

**МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ**

Федеральное государственное автономное образовательное учреждение
высшего образования

**«ЮЖНО-УРАЛЬСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ
(НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ)»**

Факультет электротехнический

Кафедра автоматики

Направление подготовки 27.03.04 «Управление в технических системах»

ДОПУСТИТЬ К ЗАЩИТЕ

Заведующий кафедрой

Голошапов С.С.

20__ г.

ВЫБОР СПОСОБА УПРАВЛЕНИЯ ТОРЦЕВЫМ ВЕНТЕЛЬНЫМ ДВИГАТЕЛЕМ

ПОЯСНИТЕЛЬНАЯ ЗАПИСКА
К ВЫПУСКНОЙ КВАЛИФИКАЦИОННОЙ РАБОТЕ
ЮУрГУ–27.03.04.2020.095.24.00 ПЗ ВКР

Автор ВКР

студент группы МиЭт-424

/ Москаленко Д.В.

подпись

ФИО

20__ г.

Руководитель работы

д.т.н. профессор кафедры

должность

/Белугин В.Б.

подпись

ФИО

20__ г.

Консультант

ведущий конструктор

должность

/Румянцев В.А.

подпись

ФИО

20__ г.

Нормоконтроль

старший преподаватель

должность

/Елисеев В.П.

подпись

ФИО

20__ г.

Миасс 2020

Аннотация

Москаленко Д.В. Выбор способа управления торцевым вентильным двигателем. Миасс: ЮУрГУ, Автоматика, 2020г., 65 стр. 9 ил., библиографический список – 12 наименований, 1 приложение.

В данной работе проведены расчёт обмоточных данных, расчёт рабочей и сигнальной обмотки статора, расчёт характеристик двигателя, расчёт энергетических характеристик ДБ.

Для расчётов использовалось программное обеспечение Mathcad.

В результате проделанной работы была создана 3D-модель статора и ротора данного двигателя в программе «Компас 3D».

					27.03.04.095.24.00 ПЗ			
<i>Изм.</i>	<i>Лист</i>	<i>№ докум.</i>	<i>Подп.</i>	<i>Дата</i>				
<i>Разраб.</i>		<i>Москаленко Д.В.</i>			<i>Выбор способа управления торцевым вентильным двигателем</i>	<i>Лит.</i>	<i>Лист</i>	<i>Листов</i>
<i>Провер.</i>		<i>Румянцев В.А.</i>					<i>3</i>	<i>65</i>
<i>Н. контр.</i>		<i>Елисеев</i>				ЮУрГУ Кафедра «Автоматика»		
<i>Утверд.</i>		<i>Голощанов</i>						

СОДЕРЖАНИЕ

Список принятых сокращений.....	6
Введение	8
1 Обзор устройств динамически настраиваемых гироскопов	11
1.1 Устройство динамически настраиваемого гироскопа ..	11
1.2 Устройство, особенности и область применения миниатюрных динамически настраиваемых гироскопов ..	17
2 Анализ технического задания	20
2.1 Электроприводы.....	20
2.2 Электродвигатель постоянного тока	22
2.3 Структурная схема вентильного привода с управлением по ЭДС.....	24
3 Выбор и обоснование выбора конструкции.....	27
4 Способ управления	30
5 Способ коммутации обмоток двигателя.....	35
6 Датчик положения ротора	42
7 Датчик угловой скорости	47
8 Расчет торцевого двигателя М-ДНГ	48
9 Расчет обмоточных данных.....	53
10 Расчет рабочей обмотки статора.....	55
11 Расчет сигнальной обмотки статора	57
12 Расчет характеристик двигателя	60
13 Расчет энергетических характеристик ДБ.....	61
Заключение.....	63

					27.03.04.095.24.00 ПЗ ВКР	Лист
						4
Изм.	Лист	№ докум.	Подп.	Дата		

Библиографический список.....	64
Приложение А. 3D-модель статора и ротора	66

					27.03.04.095.24.00 ПЗ ВКР	<i>Лист</i>
						5
<i>Изм.</i>	<i>Лист</i>	<i>№ докум.</i>	<i>Подп.</i>	<i>Дата</i>		

Список принятых сокращений

ДНГ – динамически настраиваемый гироскоп;

ДБ – бесконтактный двигатель;

ДМ – датчика момента;

ДУ – датчик угла;

ДС – датчик скорости;

ГД – гистерезисный двигатель;

Д – двигатель – преобразует электрическую энергию в механическую;

И – инвертор – преобразователь электрической энергии источника питания (ИП) в электрическую энергию переменного тока;

БУ – блок управления;

СС – стабилизатор скорости;

ДМ – датчик мощности – элемент, обеспечивающий измерение активной мощности, потребляемой двигателем;

РМ – регулятор мощности;

ЗС – задатчик скорости;

ЗМ – задатчик мощности;

ЗТ – задатчик тока;

ОТ – ограничитель тока;

ИП – источник питания постоянного тока;

ФСС – формирователь сигналов скорости;

					27.03.04.095.24.00 ПЗ ВКР	Лист
						6
Изм.	Лист	№ докум.	Подп.	Дата		

ФСП – формирователь сигналов положения;

УЗ – устройство запуска;

ЭДС - электродвижущая сила;

КПД – коэффициент полезного действия;

ДУС – датчик угловой скорости;

ДПР – датчик положения ротора;

ВП – вентильный привод;

ЧЭ – чувствительный элемент;

ИДУ – индуктивный датчик угла;

ГДУ – генераторный датчик угла;

ГД – генераторный датчик;

ДС – датчик скорости;

ШИМ – широтно-импульсная модуляция;

ВД – вентильный двигатель;

					27.03.04.095.24.00 ПЗ ВКР	Лист
						7
Изм.	Лист	№ докум.	Подп.	Дата		

Введение

Развитие точных гироскопов в нашей стране началось с 1950 года под влиянием требований воздушной и морской навигации. В таких системах гироскоп или блок гироскопов применяется для обнаружения небольших угловых отклонений от постоянного или желаемого направлений платформы, установленной в кардановом подвесе, на которой устанавливается блок. Электрические сигналы, генерируемые соответствующими датчиками, затем используются для приложения поправочных вращающих моментов к платформе. Таким образом, стабилизированная платформа определяет систему координат, имеющую известную ориентацию относительно земли. Чувствительные акселерометры, так же устанавливаемые на платформе, измеряют ускорение носителя в этой известной системе носителя в координатах Земли. Хотя научные принципы интегральной навигации просты, инженерные проблемы достижения желаемой точности трудны. В частности, гироскопы, от которых абсолютно зависят угловые отсчеты, должны быть очень высокого качества. Если, например, требуется навигационная точность 0,1% и все другие компоненты представляются идеальными, гироскоп не должен иметь уход от его заданной величины не более чем на $0,05^\circ/\text{ч}$ если скорость летательного аппарата 10^3 км/ч, или не более чем $0,001^\circ/\text{ч}$, если скорость корабля 20 км/ч. Такие характеристика предъявляют высокие требования к конструкции и точности при их изготовлении. Неизбежно, это означает, что стоимость этих приборов высокая, и поэтому широко распространен интерес к разработке конструкций, которые предполагают наиболее упрощенный процесс изготовления.

Развитие новых конструкций, известных как динамически настраиваемые гироскопы, началось в середине 60-х годов и сейчас достигло широкого

					27.03.04.095.24.00 ПЗ ВКР	Лист
						8
Изм.	Лист	№ докум.	Подп.	Дата		

распространения. В это время и был обнаружен эффект динамической настройки вращающейся упругомассовой системы, он сводится к превращению достаточно жесткого в статике упругого подвеса за счет вращения с определенной скоростью в практически безмоментный, чуть ли не идеальный шарнир. Куда же девается его жесткость? Каковы условия возникновения такого эффекта? Как реагирует динамически настраиваемая система на разного рода внешние возмущения? Какие возможны разновидности подобных систем и по какому принципу их лучше классифицировать? Эти и многие другие вопросы встали перед механиками, когда инженеры обнаружили эффект динамической настройки и предложили использовать его для создания высокоточных гироскопов с упругим подвесом маховика на валу приводного двигателя, отвечавших многим насущным запросом практики. Так возникло новое направление не только в гироскопической технике, но и в теории гироскопов как ветви классической механики. С достаточной для практики полнотой были решены многие вопросы механики отдельных разновидностей ДНГ.

В настоящее время у ведущих гироскопических фирм присутствует направление миниатюрных ДНГ. Внимание к этому направлению можно объяснить некоторым рядом их качеств, которые позволяют мини и ДНГ конкурировать с волоконно-оптическими гироскопами и находить применение в ДУС и бесплатформенных системах средней точности, предназначенных для широкого круга маневренных объектов.

Так как гироскоп является достаточно точным прибором, ему необходимы надежные и точные узлы для получения идеальных характеристик, к ним относится и двигатель.

Бесконтактные двигатели постоянного тока наиболее полно удовлетворяют совокупности требований, которые предъявляются к управляемым двигателям

					27.03.04.095.24.00 ПЗ ВКР	<i>Лист</i>
						9
<i>Изм.</i>	<i>Лист</i>	<i>№ докум.</i>	<i>Подп.</i>	<i>Дата</i>		

систем автоматики в отношении электромеханических и энергетических характеристик, массогабаритных показателей, надежности и диапазона частот вращения в пределах от единиц до сотен тысяч оборотов в минуту. Главным преимуществом бесконтактного двигателя постоянного тока перед возможной альтернативой – гистерезисным двигателем с перевозбуждением, является стабильность магнитных свойств активной части ротора. Кроме того, бесконтактные двигателя постоянного тока могут быть выполнены с немагнитным статором и иметь минимум электромагнитных взаимодействий между статором и ротором, что обеспечивает минимум возможных вибрационных возмущений на чувствительный элемент.

К настоящему времени накоплен большой опыт проектирования бесконтактных двигателей постоянного тока, опубликовано множество статей и ряд монографий, в которых изложены теория, принципы построения и расчеты двигателей.

					27.03.04.095.24.00 ПЗ ВКР	<i>Лист</i>
						10
<i>Изм.</i>	<i>Лист</i>	<i>№ докум.</i>	<i>Подп.</i>	<i>Дата</i>		

1 Обзор устройств динамически настраиваемых гироскопов

1.1 Устройство динамически настраиваемого гироскопа

Прибор состоит из следующих основных элементов ротора, валика, трансформаторов, датчика момента, двигателя, подшипников, корпуса крышки, блока усилителей.

Ротор гироскопа представляет собой монолитную деталь из термостабильного материала, содержащую массивное наружное кольцо – маховик (носитель кинетической энергии), внутреннее кольцо, напрессованное на валик и закрепленное на нем гайкой, и два одинаковых промежуточных кардановых кольца, каждое из которых одной парой упругих элементов – торсионов соединено с наружным кольцом, другой парой – с внутренним кольцом. Оси каждой пары торсионов, принадлежащих одному карданову кольцу, взаимноперпендикулярны. Конструктивно каждый торсион представляет собой перемычку прямоугольного сечения, образованную двумя близлежащими цилиндрическими отверстиями, оси которых параллельны оси вращения ротора. Торсион имеет малую угловую жесткость на кручение и относительно большую жесткость на изгиб и сжатие – растяжение. [1] Жесткостные параметры подвеса подбираются из условия динамической настройки гироскопа, требований прочности и равножесткости. Гайка крепления ротора на валик одновременно является упором, ограничивающим угловые отклонения ротора. Валик с закрепленным на нем ротором двигателя содержит цилиндрический упор, ограничивающий угловое отклонение ротора, и ротор молекулярного насоса, представляющий собой гладкую цилиндрическую поверхность с нарезанной винтовой канавкой прямоугольного сечения. Валик вращается в скоростных шарикоподшипниках. Наружные кольца подшипников установлены в корпус и крышку, а внутренние – на

					27.03.04.095.24.00 ПЗ ВКР	Лист
						11
Изм.	Лист	№ докум.	Подп.	Дата		

шейках валика. Осевой натяг обеспечивается линейной деформацией упругих элементов корпуса и крышки путем подбора и доработки прокладки, установленной между крышкой и накладкой. Смазка подшипников выбрана из условий малой испаряемости в условиях вакуума и высокотемпературного (+120°C) обезгаживания прибора, а также обеспечения необходимого ресурса работы прибора. Динамическая балансировка ротора и всего вращающегося узла, в целом, осуществляется удалением металла в кольцевых канавках на роторе, валике, гайке. Валик приводится во вращение бесконтактным магнитоэлектрическим двигателем. [1]

Двигатель состоит из статора и ротора. Статор выполнен в виде шихтованного пакета из пластин. Статор установлен во втулке, которая крепится винтами к корпусу. Для уменьшения влияния электромагнитных полей двигателя на ротор во втулке установлен экран, закреплены с помощью лазерной сварки. Одновременно экран ограничивает осевое перемещение статора двигателя. Ротор двигателя – кольцевой постоянный магнит с одной парой полюсов, установлен на валике и закреплен от осевого смещения развальцовкой. Для экранирования полей рассеивания на торцах магнита установлены экраны, отделенные от магнита немагнитными прокладками. Управление гироскопом в режимах приведения гиросtabilизированной платформы, а также электрического арретирования гироскопа по «избыточной» измерительной оси в составе платформы осуществляется с помощью датчика момента. ДМ состоит из четырех одинаковых башмаков (с обмотками), установленных на общем немагнитном основании по двум взаимно перпендикулярным осям. Датчик работает по принципу клапанного электромагнита, якорем которого является ротор гироскопа. ДМ с помощью винтов установлен на крышке. Зазор между статором ДМ и ротором обеспечивается подбором или доработкой прокладок, установленных между крышкой и датчиком. [1]

					27.03.04.095.24.00 ПЗ ВКР	Лист
						12
Изм.	Лист	№ докум.	Подп.	Дата		

Система съема выходной информации об угловом отклонении ротора гироскопа содержит двухкоординатный емкостный датчик угла (ДУ) и блок усилителей. ДУ предназначен для преобразования угловых перемещений ротора гироскопа по двум ортогональным осям чувствительности в электрический сигнал. ДУ состоит из дифференциального конденсатора, образованного платой и ротором гироскопа, и двух измерительных трансформаторов, первичные обмотки которых образуют с рабочими емкостями резонансные контуры. Дифференциальная схема позволяет обеспечить нечувствительность датчика к линейным перемещениям ротора гироскопа, вызванным механическими возмущениями. Принцип действия емкостного ДУ основан на регистрации изменений рабочих емкостей дифференциального конденсатора при угловых отклонениях ротора гироскопа и последующем преобразовании этих изменений в электрические сигналы, которые снимаются с выходных обмоток трансформатора. Плата представляется собой пластину из керамики, на торцах которой имеются четыре металлизированные площадки, являющиеся одной из обкладок дифференциального конденсатора. Второй обкладкой конденсатора является поверхность ротора. Трансформатор выполнен на кольцевом ферритовом сердечнике, на который намотаны две обмотки: первичная и вторичная. Концы первичной обмотки соединены через гермовыводы, установленные в корпусе прибора, с диаметрально расположенными металлизированными площадками платы. Вторичная обмотка соединена со входом блока усилителей. Сердечник с обмотками залит компаундом в керамический корпус, который играет роль конденсатора, предназначенного для выставки нулевого сигнала ДУ. [2]

Выставка нулевого сигнала датчика осуществляется путем удаления части металлизированного слоя на наружной цилиндрической поверхности керамического корпуса трансформатора. Трансформаторы установлены на корпусе прибора с помощью кронштейнов. Для повышения влагостойкости на

					27.03.04.095.24.00 ПЗ ВКР	<i>Лист</i>
						13
<i>Изм.</i>	<i>Лист</i>	<i>№ докум.</i>	<i>Подп.</i>	<i>Дата</i>		

трансформаторы и монтажные провода, соединяющие их с гермовыводами корпуса, наносится влагозащитное покрытие – лак УР-231.

Питание ДУ осуществляется от источника переменного тока. Блок усилителей предназначен для усиления и преобразования сигналов переменного тока с двух-координатного емкостного ДУ в постоянное напряжение с учетом фазы выходных сигналов. Блок усилителя состоит из двух одинаковых усилителей (двух тактов усиления), выполненных в виде бескопусных микросборок, и опорного трансформатора, помещенных в общий герметичный корпус. Трансформатор обеспечивая ДУ в каждом канале опорным напряжением и выполнен на малогабаритном ферритовом сердечнике. Блок усилителя крепиться с помощью двух накладок к крышке винтами. Параматеры блока усилителя (крутизна и нулевой сигнал по каждому тракту) регулируются подбором резисторов, установленных на плате, закрепленной на корпусе прибора. [2]

Корпус выполняется, как правило, из стали. К корпусу с помощью винтов и штифтов крепиться крышка, также выполненная из стали. С целью обеспечения высокой точности монтажа подшипников отверстия для их установки в корпусе и крышке выполняются с одной установки. Для установки прибора в изделие на корпусе предусматривается посадочное отверстие и опорный фланец, в котором выполняются установочные пазы, связанные с осями ДУ и ДМ.

Герметичность в соединении корпуса с колпаком и крышкой осуществляется лазерной сваркой. Герметизация внутренней полости прибора осуществляется с помощью медного штенгеля, впаянного в колпак. Электрическая связь между элементами, установленными во внутренней полости прибора, и изделием осуществляется через гермовыводы, впаянные в корпус и колпак.

					27.03.04.095.24.00 ПЗ ВКР	Лист
						14
Изм.	Лист	№ докум.	Подп.	Дата		

Для обеспечения минимального демпфирования ротора гироскопа внутренняя полость прибора вакуумирована, сведено к минимуму применение материалов с повышенным газоотделением (лаков, красок, клеев и др.), предусмотрено стопорение винтов лучом лазера, длительное температурное обезгаживание деталей, сборочных единиц и собранного прибора перед герметизацией. Кроме того, в конструкции прибора применяется молекулярный насос, осуществляющий откачку молекул остаточного газа из полости ротора гироскопа в полость двигателя.

Молекулярный насос образован гладкой цилиндрической поверхностью корпуса и цилиндрической поверхностью валика с нарезанной на ней винтовой канавкой прямоугольного сечения. Радиальный зазор между статором и ротором молекулярного насоса обеспечивается изготовлением валика по действительному значению диаметра отверстия корпуса. При вращении валика молекулы газов захватываются винтовой канавкой и переносятся из полости ротора гироскопа в полость приводного двигателя, в результате чего в области ротора создается более глубокий вакуум.

Для того, чтобы улучшить условия перераспределения газа между этими полостями, на корпусе устанавливается коробка, соединенная с корпусом в зоне приводного двигателя трубкой. Коробка играет роль резервуара, увеличивающего объем полости прибора. С целью расширения области эффективной работы молекулярного насоса в сторону большего давления остаточного газа во внутренней полости прибора винтовая канавка насоса имеет переменную глубину вдоль оси валика.

Электромонтаж прибора заканчивается клеймённой платой, закрепляющейся на корпусе прибора. Для экранирования прибора от внешних магнитных полей предусматривается экран, закрепленный при помощи клея на корпусе.

					27.03.04.095.24.00 ПЗ ВКР	<i>Лист</i>
						15
<i>Изм.</i>	<i>Лист</i>	<i>№ докум.</i>	<i>Подп.</i>	<i>Дата</i>		

С целью защиты от коррозии и увеличения теплоотдачи наружная поверхность прибора, кроме установочных поверхностей, покрывается черной эмалью.

Принцип действия динамически настраиваемого гироскопа заключается в следующем: двигатель приводит во вращение вал, на котором с помощью упругого подвеса установлено кольцо, связанное упругим подвесом с ротором.

При достижении ротором гироскопа определенной частоты вращения происходит компенсация упругих моментов подвеса моментами гироскопических сил. Другими словами, при достижении маховиком чувствительного элемента частоты вращения, совпадающей с собственной частотой колебаний, то есть вхождение в резонанс, и ротор приобретает свойства свободного гироскопа без вредных моментов по осям подвеса. В этом заключается суть динамической настройки гироскопа.

При динамической настройке прибора можно считать, что ось ротора гироскопа сохраняет свое положение в инерциальном пространстве неизменным. Тогда измеряя угловое положение ротора относительно корпуса прибора в плоскости вокруг осей, получают с помощью датчиков углов и информацию об углах поворота корпуса, на котором установлен ДНГ. Углы отклонения ротора малы, обычно не более нескольких угловых минут. Датчики момента используются для управления гироскопом. В зависимости от количества кардановых колец различают однокольцевые, двухкольцевые и n-кольцевые гироскопы. Дополнительные кольца уменьшают погрешности прибора. Соединение колец подвесов осуществляется последовательно или параллельно. Схема с параллельным соединением находит более широкое применение.

					27.03.04.095.24.00 ПЗ ВКР	Лист
						16
Изм.	Лист	№ докум.	Подп.	Дата		

Динамически настраиваемый гироскоп может также работать в режиме датчика угловой скорости (ДУС). ДУС предназначен для выдачи сигнала об угловой скорости вращения объекта.

При изменении положения ротора гироскопа относительно положения платформы с ДУ подается сигнал пропорционально этому отклонению. Этот сигнал усиливается и подается на соответствующую обмотку датчика момента (ДМ). ДМ возвращает ротор в исходное положение. По току в обмотке ДМ можно судить о скорости вращения объекта.

1.2 Устройство, особенности и область применения миниатюрных динамически настраиваемых гироскопов

Возникновение миниатюрных ДНГ можно отнести к 80-м годам. В настоящее же время данное направление присутствует у многих гироскопических фирм. Внимание к этому направлению можно объяснить совокупностью характеристик миниатюрных ДНГ, среди которых разработчики называют следующие:

- большой диапазон измеряемых угловых скоростей в сочетании с достаточно высокими точностными характеристиками и ресурсом;
- высокая стабильность и линейность выходной характеристики;
- широкий частотный динамический диапазон и низкий уровень шума;
- малое время готовности;
- измерение угловых скоростей одновременно по двум осям;
- высокая стойкость к механическим воздействиям, широкий рабочий температурный диапазон;
- низкая стоимость при высоком уровне производства.

					27.03.04.095.24.00 ПЗ ВКР	Лист
						17
Изм.	Лист	№ докум.	Подп.	Дата		

Все эти качества в настоящее время позволяют мини ДНГ конкурировать с волоконно-оптическими гироскопами и находить применение в ДУС и бесплатформенных системах средней точности, предназначенных для широкого круга маневренных объектов.

Динамически настраиваемый гироскоп является ЧЭ ДУС, поэтому измерительный диапазон во многом определяет область их применения. Обычно приводятся для характеристики измерительного диапазона – для постоянно действующей угловой скорости и кратковременно. Измерительный диапазон ДНГ, работающего в режиме ДУС, определяется максимально развиваемым моментом датчика момента и кинетическим моментом гироскопа. ДНГ имеют магнитоэлектрические датчики момента ДМ. Их достоинством является высокая линейность и стабильность моментной характеристики, высокие энергетические показатели, отсутствие намагничивающих явлений, приводящих к изменению магнитных притяжений ротора к статору ДМ. К недостатку можно отнести высокую нестабильность положения центра масс ротора, обусловленную его сборной конструкцией и максимальным током, который может выдержать обмотка статора, что в свою очередь определяется теплоотводящими качествами конструкции статора ДМ. На теплоотвод также влияет давление газа во внутренней полости.

В качестве приводного двигателя в основном применяется синхронный гистерезисный двигатель. Приборы имеют малое время разгона: от 0,65с. до 10с. В большинстве своем все мини ДНГ имеют шарикоподшипники по главной оси гироскопа, но также встречаются и с газодинамической опорой. Датчики угла в основном применяются индуктивные, но встречаются и генераторные. Сравнение точностных параметров приборов с индуктивными ДУ и приборов с генераторным ДУ не обнаруживает каких-либо явных преимуществ одного вида съема информации перед другим. Преимущество

					27.03.04.095.24.00 ПЗ ВКР	Лист
						18
Изм.	Лист	№ докум.	Подп.	Дата		

ИДУ может проявиться при воздействии вибрации, так как ИДУ, в отличие от ГДУ, имеют несущую частоту, значительно превышающую частоты вибрационных перегрузок. С целью повышения виброустойчивости при модернизации прибора с ГДУ предусматривается повышение частоты вращения ротора гироскопа, что повышает несущую частоту ДУ и выводит ее за пределы частот вибрации основания.

Корпус ДНГ, как правило, выполняется из магнитомягкого материала, обеспечивающего защиту от внешних магнитных полей. Крепление приборов фланцевое, угловая фиксация корпуса осуществляется при помощи базирующих пазов, прорезанных во фланце. Ось пазов проходит через главную ось прибора. Исключение составляют приборы, базирующиеся по одной из граней фланца.

Температурный диапазон применения мини ДНГ широк: от минус 60 до +85°С и даже +150°С. Столь высокая эксплуатационная температура, возможно, обусловлена применением данного прибора при бурении нефтяных скважин. В состав некоторых приборов входят нагреватели, расположенные на колпаках, что снимает проблему обеспечения функционирования при низких температурах.

Миниатюрные ДНГ применяются на широком круге объектов – от бурения скважин до стабилизации спутников, а также в автомобилях, ракетах, самолетах, вертолетах и др. На базе миниатюрные ДНГ изготавливают инерциальные блоки, бесплатформенные инерциальные системы, курсовертикали, стабилизаторы, датчики угловой скорости систем управления и другое.

					27.03.04.095.24.00 ПЗ ВКР	<i>Лист</i>
						19
<i>Изм.</i>	<i>Лист</i>	<i>№ докум.</i>	<i>Подп.</i>	<i>Дата</i>		

2 Анализ технического задания

2.1 Электроприводы

В качестве электроприводов гироскопов используется большое количество разнообразных электрических машин, которые имеют различное назначение, а также принцип работы и конструкцию.

Асинхронный электродвигатель – электрическая асинхронная машина для преобразования электрической энергии в механическую. Принцип работы асинхронного электродвигателя основан на взаимодействии вращающегося магнитного поля, возникающего при прохождении трехфазного переменного тока по обмоткам статора, с током, индуктированным полем статора в обмотках ротора, в результате чего возникают механические усилия, заставляющие ротор вращаться в сторону вращения магнитного поля при условии, что частота вращения ротора n меньше частоты вращения поля, ротор совершает асинхронное вращение по отношению к полю. Некоторые виды асинхронных двигателей разрабатываются и выпускаются комплектно с блоками управления и пускозащитной аппаратурой, с встроенными редукторами. Трехфазные асинхронные электродвигатели сравнительно с однофазными обладают лучшими пусковыми и рабочими характеристиками. [3]

Гистерезисное преобразование энергии в отличие от любого другого электромеханического преобразования является универсальным, т.е. синхронно асинхронным. В асинхронном режиме оно, как и индукционное преобразование, имеет необходимым условием потери скольжения в подвижном элементе. Однако здесь потери скольжения пропорциональны лишь первой степени частоты, а не второй, как при индукционном преобразовании. Этим фактором обусловлены главным образом особенности характеристик гистерезисного преобразователя в асинхронном режиме.

					27.03.04.095.24.00 ПЗ ВКР	Лист
						20
Изм.	Лист	№ докум.	Подп.	Дата		

В отличие от магнитоэлектрического преобразования энергии здесь допускается перемещение намагниченности подвижного элемента относительно его геометрических осей (пространственное перемагничивание). Эта особенность не позволяет распространять на синхронный режим общие закономерности магнитоэлектрического преобразования. [3]

По сравнению с электромагнитным преобразованием отличие состоит в том, что проводимости подвижного элемента (ротора) по его геометрическим осям неоднозначны: они зависят от предыстории магнитного состояния ротора.

Эффект магнитного гистерезиса положен в основу работы гистерезисных электродвигателей.

В ГД вращающий момент возникает за счет гистерезиса при перемагничивании ротора из магнитно-твердого материала полем статора.

Достоинствами ГД по сравнению с другими электродвигателями переменного тока являются:

- наличие пускового момента, устойчивая работа в асинхронном режиме, автоматический вход в синхронизм, и работа в синхронном режиме;
- простота и надежность конструкции: нет вращающихся обмоток и конструктивных полюсов на роторе, материал активной части ротора обладает высокой механической прочностью, допускающей большие частоты вращения, и малыми температурными коэффициентами линейного и объемного расширения, обеспечивающими механическую прочность конструкции в широком диапазоне температур, принципиальная симметричность конструкции ротора облегчает балансировку и т.д.;

					27.03.04.095.24.00 ПЗ ВКР	<i>Лист</i>
						21
<i>Изм.</i>	<i>Лист</i>	<i>№ докум.</i>	<i>Подп.</i>	<i>Дата</i>		

- свойство поля синхронизма, т.е. способность одного и того же ротора работать в полях различной полюсности, что особенно важно в многоскоростном управляемом приводе;
- возможность регулирования характеристик ГД непосредственно по цепи питания путем воздействия на намагниченность ротора, что особенно важно при использовании ГД в групповом приводе.

2.2 Электродвигатель постоянного тока

Работа электропривода должна быть стабильна и постоянна, а это может обеспечить двигатель постоянного тока. Чего не могут обеспечить другие электроприводы, такие как синхронные, асинхронные и другие.

В настоящее время широкое применение находит вентильный электропривод постоянного тока, или кратко – вентильный привод (ВП).

Принцип действия двигателя постоянного тока основан на взаимодействии вращающегося поля статора и поля магнитов ротора. При таком взаимодействии на валу двигателя возникает необходимый вращающий момент. Управление двигателем осуществляется электронным блоком управления, который обеспечивает разгон и стабильное вращение двигателя с требуемой скоростью. [3]

Бесконтактные двигатели постоянного тока с возбуждением от постоянных магнитов (вентильные двигатели), входящие в состав ВП, привлекают уникальным сочетанием свойств коллекторных двигателей постоянного тока и двигателей переменного тока.

С одной стороны – это высокая кратность пускового момента, хорошие энергетические и регулировочные характеристики, с другой – отсутствие скользящих контактов, искрения, то есть, высокая надежность и долговечность.

					27.03.04.095.24.00 ПЗ ВКР	Лист
						22
Изм.	Лист	№ докум.	Подп.	Дата		

Применение ВП с дискретным управлением обеспечивает следующие преимущества, определяемые наличием обратной связи по положению ротора:

- Поддержание высоких энергетических характеристик во всех режимах работы;
- Поддержание высокой стабильности скорости вращения;
- Возможность получения информации о состоянии привода;
- Расширение функциональных возможностей привода.

Эти качества ВП представляют большой интерес с точки зрения использования его в гироскопических приборах и устройствах в связи с тем, что традиционные приводы на основе асинхронных и гистерезисных двигателей практически уже исчерпали свои возможности. Их дальнейшее совершенствование требует такого усложнения схем, что в части надежности и габаритно-массовых характеристик они будут уступать ВП. Кроме того, вентильные двигатели допускают множество конструктивных исполнений: с пазовым, беспазовым и диэлектрическим статором при различных конструкциях роторов. При этом конструкция вращения части гироскопического прибора может обеспечить большую стабильность размеров и центра масс ротора. [4]

Расширение использование дискретного ВП способствуют быстрое развитие электронной техники, в том числе микроэлектроники и, в частности, микропроцессоров.

Высокий КПД вентильных двигателей допускает применение компонентов электронных схем меньшей мощности по сравнению с другими типами электроприводов, что позволяет надеяться на снижение весов и габаритов схем управления вентильными двигателями и потребляемой

					27.03.04.095.24.00 ПЗ ВКР	Лист
						23
Изм.	Лист	№ докум.	Подп.	Дата		

мощности от первичных источников питания. Ввиду отсутствия потерь на возбуждение и систем постоянного магнита, перегрев машины значительно уменьшается, что ведет к упрощению вентиляции и в целом упрощению конструкции.

2.3 Структурная схема вентильного привода с управлением по ЭДС

Анализ структурных схем ВП с учетом их функционального и в отдельных случаях принципиального построения показывает, что выполнение требований технического задания возможно только в двух случаях:

- информация об угловом положении ротора с датчика положения ротора (ДПР) двигателя передается в блок управления (БУ) по силовым выводам;
- информация об угловом положении ротора формируется в электронной части привода по ЭДС обмоток двигателя.

Статический ДПР в любом случае усложняет конструкцию электрической машины, а в конечном итоге оказывает влияние на точностные характеристики прибора. Излучение влияния характеристик привода и конструктивной схемы. Изучение влияния характеристик привода и конструктивного исполнения его электромеханической части на точностные параметры прибора является самостоятельной и довольно сложной задачей. Решение этой задачи в большинстве случаев достигается применением наиболее простых конструктивных схем. С этой точной зрения ВП с магнитоэлектрической машиной отвечает этим требованиям в случае, если ДПР имеет минимальное количество элементов и не оказывает существенного влияния на энергетические массогабаритные характеристики двигателя. [4]

В настоящее время представляется перспективным выполнение ВП с управлением по ЭДС в этом случае структурная схема имеет вид,

					27.03.04.095.24.00 ПЗ ВКР	Лист
						24
Изм.	Лист	№ докум.	Подп.	Дата		

изображенный на рис 2.3.1. В этой схеме ДПР и датчик скорости (ДС) как элементы электромеханической части отсутствуют, а их функции выполняют электронные узлы ФСП - формирователь сигналов положения и ФСС - формирователь сигналов скорости. Такое разделение является условным, поскольку сигналы с ФСП могут быть использованы в качестве входных сигналов скорости (СС). В схему дополнительно введен функциональный элемент (УЗ), обеспечивающий первоначально необходимую скорость вращения при пуске двигателя, когда отсутствуют сигналы на выходе ФСП.

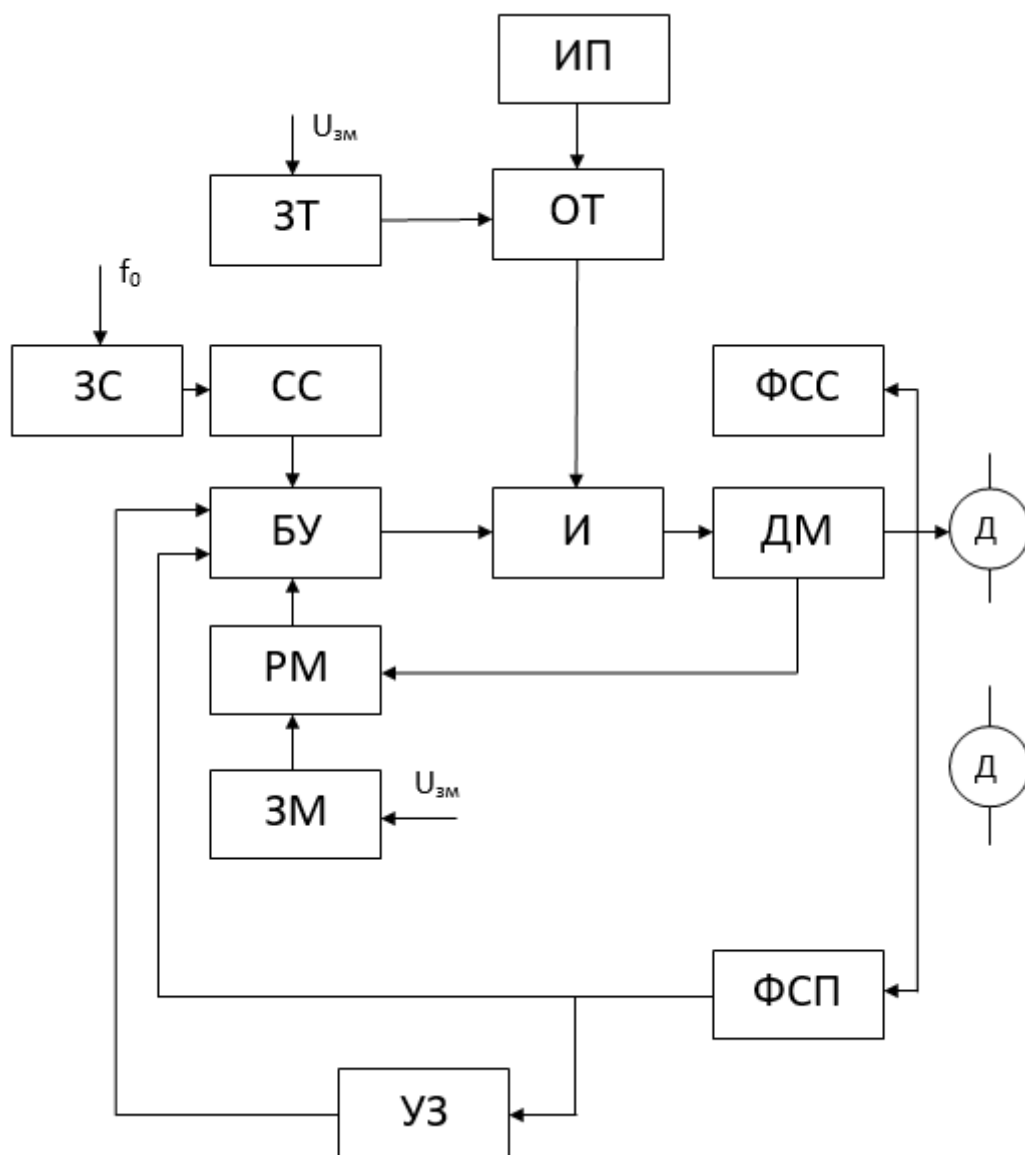


Рисунок 2.3.1 – Структурная схема вентильного привода

В соответствии с рисунком 2.3.1 можно выделить следующие элементы структурной схемы привода:

- двигатель (Д) – преобразует электрическую энергию в механическую;
- инвертор (И) – преобразователь электрической энергии источника питания (ИП) в электрическую энергию переменного тока;
- блок управления коммутатором (БУ);
- стабилизатор скорости (СС);
- датчик мощности (ДМ) – элемент, обеспечивающий измерение активной мощности, потребляемой двигателем;
- регулятор мощности (РМ);
- задатчик скорости (ЗС);
- задатчик мощности (ЗМ);
- задатчик тока (ЗТ);
- ограничитель тока (ОТ);
- источник питания постоянного тока (ИП);
- формирователь сигналов скорости (СС);
- формирователь сигналов положения (ФСР);
- устройство запуска (УЗ).

					27.03.04.095.24.00 ПЗ ВКР	Лист
						26
Изм.	Лист	№ докум.	Подп.	Дата		

3 Выбор и обоснование выбора конструкции двигателя

В настоящее время существует множество конструкций двигателей. В большинстве случаев используется так называемая «нормальная» конструкция. Это когда вращающаяся часть или ротор расположена внутри статора двигателя и на роторе расположены постоянные магниты.

В это же время существует и обращенная конструкция, это когда ротор, наоборот, расположен снаружи, а статор внутри. Магниты для возбуждения расположены на наружной обойме двигателя. Такие конструкции, как правило, имеют зубцовый пакет статора. Обмотка в таком случае укладывается в пазы. В то же время иногда для снижения пульсаций вращающегося момента используются и беспазовые обмотки, хотя в этом случае зачастую проигрывает в коэффициенте использования или КПД двигателя. Наряду с этим существуют и торцевые конструкции двигателя, в которых статор и ротор располагаются один подле другого на одной осевой линии. В этом случае становится удобным обмотку располагать в немагнитном зазоре. [5]

В гироскопии в связи со стремлением к уменьшению объемов приборов и повышению точностных характеристик такая конструктивная схема может оказаться предпочтительней. В этих условиях стали более ощутимы погрешности, обусловленные электроприводом гироскопа. Поэтому дальнейшее повышение точности и долговечности приборов во многом связано с совершенствованием электропривода.

При расположении обмотки статора в немагнитном зазоре уменьшается паразитная связь статора и ротора двигателя отсутствует гармоника поля, связанная с зубцовой зоной статора.

					27.03.04.095.24.00 ПЗ ВКР	Лист
						27
Изм.	Лист	№ докум.	Подп.	Дата		

Таким образом, в нашем случае для миниатюрных динамических настраиваемых гироскопов с целью повышения точностных характеристик конструкция электрической машины должна быть торцевой.

Кроме этого, немаловажное значение имеет простота конструкции. Магниты торцевого двигателя имеют форму цилиндров, что очень технологично. Что касается статора, то при заданной полюсности $2P=8$ и числе фаз $m=3$, обмотку удалось сделать однослойной с числом катушек $n=6$. При соответствующем соединении катушек геометрический сдвиг между фазами получим строго 120 электрических градусов.

При расположении статора и ротора на одной оси один подле другого неизбежно должно появиться осевое тяжение между включенными секциями обмотки и магнитами, что приведет к перекосам в подшипниках. С целью исключения такого недостатка можно применить двухроторную конструкцию. В этом случае статор должен располагаться внутри между двумя роторами, расположенными на одной оси и механически связанными между собой. При такой конструктивной схеме паразитное взаимодействие статора и роторов минимально.

Таким образом конструктивно двигатель состоит из одного статора и двух роторов.

Каждый ротор состоит из магнитопровода и восьми цилиндрических магнитов чередующейся полярности. Магниты роторов ориентированы друг против друга по направлению намагниченности. Поскольку в выбранной конструкции обмотка статора расположена на немагнитном каркасе, рабочий воздушный зазор имеет относительно большое значение. Требования к коэрцитивной силе магнитов при этом возрастает. [5]

					27.03.04.095.24.00 ПЗ ВКР	Лист
						28
Изм.	Лист	№ докум.	Подп.	Дата		

В настоящее время одним из лучших являются магниты на основе редкоземельных металлов. Коэрцитивная сила этих магнитов достигает 716 кА/м или магнитной индукции более 1Т., например магнитный материал КС25ДЦ третьей группы имеет коэрцитивную силу 676кА/м, а магнитную индукцию 1,01Т. При этом температурный коэффициент снижения индукции составляет 0,04%/°С. Для электродвигателей гироскопов это вполне достаточно.

Статор состоит из немагнитного каркаса, на котором закреплены шесть спиральных катушек. Катушки соединены таким образом, что образуют трехфазную обмотку с числом полюсов $2P=8$.

					27.03.04.095.24.00 ПЗ ВКР	<i>Лист</i>
						29
<i>Изм.</i>	<i>Лист</i>	<i>№ докум.</i>	<i>Подп.</i>	<i>Дата</i>		

4 Способ управления

Рассмотрим m -фазный вентильный двигатель, у которого взаимоиндукция и индуктивность обмоток пренебрежимо малы. Для поддержания стабильной скорости вращения среднее значение момента, развиваемого двигателем, должно быть равно нагрузочному моменту

$$\frac{1}{2\pi} \int_0^{2\pi} \sum_{i=1}^m \frac{U_i(\alpha) - e_i(\alpha)}{r_i} K_i(\alpha) \cdot d\alpha = M_H \quad (4.1)$$

Где α - угловая скорость

$U_i(\alpha)$ – напряжение управления на i -ой фазе;

$E_i(\alpha)$ – ЭДС i -ой фазы;

r_i – активное сопротивление обмотки;

$K_i(\alpha)$ – коэффициент пропорциональности между током и моментом i -ой фазы;

M_H момент нагрузки на валу двигателя при угловой скорости $\Omega = const$.

При работе от коммутатора, если $U_i(\alpha) = 0$, то $M_D = 0$, где M_D – момент двигателя.

Однако, если есть пути замыкания токов от ЭДС, то момент двигателя становится тормозным и равен:

$$M_D = - \frac{1}{2\pi} \int_0^{2\pi} \sum_{i=1}^m \frac{e_i(\alpha)}{R_{iy} + r_i} K_i(\alpha) \cdot d\alpha \quad (4.2)$$

где R_{iy} – суммарное активное сопротивление цепи, по которой замыкаются токи от ЭДС.

					27.03.04.095.24.00 ПЗ ВКР	Лист
						30
Изм.	Лист	№ докум.	Подп.	Дата		

Поскольку

$$e_i(\alpha) = -\frac{d\psi_i}{dt} = -\frac{d\psi_i}{d\alpha} \cdot \Omega \quad (4.3)$$

$$m_i(\alpha) = \frac{d\psi_i}{d\alpha} \cdot i_i(\alpha) = K_i(\alpha) \cdot i_i(\alpha) \quad (4.4)$$

где $m_i(\alpha)$ – момент i -ой фазы;

ψ – потокосцепление;

$i_i(\alpha)$ – мгновенное значение тока

то

$$e_i(\alpha) = K_i(\alpha) \cdot \Omega \quad (4.5)$$

Подставляя (4.5) в (4.1), получим

$$\frac{1}{2\pi\Omega} \int_0^{2\pi} \sum_{i=1}^m \frac{[U_i(\alpha) - e_i(\alpha)]}{r_i} e_i(\alpha) \cdot d\alpha = M_H \quad (4.6)$$

Выражение (4.6) позволяет проанализировать известные способы управления двигателем. К наиболее известным способам управления относятся линейные и широтно-импульсные. При линейных способах управление напряжением управления $U_i(\alpha)$ меняется по амплитуде таким образом, чтобы выполнялось условие (4.6). В этом случае допускаются режимы торможения путем смены знака разности подынтегрального выражения в соответствии с (4.2).

К достоинствам линейного управления можно отнести высокие регулировочные свойства и плавность хода. Недостатком способа является усложнение регулирующего элемента и в случае его работы в линейном режиме возникает проблема отвода тепла. Действительно, если напряжение

					27.03.04.095.24.00 ПЗ ВКР	Лист
						31
Изм.	Лист	№ докум.	Подп.	Дата		

питания ИП постоянно и равно U_n , то в случае $e_i(\alpha) < U_i(\alpha) \leq U_n$ и при токе в фазе $i_i(\alpha)$ регулирующим элементом выделяется энергия. [6]

$$W = \int_0^t [U_n - U_i(\alpha)] \cdot i_i(\alpha) \cdot dt \quad (2.7)$$

Наиболее широкое применение находят широтно-импульсные (ШИМ) способы управления. Суть этого способа состоит в том, что на двигатель в течении времени t_1 подается напряжение питания U_n в течении последующего промежутка времени t_2 двигатель отключается от источника. Интервал времени $t_1 + t_2$ остается неизменным и задается внешним генератором. Изменяя соотношение времени включения и выключения, получают тот или иной закон управления двигателем.

Следует отметить, что кажущееся исключение потерь на регулирующем элементе при ШИМ-управлении на самом деле приводит только к перераспределению потерь с регулирующего элемент на двигатель.

Покажем это на примере, когда $e_i(\alpha) = e = const, U_n > e, M_D = M_H$.

При линейном и ШИМ-управлениях

$$\frac{1}{d_1 \Omega} \int_0^{\alpha_1} \frac{U_D - e}{r} e \cdot d\alpha = \frac{1}{d_1 \Omega} \int_0^{\alpha_2} \frac{U_n - e}{r} e \cdot d\alpha \quad (4.8)$$

где α_1 -участок интегрирования;

U_D – напряжение на обмотке при линейном управлении;

α_2 – участок, на котором двигатель подключен к источнику U_n .

Для определения энергий, затрачиваемых в обоих случаях, раскроем выражение (4.8) и определим d_2 .

					27.03.04.095.24.00 ПЗ ВКР	Лист
						32
Изм.	Лист	№ докум.	Подп.	Дата		

$$\alpha_2 = \frac{U_D - e}{U_n - e} \cdot \alpha_1 \quad (4.9)$$

Тогда энергия, рассеиваемая в обмотке при линейном управлении

$$W_1 = \int_0^{t_1} i^2(t) \cdot r \cdot dt = \int_0^{d_1/\Omega} \frac{(U_D - e)^2}{r} \cdot dt = \frac{(U_D - e)^2}{r} \cdot \frac{\alpha_1}{\Omega} \quad (4.10)$$

и, соответственно, при ШИМ-управлении

$$W_2 = \int_0^{\frac{U_D - e \cdot d_1}{U_n - e \cdot \Omega}} \frac{(U_n - e)^2}{r} \cdot dt = \frac{(U_n - e)(U_D - e)\alpha_1}{r \cdot \Omega} \quad (4.11)$$

Разделив (4.11) на (4.10) с учетом (4.9), получим

$$\frac{W_2}{W_1} = \frac{U_n - e}{U_D - e} = \frac{\alpha_1}{\alpha_2} = \frac{t_1 + t_2}{t_1} \quad (4.12)$$

Из (4.12) следует, что если при работе двигателя в номинальном режиме скважность ШИМ (запас по моменту)

$$q = \frac{t_1 + t_2}{t_1} = 2 \quad (4.13)$$

то при таком управлении потери в меди будут в два раза выше, чем при линейном. При этом энергия, выделяемая на регулирующем элементе, работающем в линейном режиме

$$W_3 = \frac{(U_n - e)(U_D - e)}{r \cdot \Omega} \cdot \alpha = W_2 - W_1 \quad (4.14)$$

Таким образом, действительно происходит перераспределение потерь с регулирующего элемента при линейном управлении на двигатель при ШИМ-управлении.

					27.03.04.095.24.00 ПЗ ВКР	Лист
						33
Изм.	Лист	№ докум.	Подп.	Дата		

При работе регулирующего элемента в ключевом режиме потери W_3 исключаются.

					27.03.04.095.24.00 ПЗ ВКР	Лист
						34
Изм.	Лист	№ докум.	Подп.	Дата		

5 Способ коммутации обмоток двигателя

Проведенный анализ способов управления осуществляется при произвольной величине $e_i(\alpha)$. Вполне очевидно, что с точки зрения коэффициента полезного действия (КПД) не безразлично соотношение $U_D(\alpha)$ и $e_i(\alpha)$, которое задается электронным блоком двигателя. Известно большое количество способов коммутации обмоток двигателя. Все они могут быть разбиты на два больших класса. Первый из них линейный, когда обеспечивается линейная зависимость между $e_i(\alpha)$ при линейном управлении достигается наибольшая плавность хода за счет малых пульсаций электромагнитного момента. Однако, реализация этих способов затруднена и в скоростном приводе не получила широкого применения. Здесь следует отметить, что такой двигатель по принципу действия близок к синхронному двигателю.

Второй способ – дискретный. Суть этого способа в коммутации заключается в том, что подключение i -ой обмотки к регулируемому или нерегулируемому источнику питания производят на участках α , где обеспечивается максимальный КПД двигателя и выполняются требования по пуску и т.д. Проведем анализ способа коммутации обмоток двигателей, подчиняющихся (4.1), при форме характеристики $e_i(\alpha)$, близкой к трапецеидальной. Такие ограничения вполне оправданы и являются более благоприятными по КПД и другим параметрам вентильного двигателя. Параметры трапецеидальной зависимости $e_i(\alpha)$ представлены на рис 5.1.

					27.03.04.095.24.00 ПЗ ВКР	Лист
						35
Изм.	Лист	№ докум.	Подп.	Дата		

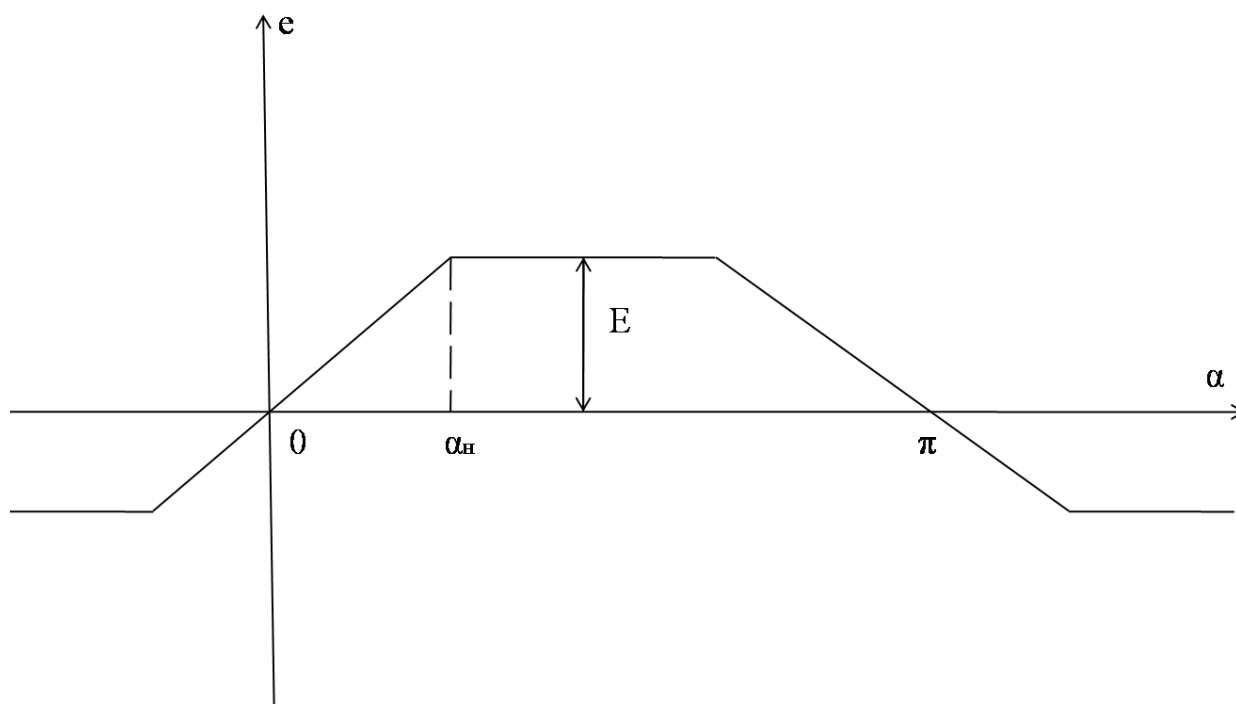


Рис 5.1 - Параметры трапецеидальной зависимости

Трапецеидальная характеристика вентильной машины не является чем-то исключительным. Зачастую проектирование двигателя для ВП с дискретной коммутацией приводит к получения таких характеристик, поскольку в данном случае требования по обеспечению синусоидальности характеристик снимается. [6]

Существенное влияние на выбор способа коммутации оказывает схема соединения обмоток двигателя. По способу соединения секций обмотки вентильных двигателей подразделяются на замкнутые и разомкнутые. Анализу подвергнем только наиболее широко применяемая разновидность разомкнутых обмоток - лучевые. Такое выбор диктуется, с одной стороны, количеством токоподводов с токовым симметрированием к двигателю и выбором датчика положения, а с другой стороны - характерным недостатком замкнутых обмоток,

					27.03.04.095.24.00 ПЗ ВКР	Лист
						36
Изм.	Лист	№ докум.	Подп.	Дата		

связанным с наличием дополнительных потерь от уравнивающих токов при трапецеидальном характере $e_i(\alpha)$.

По направлению тока через обмотки двигателя способы коммутации подразделяются на однополупериодные и двухполупериодные. При однополупериодной коммутации ток через обмотку двигателя от источника питания может протекать в каком-нибудь одном направлении, при двухполупериодной-в обоих направлениях.

По величине угла коммутационного интервала (α_k) дискретные способы коммутации обмоток подразделяются на 90-градусные, 180-градусные и т.д.

где $\alpha_k = \alpha_0 - \alpha_b$ – интервал по α между ближайшими переключениями одной обмотки,

α_0 – угол отключения обмотки от источника питания;

α_b – угол подключения.

Рассмотрим однополупериодную α – градусную коммутацию m - фазного двигателя. На рис 5.2 представлены эпюры напряжения, тока и момента для одной обмотки двигателя.

Моменты других фаз для симметричной лучевой обмотки могут быть получены путем последовательного сдвига m_i на угол $\frac{2\pi}{m}$. Как следует из рис. 5.2 при однополупериодной коммутации невозможно получить пусковой момент при любом α от двух обмоток даже при 180 – градусной коммутации. Для сравнения способов коммутации выведем зависимость момента и рассеиваемой обмоткой мощности от α_k и α_H .

					27.03.04.095.24.00 ПЗ ВКР	Лист
						37
Изм.	Лист	№ докум.	Подп.	Дата		

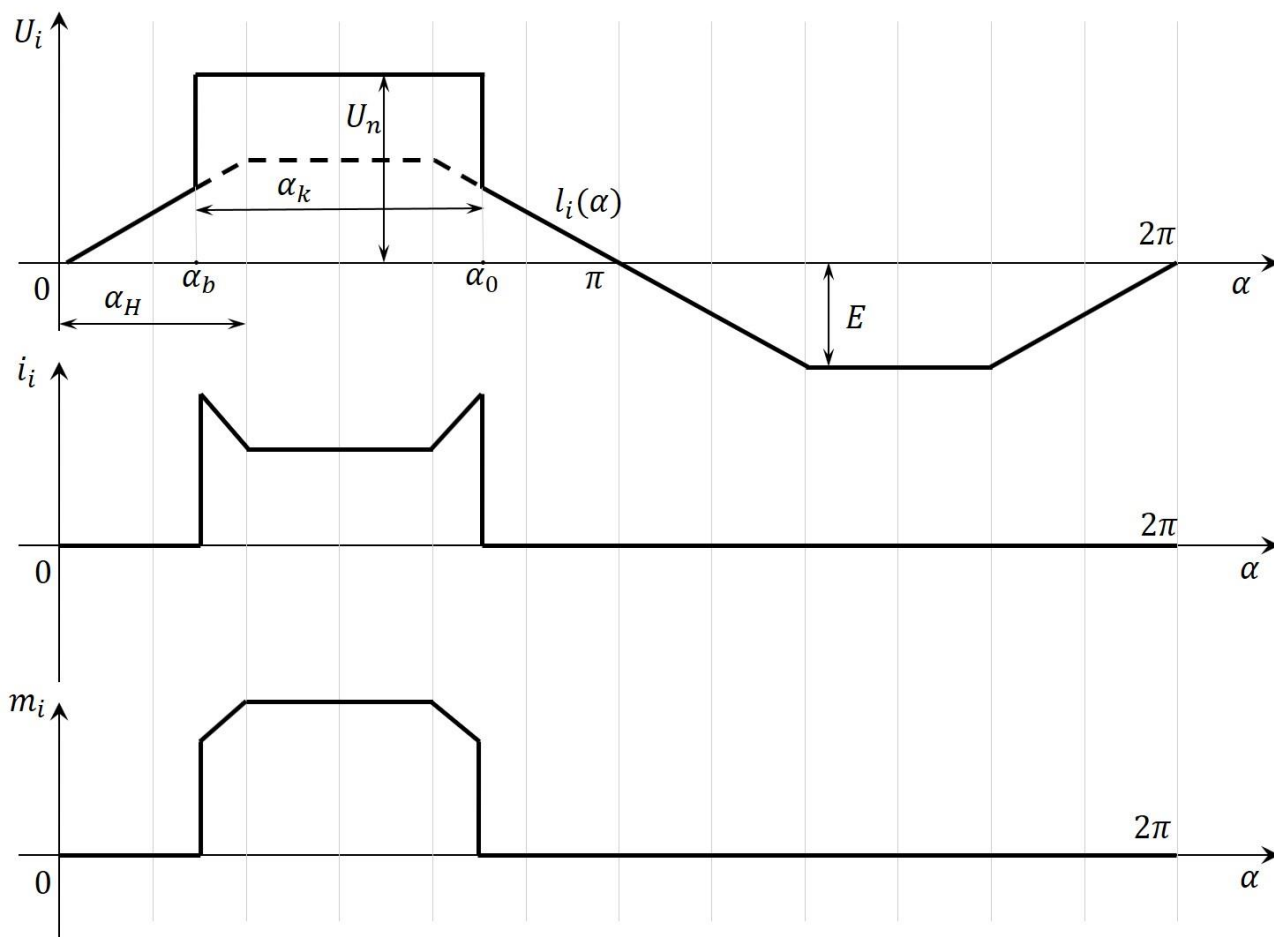


Рисунок 5.2

На наклонной части при $\alpha_b \leq \alpha \leq \alpha_H$

$$i_i(\alpha) = \frac{U_n - \frac{E}{\alpha_H} \alpha}{r_i} \quad (5.1)$$

$$m_{i1}(\alpha) = \frac{1}{\Omega} \cdot \frac{U_n - E \cdot \frac{\alpha}{\alpha_H}}{r_i} \quad (5.2)$$

$$P_{M_1}(\alpha) = i_i^2(\alpha) \cdot r_i \quad (5.3)$$

На плоской части

$$i_i(\alpha) = \frac{U_n - E}{r_i} \quad (5.4)$$

$$m_{i2}(\alpha) = \frac{1}{\Omega} \cdot \frac{(U_{\Pi} - E) \cdot E}{r_i} \quad (5.5)$$

$$P_{M2}(\alpha) = i_i^2(\alpha) \cdot r_i = \frac{(U_{\Pi} - E)^2}{r_i} \quad (5.6)$$

Среднее значение момента за оборот при $\alpha_B \leq \alpha_H \leq \frac{\pi}{2}$

$$M_{D1} = \frac{1}{2\pi} 2 \left[\int_{\alpha_B}^{\alpha_H} m_{i1}(\alpha) \cdot d\alpha + \int_{\alpha_H}^{\pi/2} m_{i2}(\alpha) \cdot d\alpha \right] = \quad (5.7)$$

$$= \frac{U_n^2}{\Omega \cdot r_i} \left[\frac{E^*}{2\alpha_H} (\alpha_H^2 - \alpha_B^2) - \frac{E^*}{3\alpha_H^2} (\alpha_H^3 - \alpha_B^3) + E^*(1 - E) \left(\frac{\pi}{2} - \alpha_H \right) \right]$$

где $E^* = \frac{E}{U_n}$

Среднее значение мощности за оборот

$$P_{M1} = \frac{1}{2\pi} 2 \left[\int_{\alpha_B}^{\alpha_H} P_{M1}(\alpha) \cdot d\alpha + \int_{\alpha_H}^{\pi/2} P_{M2}(\alpha) \cdot d\alpha \right] = \quad (5.8)$$

$$= \frac{U_{\Pi}^2}{\pi \cdot r_i} \left[(\alpha_H - \alpha_B) - \frac{E^*}{\alpha_H} (\alpha_H^2 - \alpha_B^2) + \frac{E^*}{3\alpha_H^2} (\alpha_H^3 - \alpha_B^3) + (1 - E^*)^2 \left(\frac{\pi}{2} - \alpha_H \right) \right]$$

При $\frac{\pi}{2} > \alpha_B > \alpha_H$ в выражениях (5.7) и (5.8) необходимо брать последние слагаемые, заменив α_H на α_B . Полученные зависимости позволяют по известным E , α_H и U_{Π} выбрать α_B в зависимости от требуемого M_D при угловой скорости Ω или рассчитать КПД двигателя при тех или иных коммутационных параметрах.

					27.03.04.095.24.00 ПЗ ВКР	Лист
						39
Изм.	Лист	№ докум.	Подп.	Дата		

При двухполупериодной коммутации эпюры напряжений, токов и моментов представлены на рис. 5.3 в данном случае становится возможным обеспечить пусковой момент при любом α от двух обмоток при $\alpha_{\kappa} \frac{2\pi}{m}$.

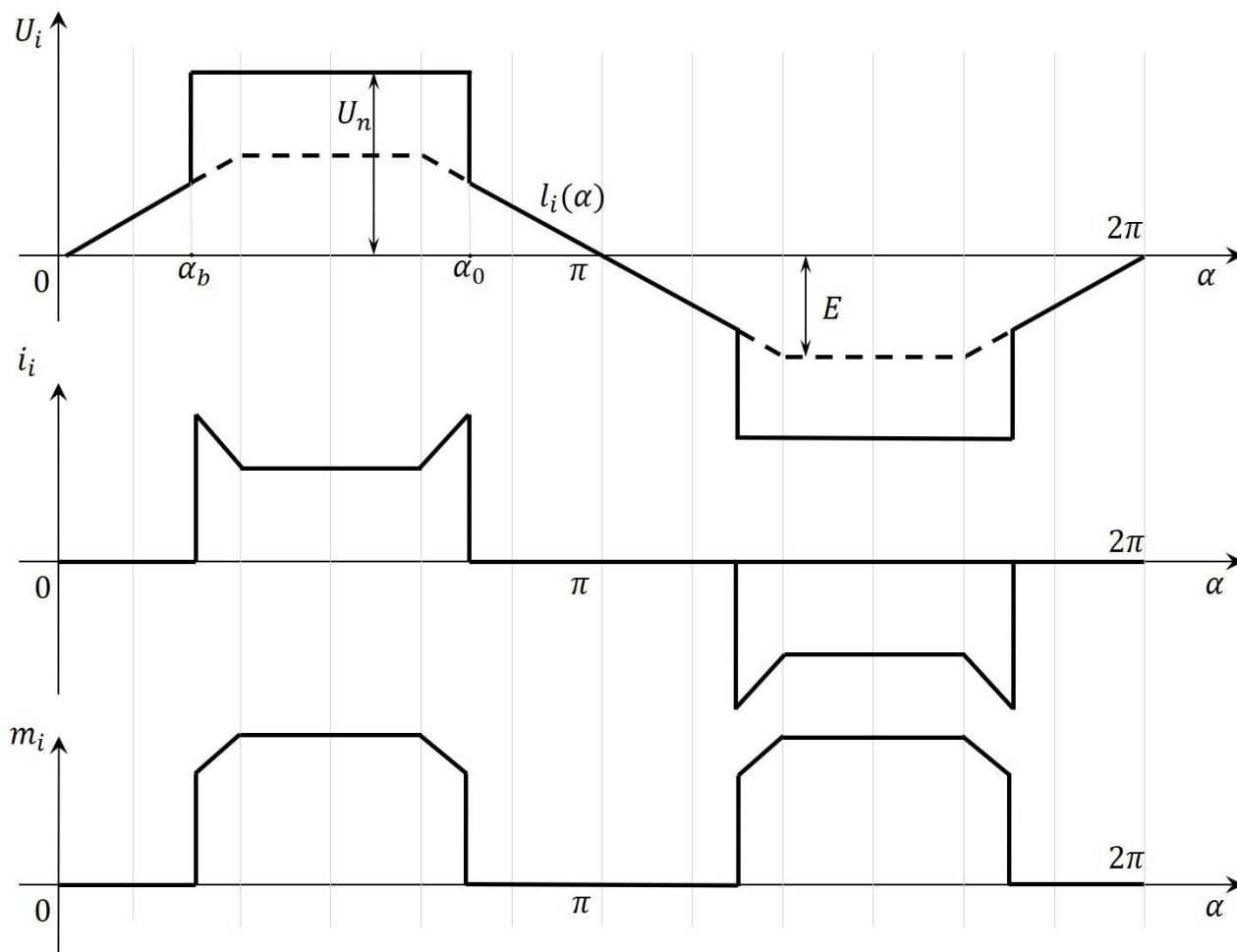


Рисунок 5.3

Выражения для момента и рассеиваемой обмоткой мощности аналогичные выражениям соответственно (5.7) и (5.8)

$$M_{D2} = 2M_{D1}, P_{m2} = 2P_{m1} \quad (5.9)$$

Сравним потери в меди двигателя с ондо- и двухполупериодной коммутациями.

					27.03.04.095.24.00 ПЗ ВКР	Лист
						40
Изм.	Лист	№ докум.	Подп.	Дата		

При $\Omega_1 = \Omega_2$ и $M_{D1} = M_{D2}$ исходя из (5.7) и (5.9), необходимо выполнить условие $U_{п1} = U_{п} U_{п2} = \frac{U_{п}}{\sqrt{2}}$

Тогда, согласно, (5.8) получаем

$$P_{m1} = 2P_{m2}$$

Таким образом, при $\Omega = const$ потери в меди двигателя при однополупериодной коммутации в два раза больше, чем при двухполупериодной.

					27.03.04.095.24.00 ПЗ ВКР	Лист
						41
Изм.	Лист	№ докум.	Подп.	Дата		

6 Датчик положения ротора

Выбор способа коммутации и способа управления в значительной степени определяет выбор ДПР. При дискретной коммутации наибольшее распространение находят логические способы получения межкоммутационного интервала. Суть этих способов заключается в том, что включение i -ой фазы двигателя осуществляется при переходе через нуль i -го сигнала ДПР, а отключение этой фазы при переходе через нуль K -го сигнала ДПР. Отсюда получаем, что для обеспечения дискретной нейтральной коммутации m -фазного двигателя необходимо m сигналов ДПР, переходы через нуль которых совпадают с α_n и α_o фаз двигателя. На рис 6.1 в качестве иллюстрации к сказанному, приведены эпюры напряжений 2-х фазного вентильного двигателя при 90-градусной коммутации и выходные сигналы ДПР.

					27.03.04.095.24.00 ПЗ ВКР	Лист
						42
Изм.	Лист	№ докум.	Подп.	Дата		

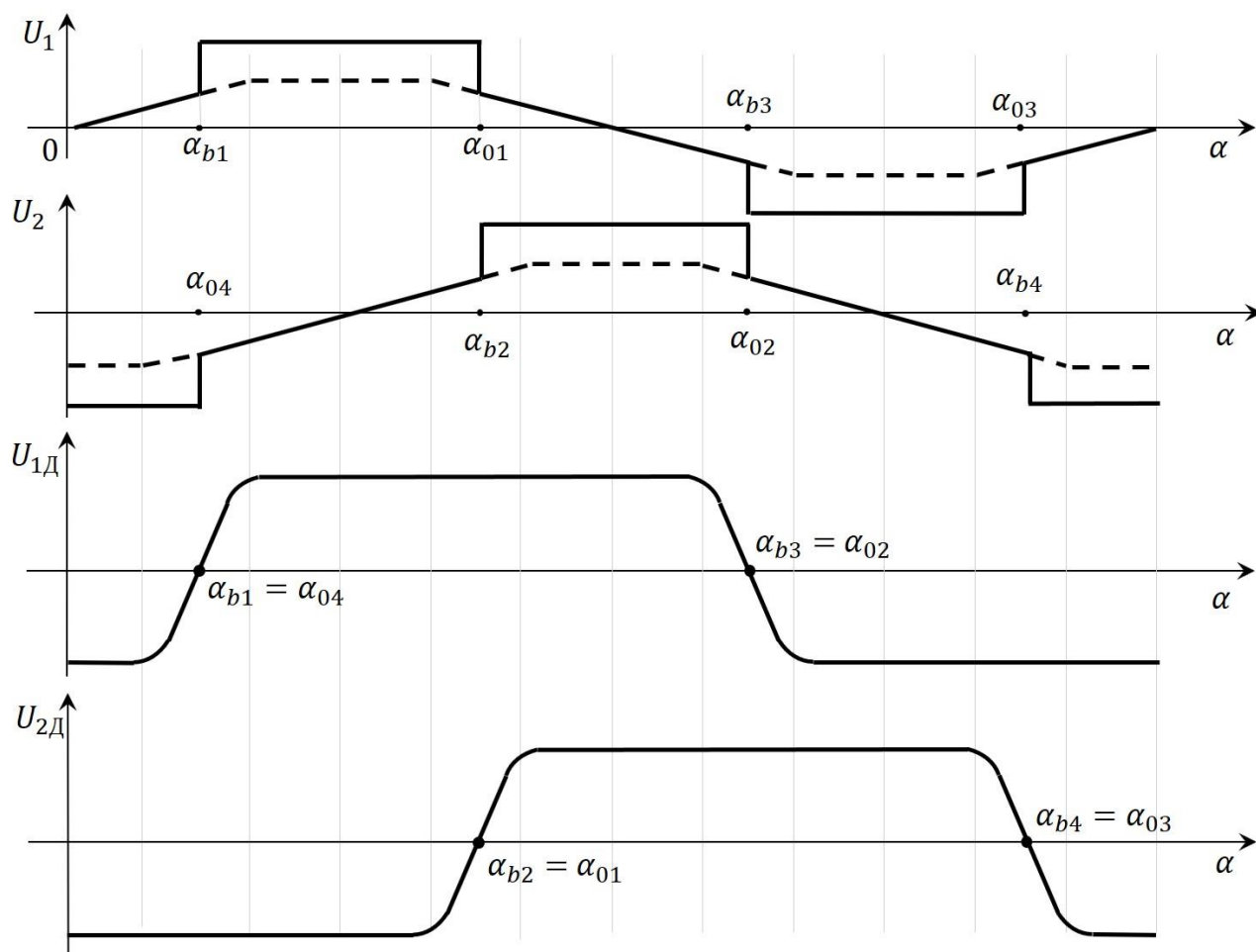


Рисунок 6.1

Существуют также способы получения межкоммутационного интервала по сигналам с однофазного ДПР. Однако в любом случае необходим ДПР как элемент, либо отдельный от электрической машины, либо совмещенный с ней. При этом возможны различные способы передачи информации по силовым связям двигателя с коммутатором. На стройку коммутации здесь достигается либо конструктивно, либо вращением ЧЭ ДПР или настройкой электронной схемы. Перечисленные ДПР относятся к широкому классу статических датчиков и обладают следующими недостатками:

- конструктивная сложность;
- необходимость настройки коммутации.

Известны динамические датчики положения. В этих датчиках информация об угловом положении может быть получена только в том случае, когда ротор двигателя находится в движении. Из нескольких разновидностей этих датчиков распространение получил ДПР по ЭДС обмоток двигателя.

Рассмотрим особенности работы вентильного двигателя по ЭДС обмоток, не вдаваясь в подробности режима пуска. Предположим, что ротор двигателя вращается с номинальной угловой скоростью. Для обеспечения нейтральной коммутации необходимо, чтобы для i -ой обмотки выполнялось условие

$$\alpha_{\text{в}} = \pi - \alpha_0 \quad (6.1)$$

Поскольку $\alpha_{\text{в}} \geq 0$ и $\pi - \alpha_0 \geq 0$, то возможны несколько способов коммутации. Рассмотрим вначале способы выделения информационных сигналов, основанные на сравнении ЭДС разных фаз. Если обмотки, по которым протекает ток, соединены последовательно, то при

$$e_i(\alpha) = e_{i+1}(\alpha)$$

должна отключиться i -ая обмотка и подключиться $i + 1$ или какая-то другая. В этом случае минимальное количество пересечений положительной волны ЭДС i -ой обмотки с положительными полуволнами ЭДС других фаз должно быть равно 2. Если выполняется условие $\alpha_{\text{к}} = \frac{2\pi}{m}$, то $m = 3$ для 120 градусной коммутации. Если сравнение может осуществляться по модулю, то может быть реализован случай $m=2$ при 90-градусной коммутации. Возможны также различные другие комбинации, например, включение и отключение обмотки осуществляется по сигналам других(отключенных) фаз. К недостаткам способов сравнения можно отнести следующие:

- необходимо устройство, которое обеспечивало бы измерение ЭДС включенной обмотки;

					27.03.04.095.24.00 ПЗ ВКР	Лист
						44
Изм.	Лист	№ докум.	Подп.	Дата		

- при сравнении по модулю усложняется схема электронной части ВД;
- при коммутационных процессах возможны искажения информации за счет взаимных связей между обмотками, а также от ЭДС самоиндукции отключаемой обмотки.

К следующей большой группе способов выделения информационных сигналов относятся способы, основанные на сравнении ЭДС по знаку. Здесь при переходе ЭДС i -ой обмотки через нуль осуществляется коммутация обмоток, например, отключается $i + 1$ и включается $i + 2$ и т.д. В этом случае $m \geq 3$. Для трехфазной обмотки с нулевым выводом таким способом можно обеспечить нейтральную двух-полупериодную 60-градусную коммутацию (рис. 6.2).

К недостаткам таких способов относятся:

- большое число обмоток двигателя;
- искажение информации при коммутационных процессах.

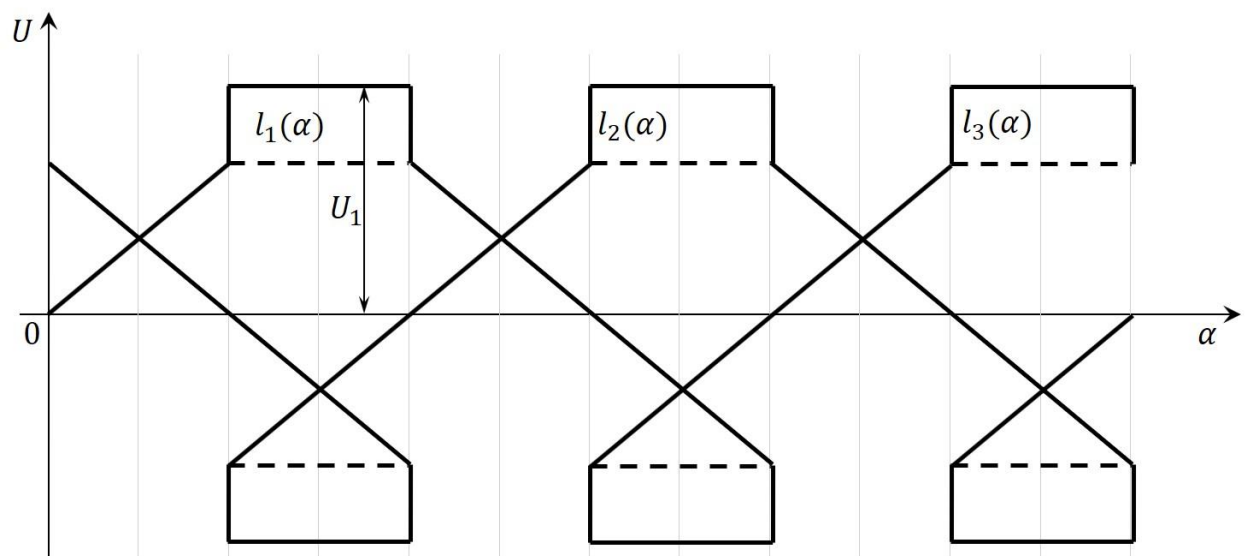


Рисунок 6.2

К способу, свободному от многих недостатков, относятся способ сравнения по знаку, отличающийся от предыдущего тем, что включение i -ой обмотки осуществляют по ЭДС этой же обмотки, искусственно сдвинутой по

					27.03.04.095.24.00 ПЗ ВКР	Лист
						45
Изм.	Лист	№ докум.	Подп.	Дата		

фазе, а отключение производят по сигналу другой обмотки. В этом случае $m \geq 2$. Обеспечивая на номинальной скорости фазовый сдвиг ЭДС обмотки на угол α_B и фазовый сдвиг ЭДС обмотки, по которой происходит отключение на угол α , получают нейтральную коммутацию. Применительно к рис. 6.2 включение первой обмотки должно осуществляться по сигналу, сдвинутому на угол $\frac{\pi}{2}$ от ЭДС этой же обмотки, а отключение – по ЭДС 3 обмотки, сдвинутой на такой же угол. К достоинствам такого способа можно нести:

- возможность обеспечения нейтральной коммутации при минимальном числе обмоток двигателя;
- возможность подавления коммутационных помех на сдвигающем элементе;
- универсальность.

Невозможность обеспечения нейтральной коммутации в широком диапазоне изменения угловой скорости вращения является недостатком способа.

					27.03.04.095.24.00 ПЗ ВКР	Лист
						46
Изм.	Лист	№ докум.	Подп.	Дата		

7 Датчик угловой скорости

ВД, являясь аналогом электрической машины постоянного тока, имеет механическую характеристику, у которой частота вращения сильно зависит от нагрузки. Поэтому для стабилизации угловой скорости в таком двигателе необходим регулятор скорости. Для работы регулятора необходимо выделить сигнал, характеризующий частоту вращения двигателя. Контроль частоты вращения может быть осуществлен по многим параметрам. [8]

Наибольшее распространение получило два параметра: амплитуда ЭДС и частота специального тахогенератора или самого ВД. Стабильность скорости вращения при работе стабилизатора от амплитуды ЭДС не лучше 0,5-1% и поэтому в дальнейшем не рассматривается.

Решение задачи стабилизации частоты вращения возможно способом, основанном на сравнении фаз переменного напряжения задающего генератора стабильной частоты и переменного напряжения датчика частоты вращения. Вполне очевидно, что в качестве переменного напряжения датчика можно использовать ЭДС обмоток двигателя. Действительно, если дискретная коммутация обмоток не искажает ЭДС обмоток в точках перехода через нуль, то по этим нулевым точкам могут быть сформированы сигналы, несущие информацию о действительной скорости вращения двигателя.

					27.03.04.095.24.00 ПЗ ВКР	Лист
						47
Изм.	Лист	№ докум.	Подп.	Дата		

$D_p = 15,6$ мм-наружный диаметр ротора

$D_B = 2,3$ мм внутренний диаметр ротора

$L_{дв} = 7$ мм осевая длина ротора

$D_{срр} = 11$ мм средний диаметр ротора по центрам магнитов

$d_m = 2,5$ мм диаметр магнита

$h_m = 1,35$ мм высота магнита

$P = 4$ число пар полюсов

$n = 18000$ об/мин номинальная скорость вращения ротора

$J = 0.004$ Г · см · с²

$M_c = 2$ Г · см момент сопротивления на валу

8 Расчет торцевого двигателя М-ДНГ

Поверочный расчет двигателя в заданных габаритах

Расчет индукции в воздушном зазоре

Полный немагнитный зазор машины рассчитывается по формуле:

$$\delta = 2\Delta_B + \Delta_0,$$

где $\Delta_B = 0,2$ - значение воздушного зазора в свете, мм;

$\Delta_0 = 2,4$ - толщина статора, мм.

$$\delta = 2 \cdot 0,2 + 2,4 = 2,8\text{мм}$$

Высота магнита:

					27.03.04.095.24.00 ПЗ ВКР	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подп.	Дата		48

$$h_m = \frac{l_p - \delta - 2h_a}{2},$$

где $l_p = 6,5$ - габаритная длина двигателя, мм;

$\delta = 2,8$ - полный немагнитный зазор машины, мм;

$h_a = 0,5$ толщина магнитопровода ротора, выбираем из технологических соображений.

$$h_m = \frac{6,5 - 2,8 - 2 \cdot 0,5}{2} = 1,35 \text{ мм}$$

Полная длина магнита состоит из двух высот магнитов

$$l_m = 2h_m = 2 \cdot 1,35 = 2,7 \text{ мм}$$

Полюсное деление ротора

$$\tau = \frac{\pi \cdot D_{\text{ср}}}{2P}$$

где $D_{\text{ср}} = 11$ средний диаметр по центрам секций и магнитов выбираем из конструктивных соображений, мм;

$2P = 8$ - число полюсов машины.

$$\tau = \frac{\pi \cdot 11}{2 \cdot 4} = 4,3 \text{ мм}$$

Диаметр магнита:

Для приближения формы поля к трапецеидальной коэффициент полюсного перекрытия должен быть $\alpha_\delta \approx 0,58$, тогда диаметр магнита будет:

$$d_m = \alpha_\delta \tau = 0,58 \cdot 4,3 = 2,5 \text{ мм}$$

-коэффициент, учитывающий свойства магнита:

					27.03.04.095.24.00 ПЗ ВКР	Лист
						49
Изм.	Лист	№ докум.	Подп.	Дата		

$$k_B = \frac{\lambda}{\sqrt{\mu_m}} = \frac{l_m}{d_m} \cdot \frac{1}{\sqrt{\mu_m}}$$

где $\lambda = \frac{l_m}{d_m}$ – относительная длина;

$l_m = 0,27$ - полная длина магнита, см;

$d_m = 0,25$ - диаметр магнита, см;

$$\mu_m = \frac{Br}{\mu_0 Hc} = \frac{1,07}{1,26 \cdot 10^{-6} \cdot 716 \cdot 10^3} = 1,186$$

$\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-6} = 1,26 \cdot 10^{-6}$ – магнитная проницаемость вакуума, Гн/м²;

$Br = 1,01$ - остаточная индукция для выбранного материала магнита КС25ДЦ (самарий-кобальд) четвертой группы, Тл;

$Hc = 716$ - коэрцитивная сила КС25ДЦ, КА/м;

$$k_B = \frac{0,27}{0,25} \cdot \frac{1}{\sqrt{1,186}} = 0,991$$

Значение индукции в воздушном зазоре выбираем из рис 8.1

					27.03.04.095.24.00 ПЗ ВКР	Лист
						50
Изм.	Лист	№ докум.	Подп.	Дата		

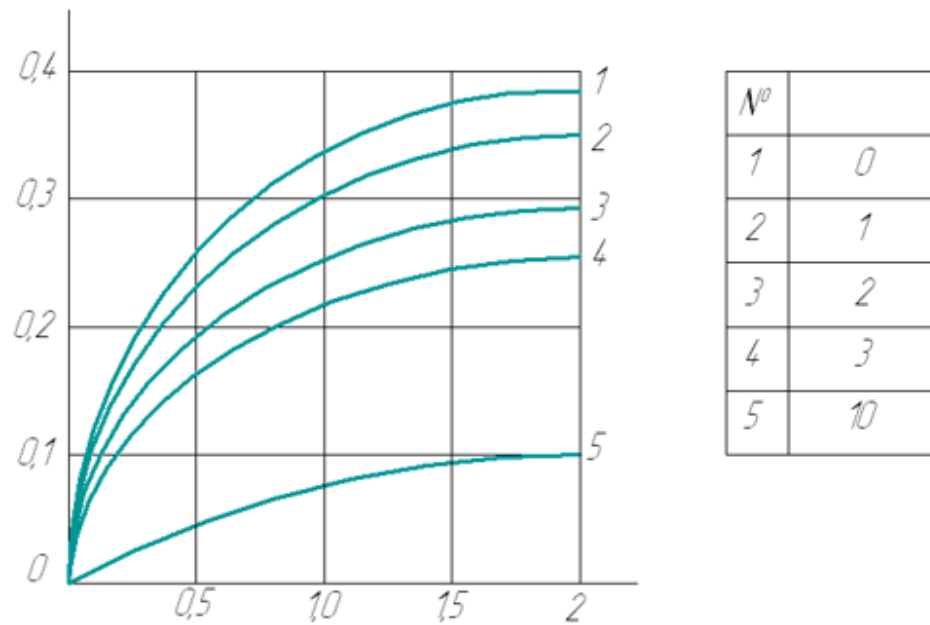


Рис 8.1

Для $K_B = 0,991$ и $\delta = 2,8$ мм, отношение будет таково:

$$\frac{B}{B_r} = 0,24$$

Тогда индукция в воздушном зазоре будет

$$B_\delta = 0,24 B_r = 0,24 \cdot 1,07 = 0,256 \text{ Тл}$$

Для проверки насыщения магнитным потоком проверим индукцию в магнитопроводе ротора

$$B_a = \frac{B_r S_m}{2 S_a} = \frac{B_r \pi \cdot d_m^2}{2 \cdot S_a \cdot 4}$$

где $B_r = 1,07$ остаточная индукция КС25ДЦ 3МП, Тл;

$d_m = 2,5$ диаметр магнита, мм;

$$S_a = \frac{D_{\text{Нр}} - d_B}{2} \cdot h_a$$

$d_B = 2,3$ - внутренний диаметр ротора;

$D_{Hp} = 15,6$ - наружный диаметр ротора;

$S_a = \frac{15,6-2,3}{2} \cdot 0,5 = 3,325$ – сечение магнитопровода ротора, мм²;

$$B_a = \frac{1,07 \cdot \pi \cdot 2,5^2}{2 \cdot 3,325 \cdot 4} = 0,789 \text{Тл}$$

С учетом полученной индукции в магнитопроводе материал 50Н. Индукция насыщения этого материала 1,5 Тл. Таким образом для магнитопровода ротора выбираем материал 50Н ГОСТ 10994-74.

					27.03.04.095.24.00 ПЗ ВКР	Лист
						52
Изм.	Лист	№ докум.	Подп.	Дата		

9 Расчет обмоточных данных

С учетом полюсности и числа фаз по среднему диаметру расположения магнитов расположим шесть секций обмотки.

Рассчитаем в электрических градусах геометрические углы расположения катушек по среднему диаметру по формуле

$$\alpha_{эл} = \frac{360 \cdot p}{Z_k} \cdot (k - 1)$$

где $p = 4$ - число пар полюсов;

$Z_k = 6$ - число секций;

$k = (1 - 6)$ - порядковый номер секции.

Результаты расчета:

1. $\alpha_{эл1} = \frac{360 \cdot 4}{6} \cdot (1 - 1) = 0$ эл. градусов;
2. $\alpha_{эл1} = \frac{360 \cdot 4}{6} \cdot (2 - 1) = 240$ эл. градусов = -120 эл. градусов;
3. $\alpha_{эл1} = \frac{360 \cdot 4}{6} \cdot (3 - 1) = 480$ эл. градусов = 120 эл. градусов
4. $\alpha_{эл1} = \frac{360 \cdot 4}{6} \cdot (4 - 1) = 720$ эл. градусов = 0 эл. градусов
5. $\alpha_{эл1} = \frac{360 \cdot 4}{6} \cdot (5 - 1) = 960$ эл. градусов = -120 эл. градусов
6. $\alpha_{эл1} = \frac{360 \cdot 4}{6} \cdot (6 - 1) = 1200$ эл. градусов = 120 эл. градусов

Проведем диаграмму векторов ЭДС секций

					27.03.04.095.24.00 ПЗ ВКР	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подп.	Дата		53

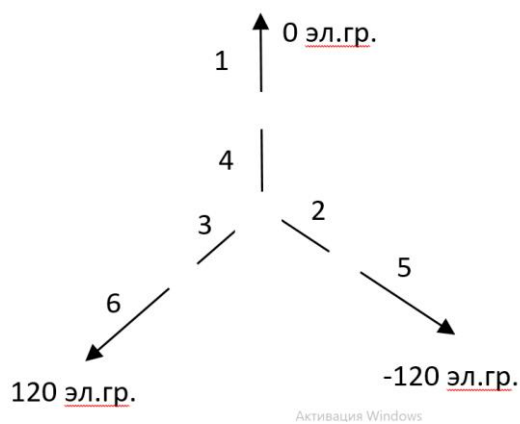


Рисунок 9.1 – диаграмма векторов

По диаграмме составим схему соединений секций рабочей обмотки для числа фаз $m=3$.

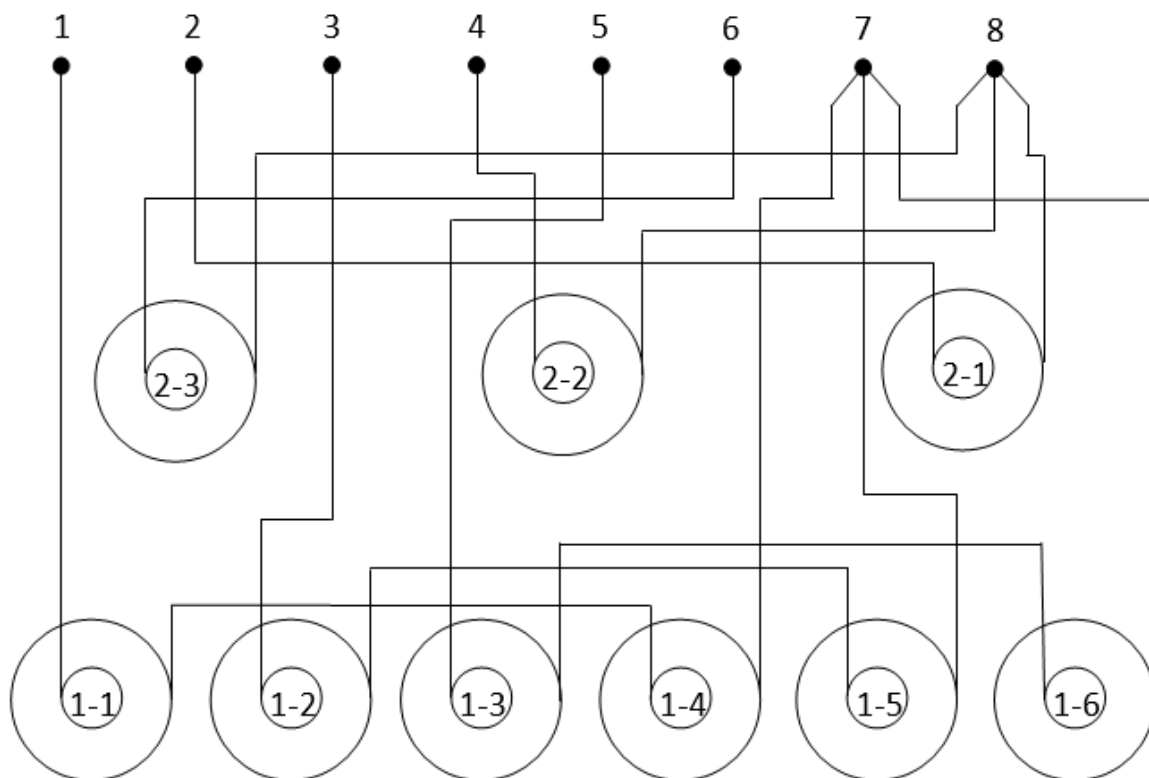


Рисунок 9.2 – Схема соединений секций обмотки

10 Расчет рабочей обмотки статора

Из технологических соображений выбираем внутренний диаметр секции
 $d_{\text{вс}} = 2,2$ мм.

Наружный диаметр секции $d_{\text{нс}} = 5,2$ мм

Средний диаметр секции:

$$d_{\text{сс}} = \frac{d_{\text{нс}} + d_{\text{вс}}}{2}$$

где $d_{\text{нс}} = 5,2$ - наружный диаметр секции, мм;

$d_{\text{вс}} = 2,2$ - внутренний диаметр секции, мм.

$$d_{\text{сс}} = \frac{d_{\text{нс}} + d_{\text{вс}}}{2} = \frac{5,2 + 2,2}{2} = 3,7 \text{ мм}$$

Определим коэффициент, характеризующий форму ЭДС

$$\alpha_{\tau} = \frac{\alpha_{\delta} + d_{\text{сс}}}{2} = \frac{0,58 + 3,7}{2} = 2,14 \text{ мм}$$

где $\alpha_{\delta} = 0,58$ - коэффициент полюсного перекрытия;

Выбираем диаметр обмоточного провода $d_{\text{нр}} = 0,08$ мм, сечение провода

$$q = 5,026 \cdot 10^{-3}$$

Число витков в секции рабочей обмотки

$$W_{\text{ср}} = \frac{(d_{\text{снр}} - d_{\text{свр}}) \cdot h_c \cdot k_3}{2q}$$

где $d_{\text{снр}} = 5,2$ - наружный диаметр секции рабочей обмотки, мм;

$d_{\text{свр}} = 2,2$ - внутренний диаметр секции рабочей обмотки, мм;

					27.03.04.095.24.00 ПЗ ВКР	Лист
						55
Изм.	Лист	№ докум.	Подп.	Дата		

$h_c = 1,75$ - толщина секции, мм;

$k_3 = 0,4$ - коэффициент заполнения объема секции медью.

$$W_{cp} = \frac{(5,2 - 2,2) \cdot 1,75 \cdot 0,4}{2 \cdot 5.026 \cdot 10^{-3}} = 208 \text{ витков}$$

Активное сопротивление рабочей фазы обмотки

$$R_{фр} = l_{w_{cp}} \cdot w_{cp} \cdot \frac{\rho}{q} = \pi \cdot d_{cc} \cdot w_{cp} \cdot \frac{\rho}{q}$$

где $d_{cc} = 3,7$ - средний диаметр секции рабочей обмотки, мм;

$w_{cp} = 208$ - число витков рабочей обмотки;

$\rho = 0,0175$ - удельное сопротивление меди, Ом·мм²/м

$q = 5.026 \cdot 10^{-3}$ - сечение провода обмотки, мм².

$$R_{фр} = 3,14 \cdot 3,7 \cdot 10^{-3} \cdot 2 \cdot 208 \cdot \frac{0,0175}{5.026 \cdot 10^{-3}} = 16,820 \text{ м}$$

					27.03.04.095.24.00 ПЗ ВКР	Лист
						56
Изм.	Лист	№ докум.	Подп.	Дата		

11 Расчет сигнальной обмотки статора

Из технологических соображений выбираем внутренний диаметр секции $d_{\text{вс}} = 3,3$ мм.

Наружный диаметр секции $d_{\text{нс}} = 5,2$ мм

Средний диаметр секции:

$$d_{\text{сс}} = \frac{d_{\text{нс}} + d_{\text{вс}}}{2}$$

где $d_{\text{нс}} = 5,2$ - наружный диаметр секции, мм;

$d_{\text{вс}} = 3,3$ - внутренний диаметр секции, мм.

$$d_{\text{сс}} = \frac{d_{\text{нс}} + d_{\text{вс}}}{2} = \frac{5,2 + 3,3}{2} = 4,25 \text{ мм}$$

Определим коэффициент, характеризующий форму ЭДС

$$\alpha_{\tau} = \frac{\alpha_{\delta} + d_{\text{сс}}}{2} = \frac{0,58 + 4,25}{2} = 2,415 \text{ мм}$$

где $\alpha_{\delta} = 0,58$ - коэффициент полюсного перекрытия;

Выбираем диаметр обмоточного провода $d_{\text{пр}} = 0,03$ мм, сечение провода

$$q = 0,706858 \cdot 10^{-3}$$

Число витков в секции сигнальной обмотки

$$W_{\text{сс}} = \frac{(d_{\text{нс}} - d_{\text{вс}}) \cdot h_c \cdot k_3}{4q}$$

где $d_{\text{нс}} = 5,2$ - наружный диаметр секции сигнальной обмотки, мм;

					27.03.04.095.24.00 ПЗ ВКР	Лист
						57
Изм.	Лист	№ докум.	Подп.	Дата		

$d_{\text{свс}} = 3,3$ - внутренний диаметр секции сигнальной обмотки, мм;

$h_c = 0,6$ - толщина секции, мм;

$k_3 = 0,4$ - коэффициент заполнения объема секции медью.

$$W_{\text{сс}} = \frac{(5,2 - 3,3) \cdot 0,6 \cdot 0,4}{4 \cdot 0.706858 \cdot 10^{-3}} = 161 \text{ витков}$$

Активное сопротивление рабочей фазы обмотки

$$R_c = l_{w_c} \cdot w_{\text{сс}} \cdot \frac{\rho}{q} = \pi \cdot d_{\text{сс}} \cdot w_{\text{сс}} \cdot \frac{\rho}{q}$$

где $d_{\text{сс}} = 4,25$ - средний диаметр секции сигнальной обмотки, мм;

$w_{\text{сс}} = 322$ - число витков сигнальной обмотки;

$\rho = 0,0175$ - удельное сопротивление меди, Ом·мм²/м;

$q = 0.706858 \cdot 10^{-3}$ - сечение провода обмотки, мм².

$$R_c = 3,14 \cdot 4,25 \cdot 10^{-3} \cdot 322 \cdot \frac{0,0175}{0.706858 \cdot 10^{-3}} = 53,280 \text{ м}$$

Относительный наружный диаметр катушки

$$\alpha_{\text{кн}} = \frac{d_{\text{снс}}}{\tau} = \frac{5,2}{4,3} = 1,209$$

Относительный внутренний диаметр катушки

$$\alpha_{\text{кв}} = \frac{d_{\text{свс}}}{\tau} = \frac{3,3}{4,3} = 0,767$$

Относительный средний диаметр катушки

$$\alpha_{\text{ксп}} = \frac{\alpha_{\text{кн}} + \alpha_{\text{кв}}}{2} = 0,988$$

					27.03.04.095.24.00 ПЗ ВКР	Лист
						58
Изм.	Лист	№ докум.	Подп.	Дата		

Коэффициент, характеризующий форму ЭДС

$$\alpha_{\tau} = \frac{\alpha_{\delta} + \alpha_{\text{ксп}}}{2} = \frac{0,58 + 0,988}{2} = 0,784$$

$\alpha_{\tau} > 707$, т.е. ЭДС сигнальной обмотки будет иметь отклонение от синусоиды в сторону треугольной формы

$$\begin{aligned} E_{\text{фсигн}} &= 0,45 \cdot 10^{-4} \cdot \pi^2 \cdot f_p \cdot d_{\text{срр}}^2 \cdot W_{\text{сс}} \cdot B_{\delta} \\ &= 0,45 \cdot 10^{-4} (3,14)^2 \cdot 300 \cdot 1,1^2 \cdot \frac{160}{8} \cdot 0,256 = 0,386\text{В} \end{aligned}$$

					27.03.04.095.24.00 ПЗ ВКР	Лист
						59
Изм.	Лист	№ докум.	Подп.	Дата		

12 Расчет характеристик двигателя

Фазная ЭДС сигнальной обмотки, действующее значение:

$$E_{сф} = 0.45\pi^2 \frac{f_H}{p} D_{ср}^2 \cdot KW_{ср} B_\delta$$

$$E_{сф} = 0,45 \cdot 3,14^2 \frac{1200}{4} (11 \cdot 10^{-3})^2 \frac{161}{8} \cdot 0,256 = 0,83В$$

Фазная ЭДС рабочей обмотки, действующее значение:

$$E_{рф} = 0,45 \cdot 3,14^2 \frac{1200}{4} (11 \cdot 10^{-3})^2 \frac{208}{4} \cdot 0,256 = 2,14В$$

где $f_H = \frac{P_H \cdot h}{60} = \frac{4 \cdot 18000}{60} = 1200$

$K = \frac{1}{4}$ – коэффициент, учитывающий то, что при выбранной схеме обмотки в каждой фазе есть только две секции, а не восемь;

$h = 18000$ об/мин – частота вращения ротора, согласно ТЗ

					27.03.04.095.24.00 ПЗ ВКР	Лист
						60
Изм.	Лист	№ докум.	Подп.	Дата		

13 Расчет энергетических характеристик ДБ

Пусковой ток в начале разгона

$$I_{\text{пн}} = \frac{U_{\text{п}}}{2R_{\text{фр}}}$$

где $U_{\text{п}} = 13,5 \text{ В}$ – напряжение питания;

$$R_{\text{фр}} = 16,82 \text{ Ом}$$

$$I_{\text{пн}} = \frac{13,5}{2 \cdot 16,82} = 0,401 \text{ А}$$

Ток в конце разгона

$$I_{\text{пк}} = \frac{U_{\text{п}} - E_{\text{л}}^A}{2R_{\text{фр}}}$$

где $E_{\text{л}}^A = \sqrt{2} \cdot \sqrt{3} \cdot E_{\text{рф}} = 1,41 \cdot 1,73 \cdot 2,14 = 5,22 \text{ В}$ – амплитудное значение линейной ЭДС.

$$I_{\text{пк}} = \frac{13,5 - 5,22}{2 \cdot 16,82} = 0,246 \text{ А}$$

Средний пусковой ток:

$$I_{\text{пср}} = \frac{I_{\text{пн}} + I_{\text{пк}}}{2} = \frac{0,401 + 0,246}{2} = 0,32 \text{ А}$$

Средняя потребляемая мощность на разгоне:

$$P_{\text{срр}} = 2R_{\text{р}} \cdot I_{\text{пср}}^2 = 2 \cdot 16,82 \cdot 0,32^2 = 3,53 \text{ Вт}$$

Момент в пуске:

					27.03.04.095.24.00 ПЗ ВКР	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подп.	Дата		61

$$M_{\text{пн}} = KI = \frac{E_{\text{л}}^A}{\omega} I_{\text{пн}} = \frac{E_{\text{л}}^A P}{2\pi \cdot f_h} I_{\text{пн}}$$

где $P = 4$ - число пар полюсов;

$$M_{\text{пн}} = \frac{5,22 \cdot 4}{2 \cdot 3,16 \cdot 1200} \cdot 0,401 = 11,12 \cdot 10^{-4} \text{Н} \cdot \text{м} = 11,12 \text{Г} \cdot \text{см}$$

Момент в конце разгона

$$M_{\text{пк}} = KI = \frac{E_{\text{л}}^A}{\omega} I_{\text{пк}} = \frac{E_{\text{л}}^A P}{2\pi \cdot f_h} I_{\text{пк}} = \frac{5,22 \cdot 4}{2 \cdot 3,16 \cdot 1200} \cdot 0,246 = 6,82 \cdot 10^{-4} \text{Н} \cdot \text{м} \\ = 6,82 \text{Г} \cdot \text{см}$$

Мощность, потребляемая двигателем в номинальном режиме:

$$P_n = P_{\text{мех}} + P_{\text{меди}}$$

где $P_{\text{мех}} = M_{\text{н}} \omega = M_{\text{н}} 2\pi f = 2 \cdot 10^{-4} \cdot 2 \cdot 3,14 \cdot 300 = 0,376 \text{Вт}$

$M_{\text{н}} = 2 \text{Гсм} \approx 2 \cdot 10^{-4} \text{Нм}$ – момент сопротивления опор;

$$P_{\text{меди}} = 2R_{\text{фр}} I_{\text{н}}^2 = 2 \cdot 16,82 \cdot 0,136 = 0,628 \text{Вт}$$

$$I_{\text{н}} = \frac{0,246 \cdot 4}{6,82} = 0,136 \text{А}$$

$$P_n = 0,376 + 0,628 = 1,005 \text{Вт} \approx 1 \text{Вт}$$

Момент инерции

$$J = 0,00997 \text{Г} \cdot \text{см} \cdot \text{с}^2$$

Время разгона

$$t_p = \frac{J \cdot \omega}{M_{\text{пн}} - M_c} = \frac{0,00997 \cdot 2 \cdot 3,14 \cdot 300}{11,12 - 2} = 2,05 \text{с}$$

					27.03.04.095.24.00 ПЗ ВКР	Лист
						62
Изм.	Лист	№ докум.	Подп.	Дата		

Заключение

В данной выпускной квалификационной работе представлены описания конструкции и принцип работы двух типов ДНГ:

1. «Большого» ДНГ высокой точности с бесконтактным двигателем постоянного тока радиального исполнения.
2. Мини-ДНГ средней точности с торцевым бесконтактным двигателем постоянного тока с «немагнитным» статором.

Проведён расчёт бесконтактного двигателя в заданных габаритах с четырьмя парами полюсов, с рабочей и сигнальной обмотках, сдвинутыми по углу на 30° , что обеспечивает минимум взаимоиндукции между обмотками и вместе с тем синфазность ЭДС обмоток. В теоретическом разделе показано, что минимум выделения тепла в статоре происходит при амплитудном или линейном способе управления, когда при разгоне напряжения питания подаваемый на двигатель растёт вместе с ростом ЭДС, превышая её на величину падения напряжения на сопротивления двух фаз, на которые подаётся питание. Самым оптимальным вариантом является способ со стабилизацией тока разгона на минимальном уровне, обеспечивающее необходимое время разгона.

Полученные данные подтверждаются расчётам.

					27.03.04.095.24.00 ПЗ ВКР	Лист
						63
Изм.	Лист	№ докум.	Подп.	Дата		

Библиографический список

1. Вольдек А.И. Электрические машины. Изд. 2-е. Л.: Энергия. 1974. 840 с.
2. Пятин Ю.М. «Постоянные магниты справочник» / под ред. Пятина Ю.М. — М.: Энергия, 1980.
3. Овчинников И.Е., Лебедев Н.Н. Бесконтактные двигатели постоянного тока. Л.: Наука, 1979. - 268 с.
4. Азов А.К., Угаров С.В., Щербаков В.Н. Управление бесконтактными моментными двигателями постоянного тока в следящих системах и пути миниатюризации усилителей коммутаторов. JL: ЦНИИ "Румб", 1982. - 84 с.
5. Мишин Д.Д. Магнитные материалы. Москва. "Высшая школа" 1981 год. 335 с.
6. Бороздин В. Н. Гироскопические приборы и устройства систем управления: учебное пособие для втузов / В. Н. Бороздин. - Москва: Машиностроение, 1990.
7. Румянцев В.А. «Технический отчёт по теме «Спин»».
8. ГОСТ 2.102-2013 ЕСКД. Виды и комплектность конструкторских документов. Москва, «Стандартинформ», 2014 г.
9. ГОСТ 2.104-2006 ЕСКД. Основные надписи. – М.: Стандартинформ. 2006. – 14 с.
10. ГОСТ 2.105-95 ЕСКД. Общие требования к текстовым документам. Издание официальное. – Минск: Межгосударственный совет по стандартизации, метрологии и сертификации, 1995. – 28 с.
11. СТО ЮУрГУ 04–2008 Стандарт организации. Курсовое и дипломное проектирование. Общие требования к содержанию и

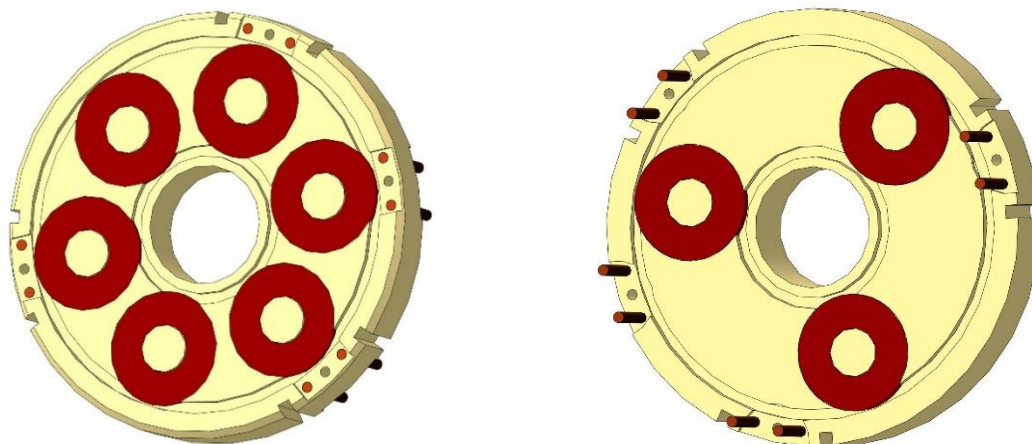
					27.03.04.095.24.00 ПЗ ВКР	<i>Лист</i>
						64
<i>Изм.</i>	<i>Лист</i>	<i>№ докум.</i>	<i>Подп.</i>	<i>Дата</i>		

оформлению / составители: Т.И. Парубочая, Н.В. Сырейщикова, В.И. Гузеев, Л.В. Винокурова. – Челябинск: Изд-во ЮУрГУ, 2008. – 56 с.

12. Методические указания к учебной и производственной практикам. – Миасс: Изд-во ЮУрГУ, 2017. – 24с.

					27.03.04.095.24.00 ПЗ ВКР	<i>Лист</i>
						65
<i>Изм.</i>	<i>Лист</i>	<i>№ докум.</i>	<i>Подп.</i>	<i>Дата</i>		

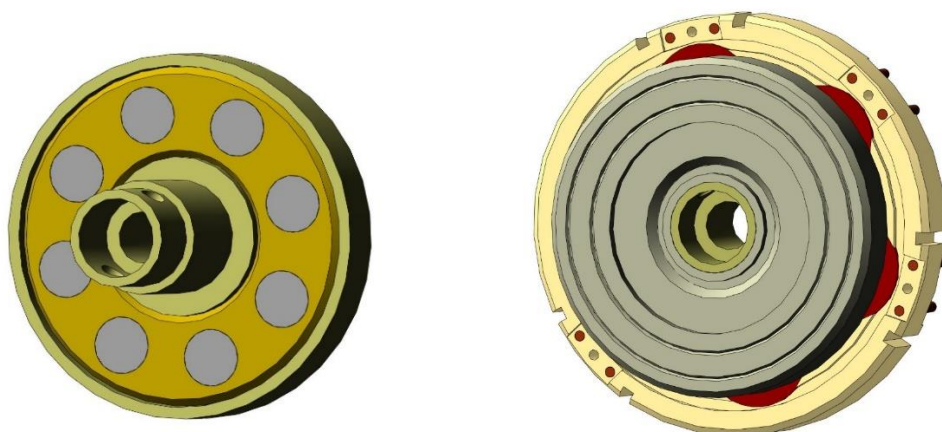
Приложение А. 3D-модель статора и ротора



А)

Б)

Рис.1 – А) Рабочие обмотки статора Б) Сигнальные обмотки статора



А)

Б)

Рис.2 – А) Ротор двигателя Б) Двигатель в сборке

Изм.	Лист	№ докум.	Подп.	Дата

27.03.04.095.24.00 ПЗ ВКР

Лист

66