фазы статора;

$\vec{\Phi}_0 = \Phi_d + j\Phi_q$  – вектор потока машины;

$j\omega L_s i_s$  – падение напряжения, обусловленное потоком рассеяния статора;

$j\omega\Phi_0$  – падение напряжения, обусловленное основным магнитным потоком машины, который создается возбуждением ротора.

Разложив результирующие вектора электромагнитных переменных состояния по осям  $d$  и  $q$ , получим скалярное описание машины. При этом ось  $d$  совмещается с осью потока ротора.

$$\begin{aligned}
u_d &= R_s \cdot i_d + L_s \cdot \frac{di_d}{dt} - \omega \cdot L_s \cdot i_q \\
u_q &= R_s \cdot i_q + L_s \cdot \frac{di_q}{dt} + \omega \cdot L_s \cdot i_d + \omega \cdot \Phi_0 \\
M &= \frac{3}{2} \cdot p \cdot \Phi_0 \cdot i_q \\
J \cdot \frac{d\omega_m}{dt} &= M - M_n
\end{aligned}$$

где принято

$$\vec{u}_s = u_d + j \cdot u_q, \quad \vec{i}_s = i_d + j \cdot i_q, \quad \vec{\Phi}_0 = \Phi_0.$$

При анализе снова вводятся относительные переменные. В качестве базовых величин принимаются:

$$U_b = \sqrt{2} \cdot U_\phi, \quad I_b = \frac{U_b}{R_s}, \quad \omega_b = \frac{U_b}{\Phi_0}, \quad M_b = \frac{3}{2} \cdot p \cdot \Phi_0 \cdot I_b$$

В относительных величинах уравнения запишутся в виде:

$$\begin{aligned}
\bar{u}_d &= \bar{i}_d + \bar{T}_s \cdot \frac{d\bar{i}_d}{dt} - \bar{\omega} \cdot \bar{T}_s \cdot \bar{i}_q \\
\bar{u}_q &= \bar{i}_q + \bar{T}_s \cdot \frac{d\bar{i}_q}{dt} + \bar{\omega} \cdot \bar{T}_s \cdot \bar{i}_d + \bar{\omega} \\
\bar{T}_m \cdot \frac{d\bar{\omega}_m}{dt} &= \bar{m} - \bar{m}_n, \quad \bar{m} = \bar{i}_q
\end{aligned}$$

где относительные переменные и параметры определены выражениями:

$$\bar{u} = \frac{\vec{u}}{U_b}, \quad \bar{i} = \frac{\vec{i}}{I_b}, \quad \bar{\omega} = \frac{\omega}{\omega_b}, \quad \bar{m} = \frac{M}{M_b}, \quad \bar{T}_s = \frac{\omega_b \cdot L_s}{R_s}, \quad \bar{T}_m = \frac{J \cdot \omega_b^2}{M_b}, \quad \bar{t} = \omega_b \cdot t$$

Значения базовых величин, относительных переменных и параметров приведены в приложение.

## 2.2. Расчет параметров двигателей, применяемых для создания модели.

ДБМ - двигатели бесконтактные моментные. Двигатель состоит из синхронного двигателя, выполненного в виде плоской, встраиваемой конструкции с многополюсным ротором коллекторного типа, содержащей редкоземельный магнит и двухфазные или трёхфазные обмотки статора. Существуют два вида статора: гладкий и пазовый статор.

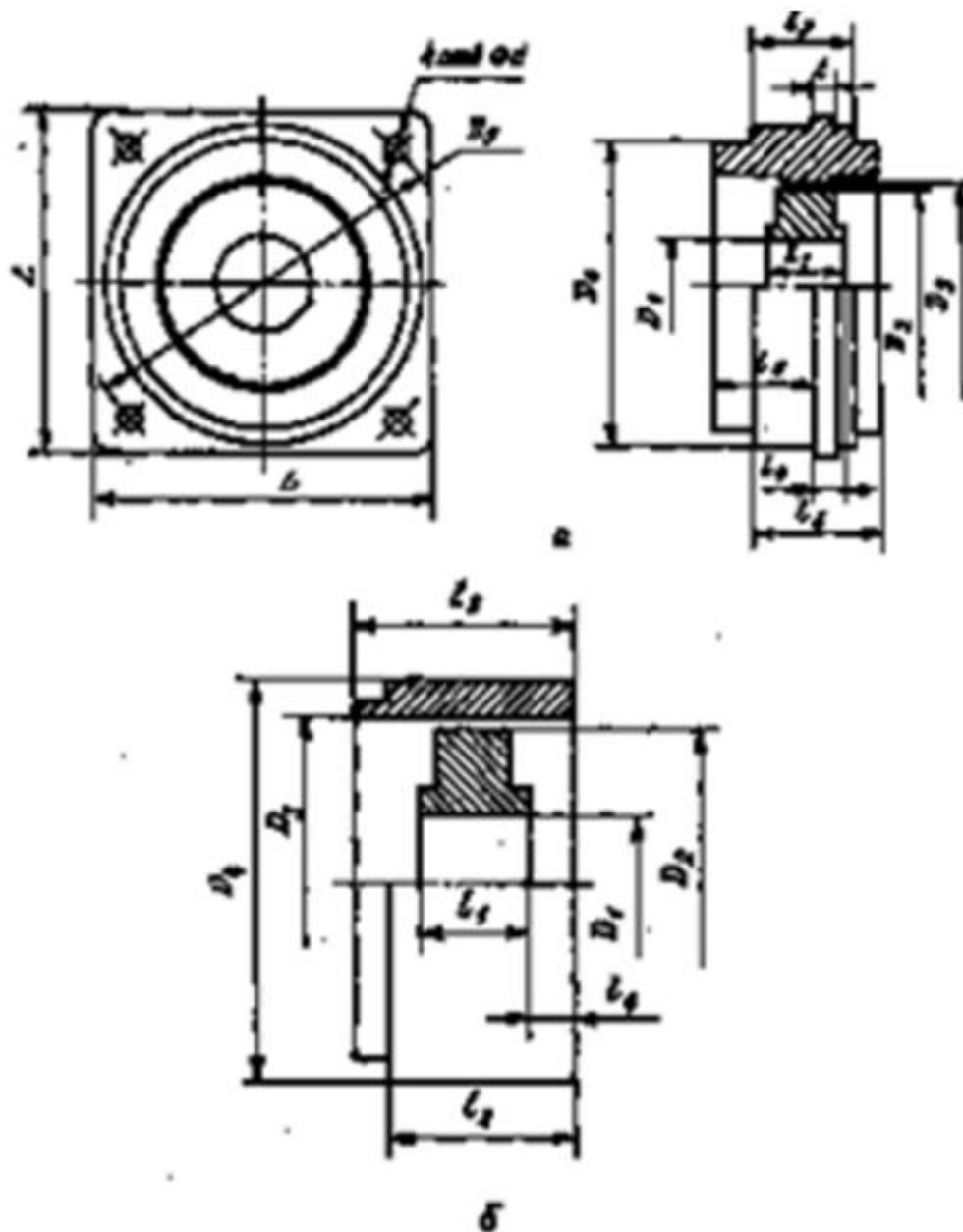


Рисунок 1.17 - Конструктивные схемы двигателей ДБМ: а) с пазовым статором, б) с гладким статором.

Серия двигателей имеет 26 типоразмеров, номинальное напряжение питания 27 В. Пульсации момента по углу поворота для двигателей с гладким статором 3-5%, а с пазовым ротором 10%.

Таблица № 1.4 - Параметры двигателей ДБМ150-4-1,5-2 и ДБМ185-6-0,2-2

Тип машины	Число пар полюсов	Число фаз	Сопр. фазы	Эл.маг. пост. времени	Ток к.з	Момент к.з.	Скорость холостого хода	Момент инерции	Масса
ДБМ150-4-1,5-2	8	3	0,05	1,2	340	47,3	1750	$3 \cdot 10^{-3}$	3,0
ДБМ185-6-0,2-2	8	2	2,64	1,4	10,2	11,5	195	$9 \cdot 10^{-3}$	5,4

### Пример расчёта относительных переменных и параметров для двигателя ДБМ150-4-1,5-2

Базовые величины определяем по зависимостям:

$$U_b = \sqrt{2} \cdot U_\phi = \sqrt{2} \cdot I_k \cdot R_s = \sqrt{2} \cdot 340 \cdot 0,05 = 24,04 \text{ В}$$

$$I_b = \frac{U_b}{R_s} = \frac{24,04}{0,05} = 480,83 \text{ А}$$

$$\omega_{m0} = \frac{\pi \cdot n_0}{30} = \frac{3,14 \cdot 1750}{30} = 183,166$$

$$\omega_b = p \cdot \omega_{m0} = 8 \cdot 183,166 = 1465,33331 \text{ 1/с}$$

$$\Phi_0 = \frac{U_b}{\omega_b} = \frac{24,04}{1465,333} = 0,0164 \text{ Вб}$$

$$M_b = \frac{3}{2} \cdot p \cdot \Phi_0 \cdot I_b = \frac{3}{2} \cdot 8 \cdot 0,0164 \cdot 480,83 = 94,627 \text{ Н} \cdot \text{м}$$

Относительные параметры:

$$\bar{T}_s = \frac{\omega_b \cdot L_s}{R_s} = 1465,333 \cdot 1,2 \cdot 10^{-3} = 1,758 \text{ с}$$

$$\bar{T}_m = \frac{J \cdot \omega_b^2}{M_b} = \frac{3 \cdot 10^{-3} \cdot (1465,333)^2}{94,627} = 16,836 \text{ с}$$

## Пример расчёта относительных переменных и параметров для двигателя ДБМ185-6-0,2-2

Базовые величины определяем по зависимостям:

$$U_b = \sqrt{2} \cdot U_\phi = \sqrt{2} \cdot I_\kappa \cdot R_s = \sqrt{2} \cdot 10,2 \cdot 2,64 = 38,08 \text{ В}$$

$$I_b = \frac{U_b}{R_s} = \frac{38,08}{2,64} = 14,424 \text{ А}$$

$$\omega_{m0} = \frac{\pi \cdot n_0}{30} = \frac{3,14 \cdot 195}{30} = 20,41$$

$$\omega_b = p \cdot \omega_{m0} = 8 \cdot 20,41 = 163,281 / \text{с}$$

$$\Phi_0 = \frac{U_b}{\omega_b} = \frac{38,08}{163,28} = 0,233 \text{ Вб}$$

$$M_b = \frac{3}{2} \cdot p \cdot \Phi_0 \cdot I_b = \frac{3}{2} \cdot 8 \cdot 0,233 \cdot 14,424 = 40,33 \text{ Н} \cdot \text{м}$$

Относительные параметры:

$$\bar{T}_s = \frac{\omega_b \cdot L_s}{R_s} = 163,28 \cdot 1,4 \cdot 10^{-3} = 0,23 \text{ с}$$

$$\bar{T}_m = \frac{J \cdot \omega_b^2}{M_b} = \frac{9 \cdot 10^{-3} \cdot (163,28)^2}{40,33} = 1,47 \text{ с}$$

### 2.3. Модель вентильной машины во вращающейся системе координат.

При анализе вентильной машины обычно используется вращающаяся со скоростью ротора система координат.

Связь между вращающейся и неподвижной системами координат рассмотрена ниже.

$$\vec{i}_{S.Br} = \vec{i}_{S.H} \cdot e^{-j\omega t}, \quad i_d = i_{S\alpha} \cdot \cos \omega t + i_{S\beta} \cdot \sin \omega t, \quad i_q = i_{S\beta} \cdot \cos \omega t - i_{S\alpha} \cdot \sin \omega t$$

$$\vec{i}_{S.H} = \vec{i}_{S.Br} \cdot e^{j\omega t}, \quad i_{S\alpha} = i_d \cdot \cos \omega t - i_q \cdot \sin \omega t, \quad i_{S\beta} = i_q \cdot \cos \omega t + i_d \cdot \sin \omega t$$

При переходе к вращающимся координатам уравнение электрического равновесия преобразуется к виду:

$$\vec{u}_s = R_s \cdot \vec{i}_s + L_s \cdot \frac{d\vec{i}_s}{dt} + j \cdot \omega \cdot L_s \cdot \vec{i}_s + j \cdot \omega \cdot \vec{\Phi}_0$$



Разложив результирующие вектора электромагнитных переменных состояния по осям  $d$  и  $q$ , получим скалярное описание машины. При этом ось  $d$  совмещается с осью потока ротора.

$$u_d = R_s \cdot i_d + L_s \cdot \frac{di_d}{dt} - \omega \cdot L_s \cdot i_q$$

$$u_q = R_s \cdot i_q + L_s \cdot \frac{di_q}{dt} + \omega \cdot L_s \cdot i_d + \omega \cdot \Phi_0$$

$$M = \frac{3}{2} \cdot p \cdot \Phi_0 \cdot i_q$$

$$J \cdot \frac{d\omega_m}{dt} = M - M_n$$

где принято

$$\vec{u}_s = u_d + j \cdot u_q, \quad \vec{i}_s = i_d + j \cdot i_q, \quad \vec{\Phi}_0 = \Phi_0.$$

При анализе снова вводятся относительные переменные. В качестве базовых величин принимаются:

$$U_b = \sqrt{2} \cdot U_\phi, \quad I_b = \frac{U_b}{R_s}, \quad \omega_b = \frac{U_b}{\Phi_0}, \quad M_b = \frac{3}{2} \cdot p \cdot \Phi_0 \cdot I_b$$

В относительных величинах уравнения запишутся в виде:

$$\bar{u}_d = \bar{i}_d + \bar{T}_s \cdot \frac{d\bar{i}_d}{dt} - \bar{\omega} \cdot \bar{T}_s \cdot \bar{i}_q$$

$$\bar{u}_q = \bar{i}_q + \bar{T}_s \cdot \frac{d\bar{i}_q}{dt} + \bar{\omega} \cdot \bar{T}_s \cdot \bar{i}_d + \bar{\omega}$$

$$\bar{T}_m \cdot \frac{d\bar{\omega}_m}{dt} = \bar{m} - \bar{m}_n, \quad \bar{m} = \bar{i}_q$$

где относительные переменные и параметры определены выражениями:

$$\bar{u} = \frac{\vec{u}}{U_b}, \quad \bar{i} = \frac{\vec{i}}{I_b}, \quad \bar{\omega} = \frac{\omega}{\omega_b}, \quad \bar{m} = \frac{M}{M_b}, \quad \bar{T}_s = \frac{\omega_b \cdot L_s}{R_s}, \quad \bar{T}_m = \frac{J \cdot \omega_b^2}{M_b}, \quad \bar{t} = \omega_b \cdot t$$

Значения базовых величин, относительных переменных и параметров приведены в пункте 2.2 расчет параметров двигателя необходимых для создания модели.

Модель вентильной машины во вращающейся системе координат, построенная по уравнениям и собранная в пакете MATLAB Simulink R2013a имеет вид.

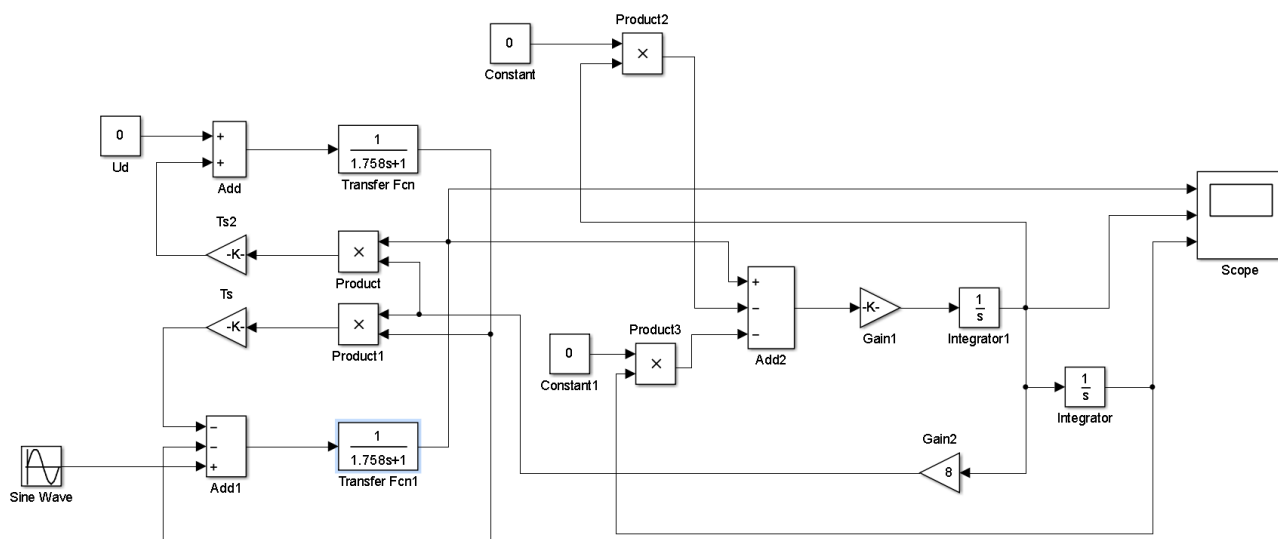


Рисунок 2.1 - Модель вентильной машины во вращающейся системе координат

#### 2.4. Модель вентильного электропривода колебательного движения с регулируемой собственной частотой.

Электропривод колебательного движения может применяться в качестве управляемых источников колебательного перемещения или усиления. Это зависит от того, какая из выходных величин является основной, то есть имеет небольшое изменение по своей форме и величине, а зависимости от нагрузки.

Этот раздел работы колебательного электропривода можно назвать условным, так как во всех предложенных случаях в нагрузку будет отдаваться колебательная мощность. Которая указывает, какая из выходных величин помогает в компенсации изменения параметров нагрузки. Известно, что двигатель имеет свойства «источника силы», если он запутывается от источника тока, а в других случаях от источника напряжения.

Значения базовых величин, относительных переменных и параметров приведены в пункте 2.2 расчет параметров двигателя необходимых для создания модели.

Модель вентильной машины во вращающейся системе координат, построенная по уравнениям и собранная в пакете MATLAB Simulink R2013a имеет вид.

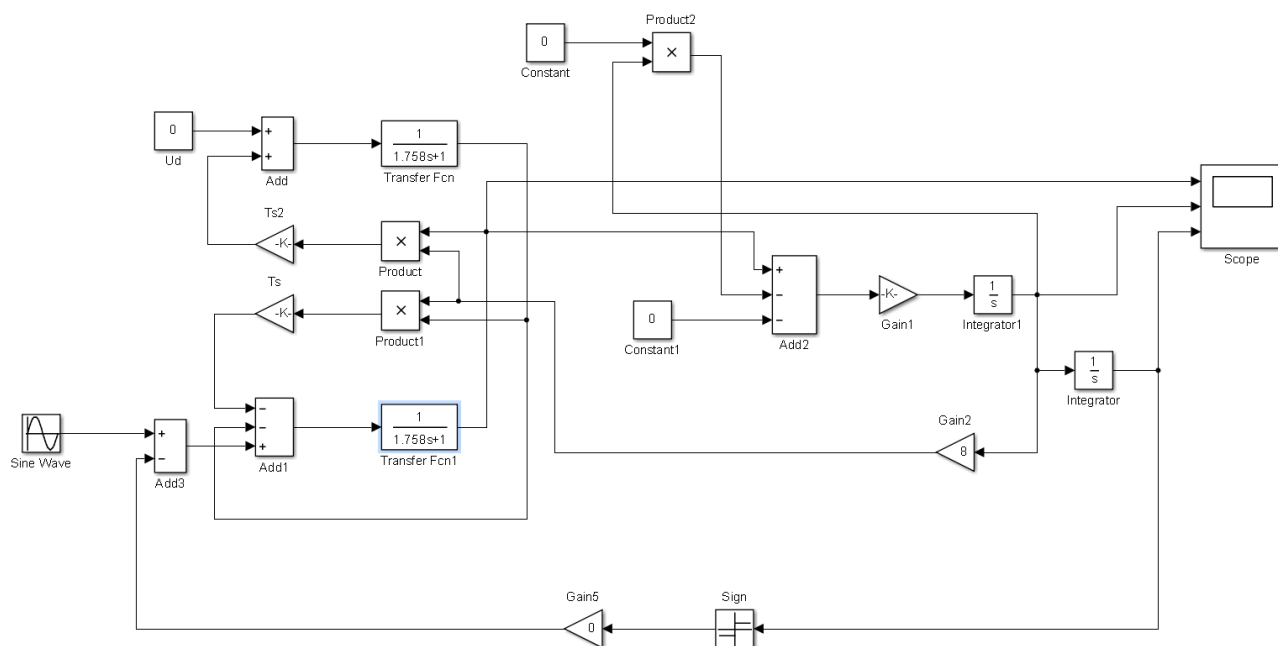


Рисунок 2.2 - Модель вентильной машины с регулируемой собственной частотой

Одним из важных критериев корректной работы математической модели является правильный выбор системы координат к которой мы будем ее привязывать. Так к примеру, при исследовании режимов работы во вращающихся электрических машинах, целесообразно использовать координатную систему, жестко связанную с ротором. Поскольку ротор исследуемой машины обладает магнитной асимметрией, т.е. различными магнитными проводимостями в двух взаимно перпендикулярных осях, пространственные векторы будут раскладываться на две составляющие.

При исследовании электрических машин со статарной несимметрией, обусловленным напряжением питания, наиболее удобна неподвижная система координат с осями  $\alpha, \beta$ , которая позволяет устранить периодичность коэффициентов и оперировать с реальными фазными токами и частотами первичного элемента.

### **3. Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение**

Задачи данного научно-исследовательского проекта является:

- Исследование вентильного электропривода колебательного движения при потенциально фазовой модуляции;
- Исследование вентильного электропривода колебательного движения в резонансном режиме работы;
- Создание рекомендации по настройке резонансного режима работы применимого к вентильным электроприводам.

В данном разделе дипломной работы рассмотрены вопросы финансового менеджмента. Техничко-экономическое обоснование научно-исследовательских работ проводится с целью определения и анализа трудовых и денежных затрат, направленных на их реализацию.

#### **3.1 Организация работ технического проекта**

Планирование комплекса предполагаемых работ осуществляется в следующем порядке:

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

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

Номерам этапов соответствуют следующие виды выполняемых работ, представленные в таблице 3.1

Таблица № 3.1 - Перечень этапов, работ и распределение исполнителей

Основные этапы	№ раб	Содержание работ	Должность исполнителя	Длительность работ в рабочих днях
Разработка технического задания	1	Составление и учреждение технического задания	Научный руководитель Инженер	2
Выбор направления исследования	2	Выбор направления исследования	Инженер	10

Продолжение таблицы №3.1

Основные этапы	№ раб.	Содержание работ	Должность исполнителя	Длительность работ в рабочих днях
Теоретическая часть	3	Основные понятия вентильного электропривода	Инженер	14
	4	Принципы построения и технические требования, предъявляемые к электроприводам с прерывистым законом движения	Инженер	15
Экспериментальная часть	5	Математическое описание ВД в режиме колебательного движения	Инженер	10
	6	Модель вентильного электропривода во вращающейся системе координат в прикладном пакете MATLAB	Инженер	6
	7	Оценка влияния параметров нагрузки на выходные характеристики электропривода	Инженер	12
Написание статьи в научный журнал	8	Формирование текущих результатов в статью	Инженер	3
Обобщение и оценка результатов	9	Оценка эффективности полученных результатов	Научный руководитель Инженер	6
Оформление отчета	10	Составление пояснительной записки	Инженер	14
	11	Проверка магистерской диссертации	Научный руководитель Инженер	2
	12	Исправление ошибок	Инженер	2
Защита магистерской диссертации	13	Подготовка к защите магистерской диссертации	Инженер	5

Продолжительность выполнения проекта составит 101 рабочий день.

Из них:

10 дней – продолжительность выполнения работ руководителем;

101 день – продолжительность выполнения работ инженером.

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

Диаграмма Ганта – горизонтальный ленточный график, на котором работы по теме представляются протяженными во времени отрезками, характеризующимися датами начала и окончания выполнения данных работ [19].

График строится для ожидаемого по длительности исполнения работ в рамках технического проекта, с разбивкой по месяцам и декадам за период времени подготовки магистерской диссертации. На основе таблицы 3.1 строим план - график проведения работ (Таблица 3.2).

Исходя из составленной диаграммы, можно сделать вывод, что продолжительность работ занимает 12 декад, начиная с первой декады февраля, заканчивая первой декадой июня. Учитывая вероятностный характер оценки трудоемкости, реальная продолжительность работ может быть, как меньше (при благоприятном стечении обстоятельств), так и несколько превысить указанную продолжительность (при неблагоприятном стечении обстоятельств). Далее по диаграмме Ганта можно предварительно оценить показатели рабочего времени для каждого исполнителя.

Таблица № 3.2 - Диаграмма Ганта

№	Вид работ	Исполнитель работ	Раб.дн.	Продолжительность выполнения работ												
				Февраль		Март			Апрель			Май			Июнь	
				1	2	1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2
1	Составление и утверждение технического задания	Научный руководитель	2	—												
		Инженер	2	—												
2	Подбор и изучение материалов по теме	Инженер	10	—	—											
3	Основные понятия вентильного электропривода	Инженер	14		—	—	—									
4	Принципы построения электроприводов колебательного движения	Инженер	15			—	—	—								
5	Математическое описание ВД	Инженер	10					—	—							
6	Модель ВД во вращающейся системе координат	Инженер	6						—	—						
7	Влияния параметров нагрузки на выходные характеристики	Инженер	12							—	—	—				
8	Формирование текущих результатов в статью	Инженер	3									—	—			
9	Оценка эффективности полученных результатов	Инженер	6									—	—			
		Научный руководитель	6									—	—			
10	Составление пояснительной записки	Инженер	14									—	—	—		
11	Проверка магистерской диссертации руководителем	Научный руководитель	4												—	—
		Инженер	4												—	—
12	Исправление ошибок	Инженер	2												—	—
13	Подготовка к защите магистерской диссертации	Инженер	5													—

### 3.2 Смета затрат на проектирование

Смета затрат на проект ( $K_{III}$ ) включает в себя материальные затраты, амортизацию, затраты на заработную плату, на социальные нужды, прочие и накладные затраты.

$$K_{III} = K_{mat} + K_{ам} + K_{з/пл} + K_{с.о} + K_{пр} + K_{накл}$$

где  $K_{mat}$  - материальные затраты;

$K_{ам}$  - амортизация компьютерной техники;

$K_{з/пл}$  - затраты на заработную плату;

$K_{с.о}$  - затраты на социальные нужды;

$K_{пр}$  – прочие расходы;

$K_{накл}$  – накладные затраты.

#### 3.2.1 Материальные затраты на канцелярские товары

Материальные затраты - Элемент себестоимости продукции (работ, услуг). В них отражается стоимость приобретаемых со стороны сырья и материалов, входящих в состав вырабатываемой продукции или являющихся необходимым компонентом при изготовлении продукции (проведении работ, оказании услуг);

Таблица 3.3 включает в себя стоимость всех материалов, используемых при разработке проекта.

Таблица № 3.3 - Материальные затраты на НТИ (руб.)

Наименование	Единицы измерения	Количество	Цена за ед., руб.	Затраты на материалы, руб.
Бумага	лист	150	2	300
Ручка	шт.	1	25	25
Тетрадь	шт.	1	15	15
Картридж для принтера	шт.	1	610	610
CD диск	шт.	1	50	50
Итого				1000

Принимаем величину материальных затрат  $k_{mat} = 1000p$

#### 3.2.2 Затраты на амортизацию

Все основные фонды учитываются в натуральных и денежных показателях. Учет в денежных единицах необходим для начисления ежегодных сумм амортизации и определения финансовых показателей (себестоимости и прибыли). Основные фонды переносят свою стоимость на вновь изготовленную продукцию в виде амортизационных отчислений.

Амортизация - это возмещение стоимости основных фондов в течение срока их эксплуатации. Отчисления производятся регулярно за счет себестоимости в амортизационный фонд. Предприятие, по мере



необходимости, снимает эти средства на приобретение новых основных фондов – реновация.

$$K_{ам} = \frac{T_{исп.кт}}{T_{кал}} \cdot Ц_{кт} \cdot \frac{1}{T_{сл}}$$

Где  $T_{исп.кт}$  - время использования компьютерной техники (90 дней)

$T_{кал}$  - календарное время (365 дней)

$Ц_{кт}$  - цена компьютерной техники (25000 руб)

$T_{сл}$  - срок службы компьютерной техники (5 лет)

$$K_{ам} = \frac{90}{365} \cdot 25000 \cdot \frac{1}{5} = 1233 \text{ руб.}$$

### 3.2.3 Затраты на заработную плату

Затраты на заработную плату. Вознаграждение за труд в зависимости от квалификации работника, сложности, количества, качества и условий выполняемой работы, а также компенсационные и стимулирующие выплаты, затраты на заработную плату (для инженера и ИР).

$$K_{з / пл} = ЗП_{инж} + ЗП_{ир}$$

$$ЗП_{мес} = ЗП_о \cdot K_1 \cdot K_2, \text{ где}$$

$K_1$  - коэффициент, учитывающий отпуск (1,1 = 10%);

$K_2$  - районный коэффициент (1,3 = 30%);

$ЗП_о$  - месячный отклад (для профессора 30000 р., для инженера 17000р.)

Для научного руководителя:

$$ЗП_{мес} = 30000 \cdot 1,1 \cdot 1,3 = 42900 \text{ руб.}$$

Для инженера:

$$ЗП_{мес} = 17000 \cdot 1,1 \cdot 1,3 = 24310 \text{ руб.}$$

$$ЗП_{ор} = \frac{ЗП_{мес}}{21} \cdot n, \text{ где}$$

$21$  - Число рабочих дней в месяц;

$n$  - Фактическое число дней в проекте.

Для научного руководителя:

$$ЗП_{ор} = \frac{ЗП_{мес}}{21} \cdot n = \frac{42900}{21} \cdot 10 = 20429 \text{ руб.}$$

Для инженера:

$$ЗП_{ор} = \frac{ЗП_{мес}}{21} \cdot n = \frac{24310}{21} \cdot 101 = 116920 \text{ руб.}$$

$$K_{з / пл} = 20429 + 116920 = 137349 \text{ руб.}$$

### 3.2.4 Затраты на социальные нужды

Затраты на социальные нужды. Затраты организации по обязательным и добровольным взносам в органы государственного страхования, пенсионного фонда, фонда медицинского страхования от затрат на оплату труда работников, занятых в производстве продукции, работ, услуг в непромышленной сфере в соответствии с порядком, установленным законодательством.

Затраты на социальные нужды берем в размере 30% от  $Kз/пл$ .

$$Kc.o. = \frac{Kз / пл \cdot 30\%}{100\%} = \frac{137349 \cdot 0,3}{1} = 41205 \text{ руб.}$$

### 3.2.5 Прочие затраты

Налоги, сборы, платежи (включая по обязательным видам страхования), отчисления в страховые фонды (резервы) и другие обязательные отчисления, производимые в соответствии с установленным законодательством порядком.

Прочие затраты принимаются в размере 10% от ( $K_{мат} + K_{ам} + Kз/пл + Kc.o$ )

$$K_{пр} = \frac{(K_{мат} + K_{ам} + Kз / пл + Kc.o.) \cdot 10\%}{100\%} = \frac{(1000 + 1233 + 137349 + 41205) \cdot 0,1}{1} = 18079 \text{ руб.}$$

### 3.2.6 Накладные затраты

Связаны с обслуживанием отдельных подразделений (цехов, участков) или организации в целом и управлением ими. Они состоят из общепроизводственных и общехозяйственных расходов.

Накладные расходы принимаются в размере 200% от  $Kз/пл$ .

$$K_{накл} = \frac{Kз / пл \cdot 200\%}{100\%} = \frac{137349 \cdot 2}{1} = 274698 \text{ руб.}$$

Сведем полученные результаты в таблицу 3.4

Таблица № 3.4 - Смета затрат на проект

№	Элементы затрат	Стоимость, руб.
1	Материальные затраты	1000
2	Амортизация компьютерной техники	1233
3	Затраты на заработную плату	137349
4	Затраты на социальные нужды	41205
5	Прочие затраты	18079
6	Накладные расходы	274698
	Итого:	473564

Смета затрат на проект:

$$K_{III} = K_{mat} + K_{ам} + K_{з / пл} + K_{с.о} + K_{пр} + K_{накл} =$$

$$= 1000 + 1233 + 137349 + 41205 + 18079 + 274698 = 473564 \text{ руб.}$$

Область применения вентильных двигателей охватывает широкий круг приборов: от приборов бытовой техники с мощностью в единицы ватт до двигателей электромобилей с мощностью в десятки киловатт. Поэтому исследование вентильных двигателей является актуальной задачей в настоящее время.

Область применения вентильных двигателей охватывает широкий круг приборов: от приборов бытовой техники с мощностью в единицы ватт до двигателей электромобилей с мощностью в десятки киловатт.

Таблица № 3.5 - Параметры основных типов колебательных электроприводов

Сферы применения		Виды операций
Машиностроение	Сборочное производство	Транспортировка заготовок
	Металлообрабатывающее производство	Вибрационное гашение колебаний
		Вибросверление
		Виброфрезерование
		Виброточение
		Виброшлифование
		Вибронакалка
Металлургия	Литейное производство	Вибролитье заготовок
		Вибрационная очистка литейных форм
	Электрошлаковый переплав	Плавление металла с вибрацией электродов
	Порошковая металлургия	Получение порошков с применением вибрации
Перерабатывающая промышленность	Переработка отходов	Вибрационное измельчение металлов и пластмасс
		Вибрационное измельчение хрупких металлов
Сельское хозяйство	Производство кормов	Измельчение с колебаниями ножей
Строительство	Производство строительных материалов	Сегрегация

Дальнейшее развитие производства, при котором применяют новое оборудование, которое позволяет обеспечить рост производства, повышение качества выпускаемой продукции в различных областях современной промышленности, использующих вибрационные технологические операции, требуют широкого и целенаправленного использования колебательного режима работы электропривода;

### **Заключение**

На основании проведенного анализа можно сделать следующие основные выводы, характеризующие современное состояние вопроса разработки, исследования, создания и применения колебательных электроприводов, а также определяющие цель и задачи работы:

- Дальнейшее развитие производства, при котором применяют новое оборудование, которое позволяет обеспечить рост производства, повышение качества выпускаемой продукции в различных областях современной промышленности, использующих вибрационные технологические операции, требуют широкого и целенаправленного использования колебательного режима работы электропривода;
- Построение энергоэффективных управляемых электроприводов колебательного движения на базе специализированных электрических двигателей, режим колебательной работы которых возбуждается с помощью мягкого периодического реверса с линейной фазовой модуляцией, а регулирование собственной частоты и стабилизация параметров колебаний осуществляется за счет введения дополнительных электрических сил;
- Наиболее эффективным направлением повышения энергетических характеристик колебательного электропривода является обеспечение колебательного режима его работы. Режим резонансной работы можно получить при введении в систему колебательного движения

позиционной нагрузки в виде гидравлических, механических, а также пневматических упругих связей.

Изложенное обуславливает необходимость изучить влияния параметров нагрузки на выходные характеристики колебательного электропривода, оценить динамические характеристики вентильного электропривода колебательного движения, а также оценить возможность построения вентильных электроприводов с регулируемой собственной частотой. Все сказанное и является целью настоящей магистерской диссертации.

Параметры электропривода будут зависеть от характера нагрузки. Так к примеру, с увеличением демпфирующей нагрузки происходит снижение амплитуды координат движения. Опыт показал, что, увеличив демпфирующую нагрузку до 0.8, амплитуда координат движения уменьшилась в 1.25. Такое небольшое различие объясняется небольшим диапазоном изменения демпфирующей нагрузки, что в свою очередь не очень критично. При более значительном увеличении демпфирующей нагрузки, а именно в сотни или тысячи раз, амплитуда колебаний также может уменьшиться в десятки раз. В то время как при помощи инерционной нагрузки электропривода можно добиться стабильного изменения скорости. Инерционная нагрузка требует от двигателя больших моментов на разгон и торможение, ограничивая тем самым максимальное ускорение. Отсюда можно сделать вывод, что электропривод более критичен к изменениям демпфирующей нагрузки. Влияние позиционной нагрузки будет рассмотрено в разделе с амплитудно - частотными характеристиками.