

ЭСКИЗНЫЙ ПРОЕКТ

«ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЬ ДЛЯ ЭЛЕКТРОТРАНСПОРТА»

выполнил

Рябчунов Андрей Иванович

г. Воронеж

Требования технического задания

Номинальная мощность – 25 кВт;

Пиковая мощность – 50 кВт;

Частота вращения – 4000 - 15000 об/мин;

Напряжение питания - 400 В;

Охлаждение – жидкостное;

Встроенный датчик положения ротора – на эффекте Холла или вращающийся трансформатор.

Исполнение – герметичное, водонепроницаемое.

Технологичность конструкции.

Направление проектирования

Основные требования, предъявляемые к электродвигателям для электротранспорта:

1. Максимальные показатели удельной мощности.
2. Высокие значения КПД.
3. Малогабаритность, компактность.
4. Типовой режим работы с непериодическими изменениями нагрузки и частоты вращения - S9 по ГОСТ IEC 60034-1.

Учитывая требования технического задания и основные требования, предъявляемые к электродвигателям, эксплуатируемым в составе электротранспортных средств были выбраны следующие критерии, определяющие облик изделия:

1. Тип двигателя – BLDC (он же бесконтактный двигатель постоянного тока, он же синхронный двигатель с постоянными магнитами). Обеспечивает большую перегрузочную способность, в широком диапазоне скоростей вращения. В денежном эквиваленте мелкосерийное производство по удельным затратам сопоставимо с изготовлением асинхронных электродвигателей.

2. Особенности конструкции – наибольший вклад в конструкцию электродвигателя помимо требований технических в данном случае вносит система управления, а именно:

- нормальная работа мостового инвертора, в данном случае речь пойдет про IGBT модули, будет определяться частотой ШИМ и частотой несущей основной гармоники тока. Удовлетворительную работу IGBT – модули обеспечивают при частоте ШИМ порядка 20 кГц (неслышимый диапазон) и частоте первой гармоники тока не более 400 – 600 Гц. В случае увеличения частоты динамические потери на IGBT ключах могут привести к тому, что конструктивно не будет возможности рассеяния мгновенных потерь, а это неминуемый выход из строя мостового инвертора.

- частота питания, она же частота первой гармоники тока связана в двигателе следующей формулой:

$$n = 60f/p$$

где n – частота вращения, об/мин;

f – частота сети/частота первой гармоники тока

p – число пар полюсов двигателя;

таким образом, при ограничении в 400 – 600 Гц, и частоты вращения в диапазоне 4 000 – 15 000 об/мин, получим, что полюсность разрабатываемого электродвигателя будет равна 2.

3. Учитывая высокие требования к удельным характеристикам, автоматически отпадает вариант применения в конструкции датчиков положения ротора на эффекте Холла, ввиду того, что датчик типа вращающийся трансформатор позволяет реализовать векторное управление с такими важными в данном случае функциями как управление углом нагрузки, возможностью реализации режимов ослабления поля. Даже если не брать в расчет последнее (регулирование поля), датчик Холла обеспечивает дискретную коммутацию, в то время как формирование синусоидального тока с помощью вращающегося трансформатора обеспечивает на 10 – 15 % более высокие удельные показатели полезной мощности на валу.

4. Учитывая диапазон скоростей вращения 4000 – 15000 об/мин, высокие требования по характеристикам, жидкостное охлаждение, наиболее близким конструктивным решением будет являться, как на странно, шпиндель станка ЧПУ.

Электродвигатель - аналог

Ниже представлен наиболее близкий аналог – шпиндель HSX 170 - 18000/23.

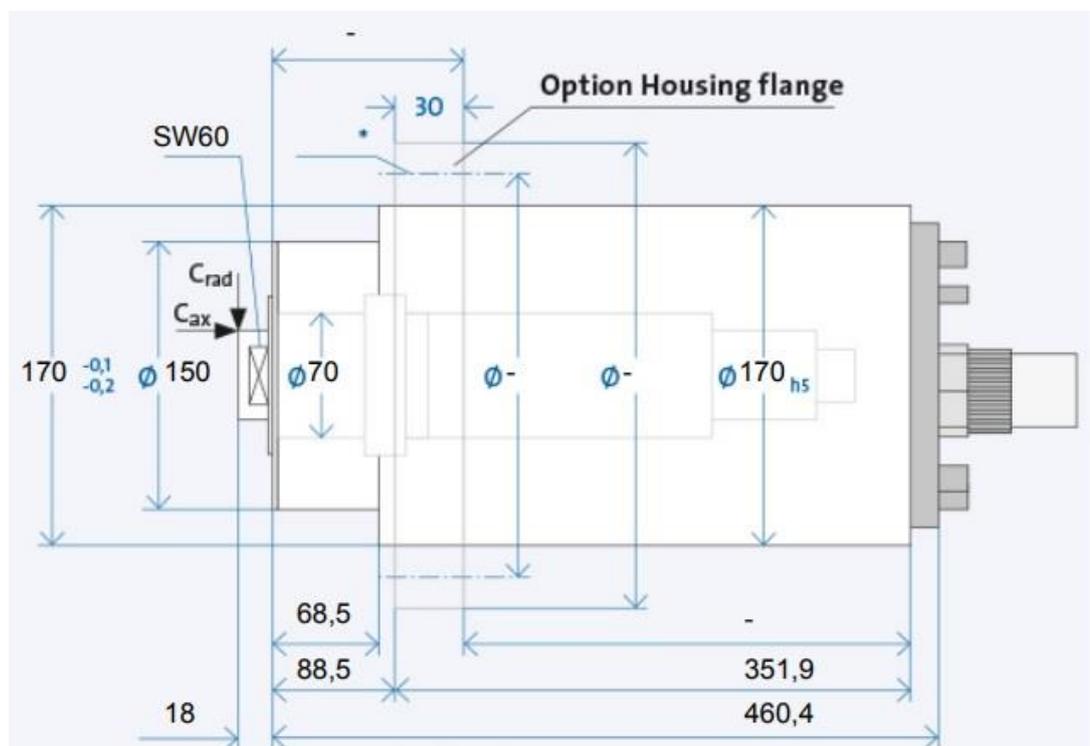


Рисунок – Габаритные размеры

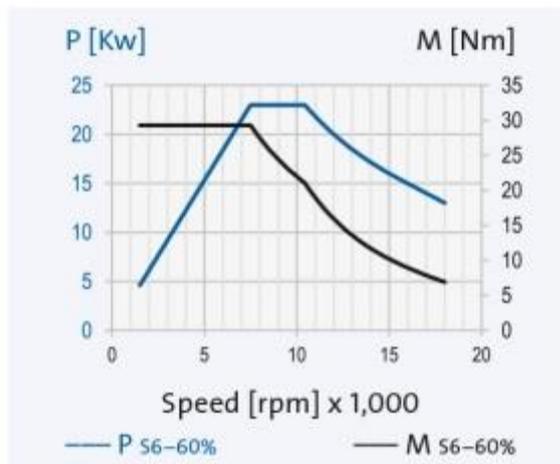


Рисунок – Характеристики шпинделя HSX 170 - 18000/23

Technical data			HSX 170 - 18000/23		
∅ Spindle housing	A	[mm]	170		
Speed max.	n_{max}	$[min^{-1}]$	18000		
Bearing, front	W_1	[mm]	70		
Tool interface			D 36/68		
∅ Flat layout	W	[mm]	68		
Static rigidity					
axial	C_{ax}	$[N/\mu m]$	135		
radial	C_{rad}	$[N/\mu m]$	262		
Motor realization			200 V	350 V	460 V
Frequency max.	f_{max}	[Hz]	600		
Converter voltage ¹⁾		[V]	200	350	460
Power	P_{B1}	[kW]	20		
Torque	M_{B1}	[Nm]	25,5		
... at speed	n	$[min^{-1}]$	7500		
Current	I_{B1}	[A]	89	51	39
Power	$P_{56-60\%}$	[kW]	23		
Torque	$M_{56-60\%}$	[Nm]	29,3		
... at speed	n	$[min^{-1}]$	7500		
Current	$I_{56-60\%}$	[A]	102	58	44

Рисунок – Характеристики шпинделя HSX 170 - 18000/23

Учитывая изложенное выше, была определена конструкция двигателя, эскиз которой представлен ниже.

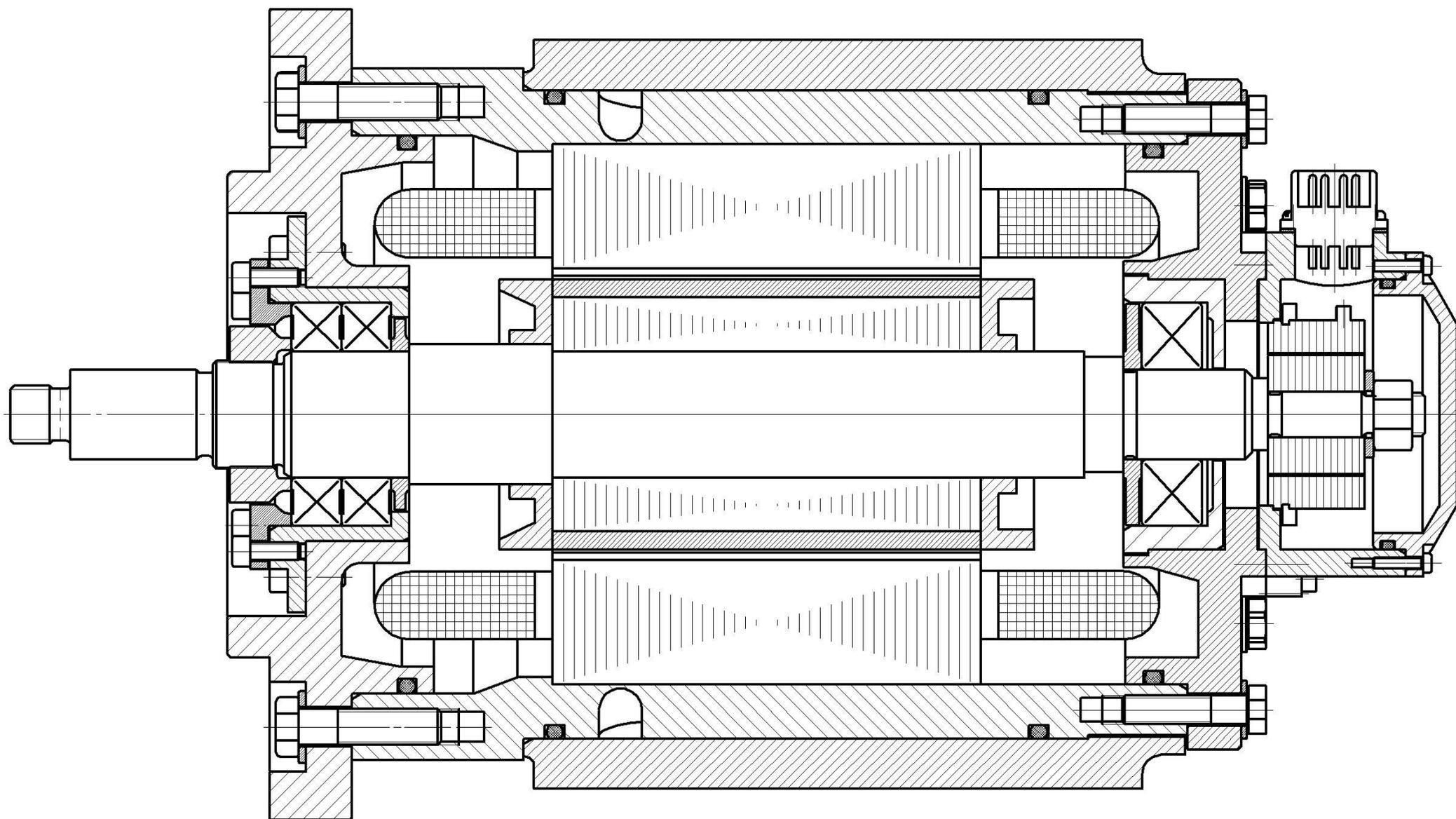


Рисунок – Сечение изделия

Рассмотрим сечение электродвигателя.

1. Передний подшипниковый конструктивно состоит из основной части из алюминиевого сплава и стальной гильзы с установленным сдвоенным дуплексным подшипником по схеме О или Х, в зависимости от исполнения первой ступени редуктора. Передний подшипниковый узел заполняется пластичной смазкой.

На переднем щите выполнена канавка для установки герметизирующего резинового кольца.

2. В корпусе двигателя выполнены каналы для циркуляции охлаждающей жидкости. Внутри корпуса расположен статорный пакет с обмотками. Размеры статорного пакета – диаметр 150 мм, длина шихтованного сердечника 120 мм. Учитывая высокие перегрузки, в конструкции статора целесообразнее применение изоляционных материалов класса «Монолит» с классом нагревостойкости не ниже 180 град. С. На корпус одета оребренная гильза для изоляции жидкостного контура. Гильза установлена на герметизирующие резиновые кольца, способные выдержать давление на среды до 5 атм и выше.

3. Ротор состоит из вала, с 4-мя пазами под установку шихтованного сердечника ротора, в наружных пазах которого установлены постоянные РЗМ магниты. Ротор возможно набирать из отдельных пакетов по 15 – 20 мм, также с отдельными магнитами. Магниты установлены на клей. Сверху магнитов на ротор одета рубашка из нержавеющей немагнитной стали толщиной 2 мм. Стальная рубашка обеспечивает целостность ротора при воздействии центробежных сил при частоте вращения 15 000 об/мин.

4. Задний подшипниковый щит также имеет стальную ступицу под верхнее кольцо подшипника, совместно с маслоотбойным кольцом на роторе образуется камера для закладки пластичной смазки в задний подшипник.

5. Передняя подшипниковая группа имеет нулевую степень свободы и должны быть собрана с учетом требований натяга дуплексного подшипника. Тем самым обеспечиваются долговечность и надежность переднего подшипникового узла. Размерная цепь по конструктивным элементам рассчитывается так, чтобы задний подшипник имел осевую степень свободы для компенсации линейных расширений при любом перепаде температур. Под задний подшипник устанавливается волнистая пружинная шайба для создания незначительного осевого натяга.

6. Вращающийся трансформатор выполнен в собственном герметичном корпусе и может быть смонтирован на изделие после сборки двигательной части. Трансформатор предварительно распаивается на герметичный разъем.

После установки корпуса с датчиком к разъему могут быть выведены датчики температурной защиты из внутреннего объема двигателя.

7. Выводные провода целесообразнее сделать из провода марки AWG и выпустить наружу через латунные гермовводы.

Масса изделия составляет порядка 32 кг.

Резерв на уменьшение массы – порядка 4 кг.

Конструкция двигателя представлена ниже.

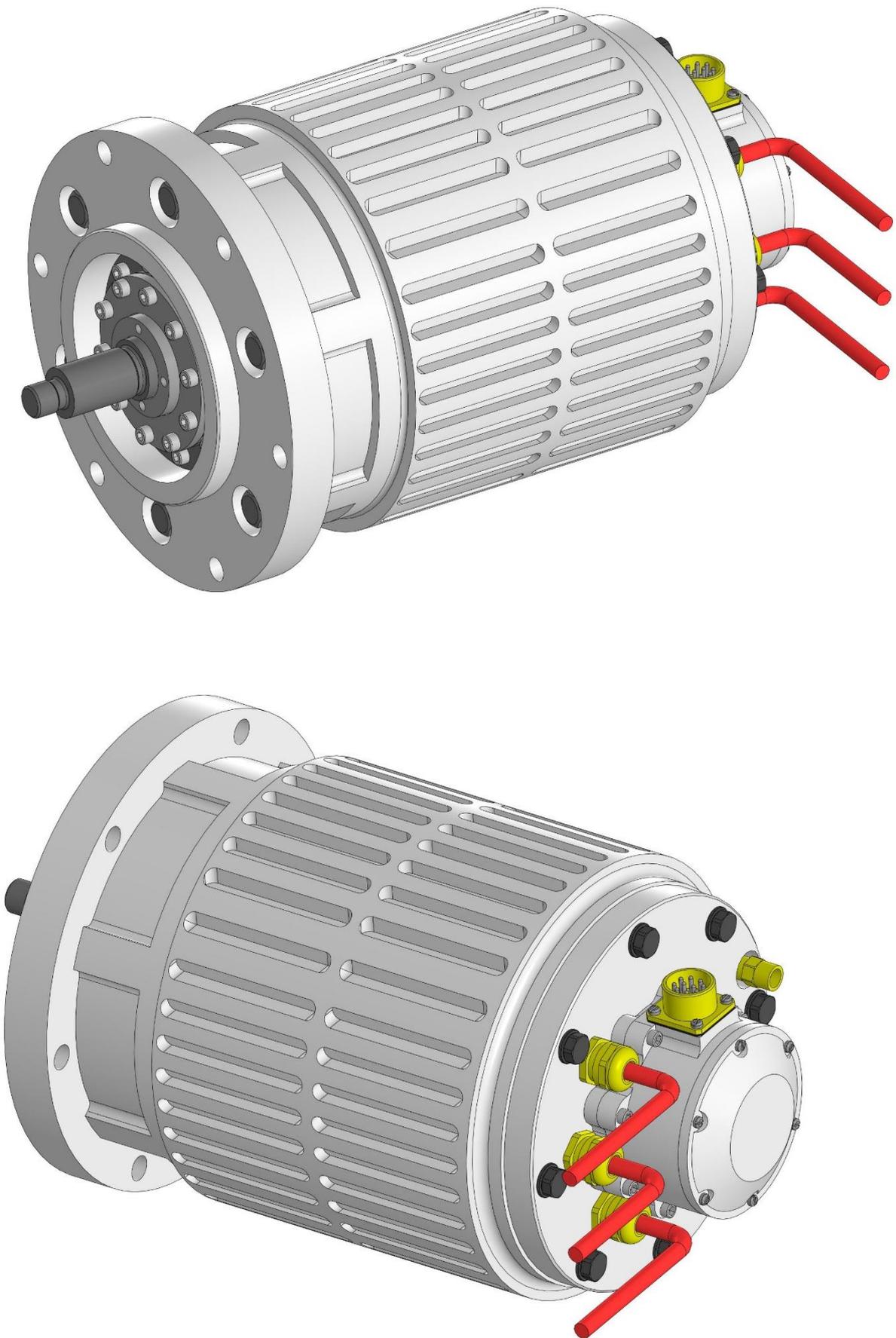


Рисунок – Внешний вид изделия

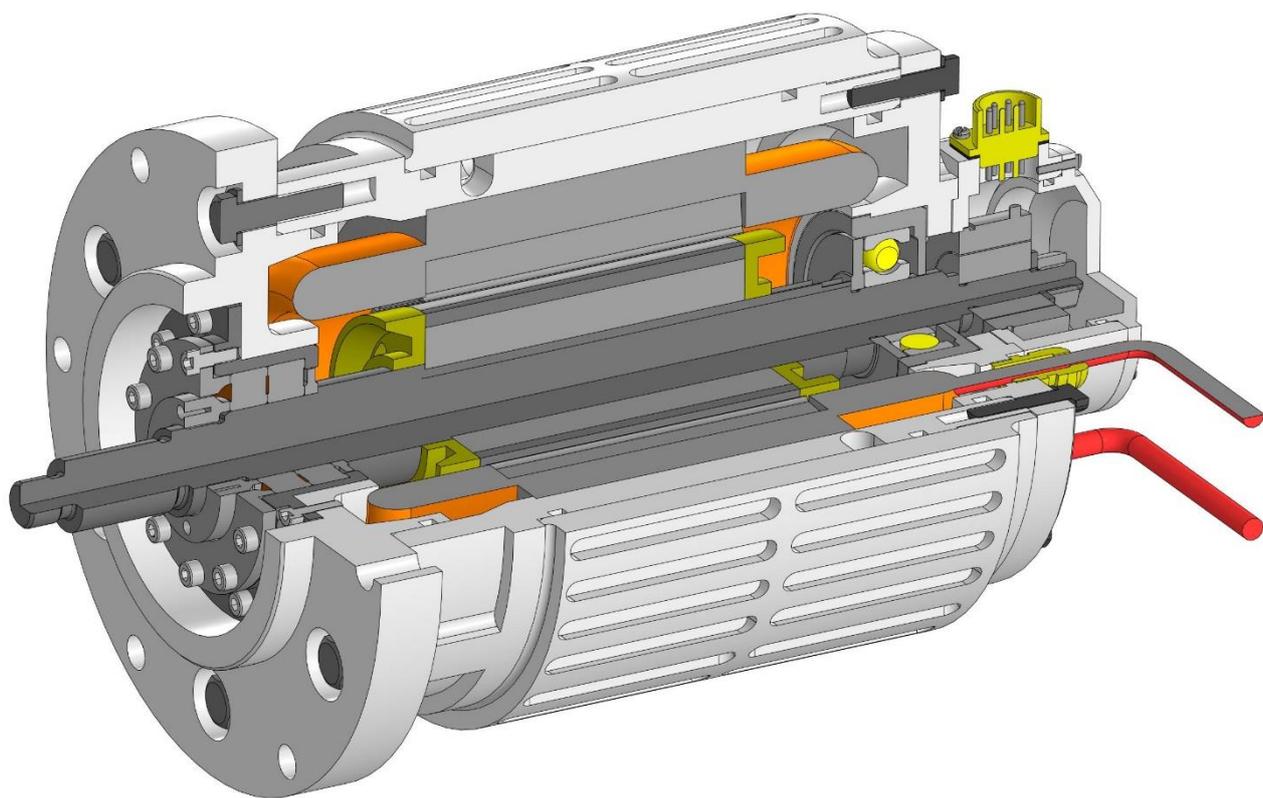


Рисунок – Разрез

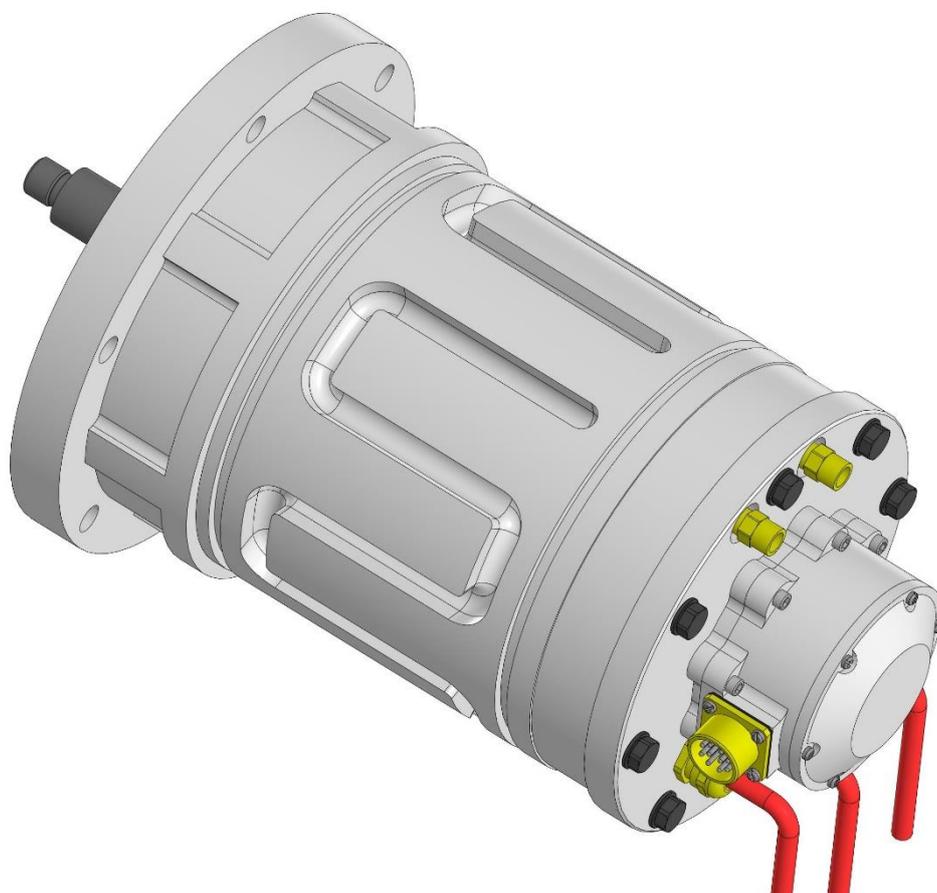


Рисунок – Изделие без оребренной «рубашки» под водяной контур

Технология сборки

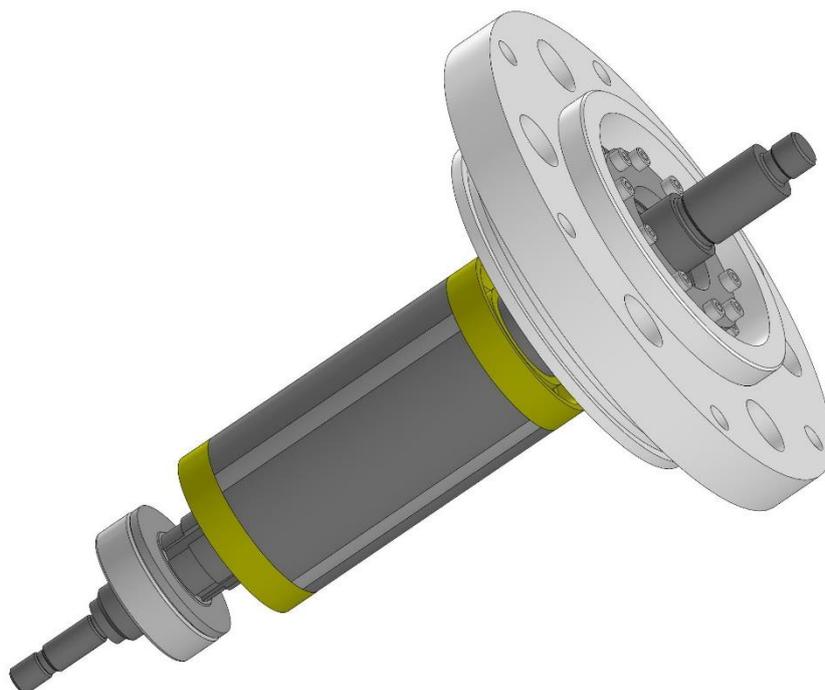


Рисунок – Сборка 1 «Ротор собран с передним подшипниковым узлом»

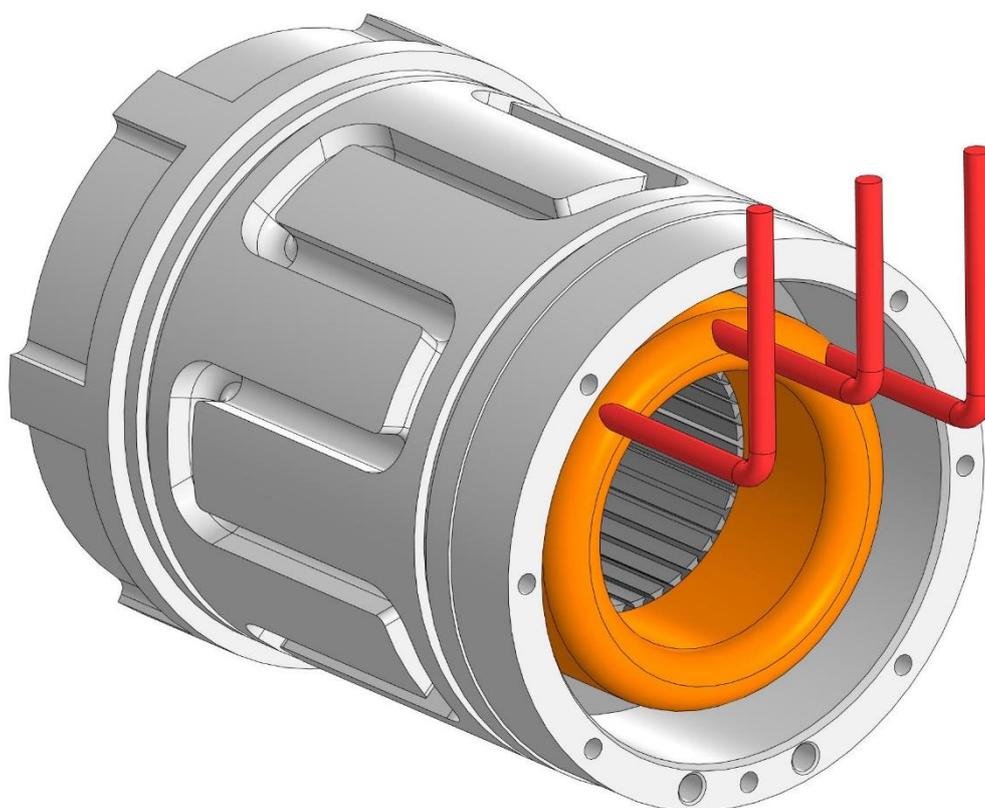


Рисунок – Сборка 2 «Статор установлен в корпус»

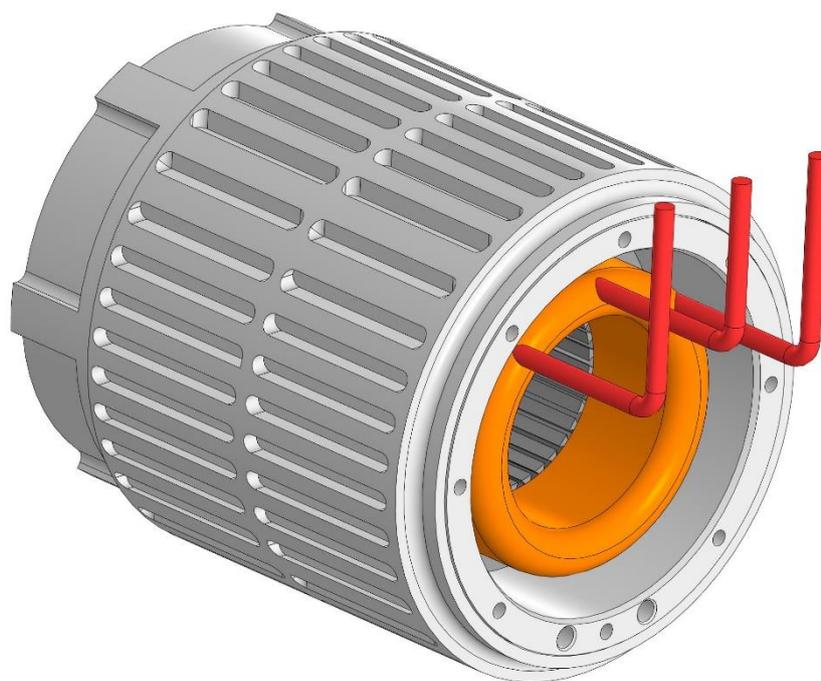


Рисунок – Сборка 2.1 «Установлена гильза»

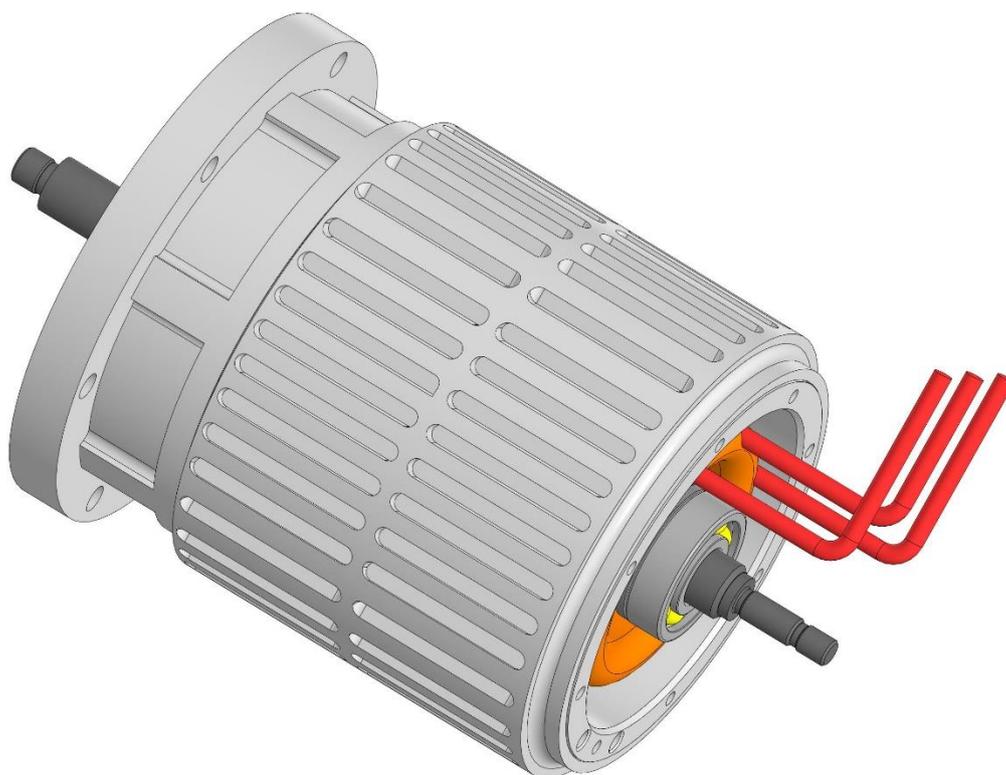


Рисунок – Сборка 3 «Ротор заведен в статор»



Рисунок – Щит задний со стальной ступицей

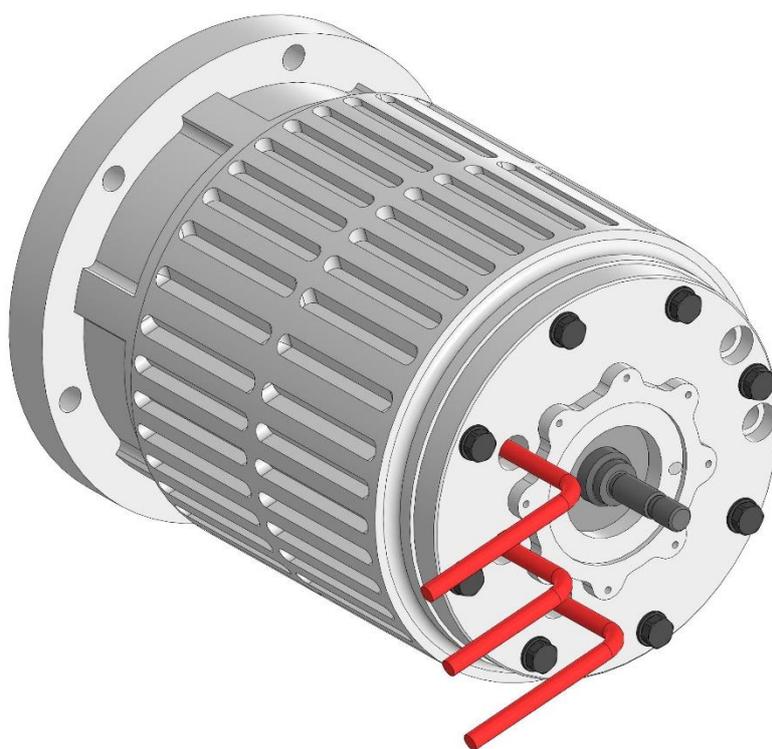


Рисунок – Сборка 4 «Установлен задний подшипниковый щит»

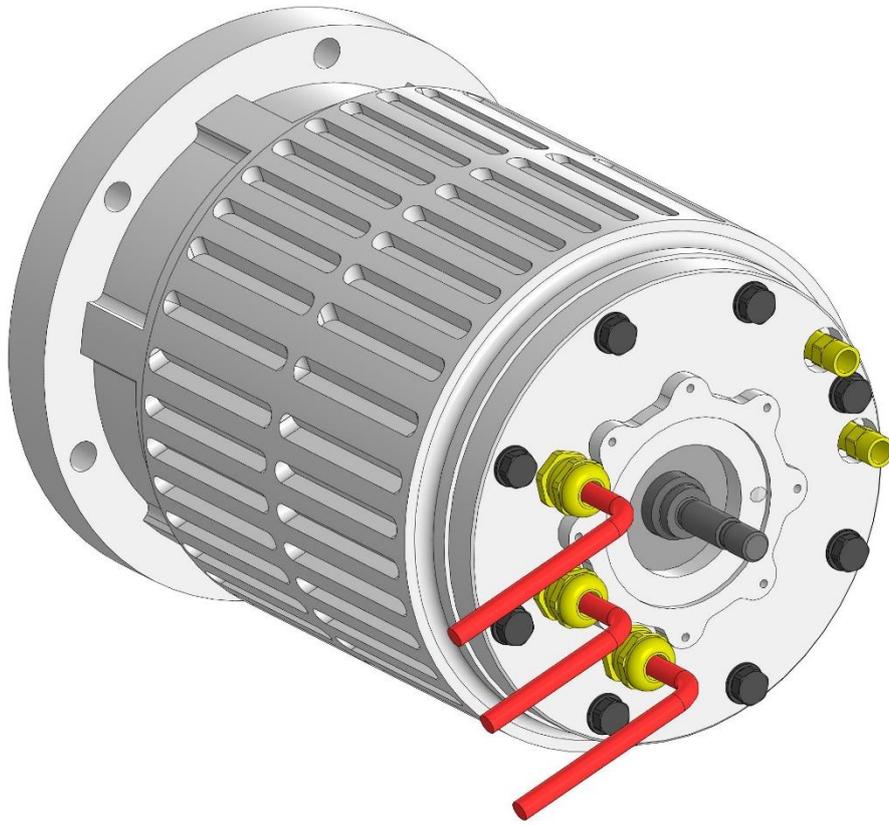


Рисунок – Сборка 5 «Установлены герметичные кабельные вводы и штуцера»

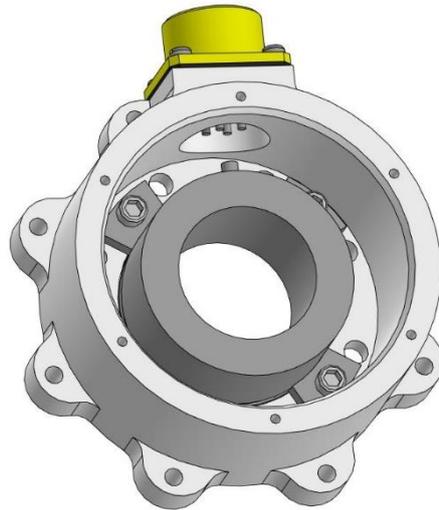


Рисунок – Сборка 6 «Статор СКВТ в собственном корпусе»

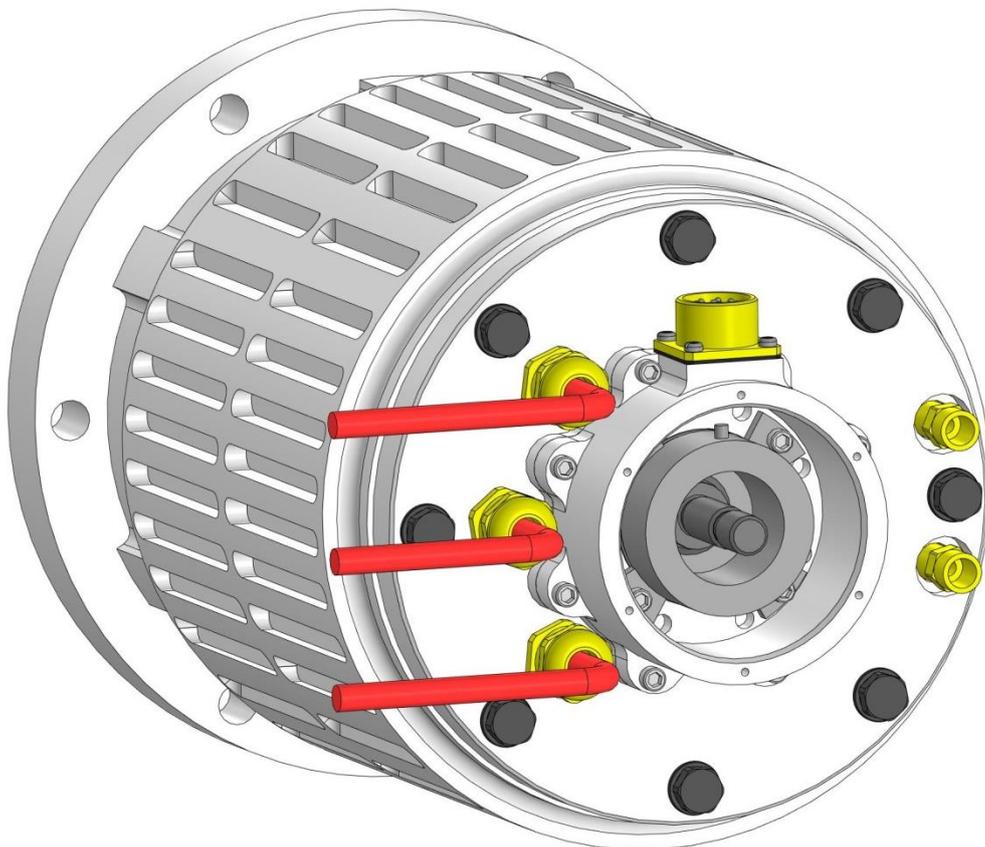


Рисунок – Сборка 7 «Установка корпуса СКВТ»

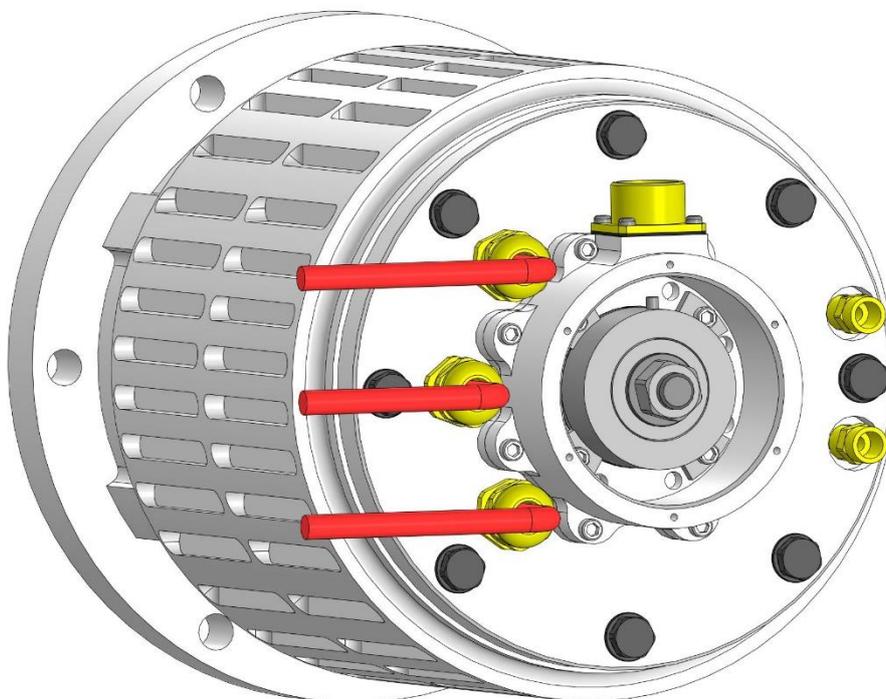


Рисунок – Сборка 8 «Установлен ротор СКВТ – законтрен шайбой и гайкой»

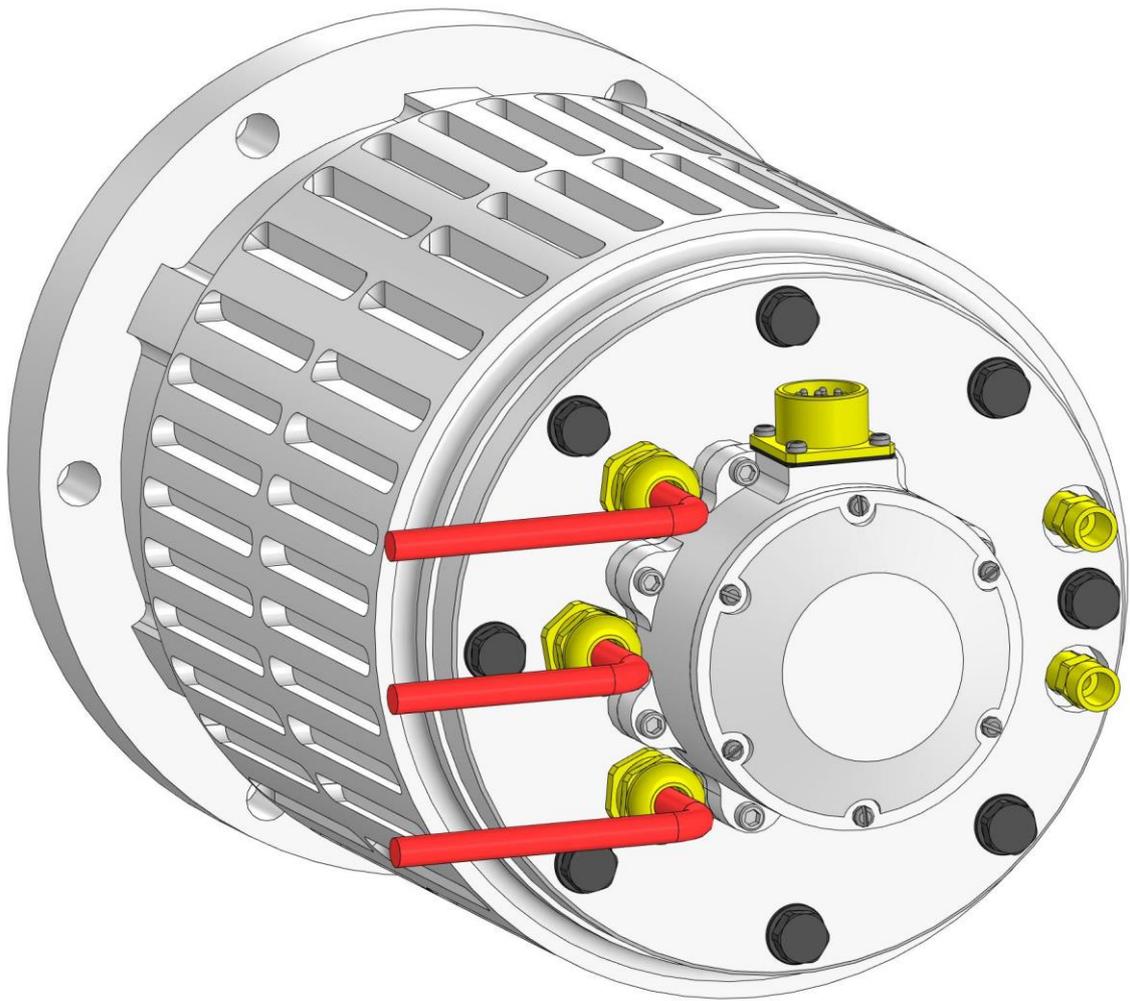


Рисунок – Сборка 9 «Финальная сборка, установлена задняя крышка»

Раздел – Предварительные расчеты
Модель 1

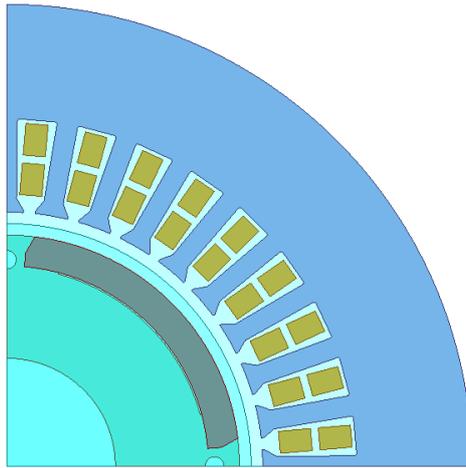


Рисунок 1 – Геометрия двигателя

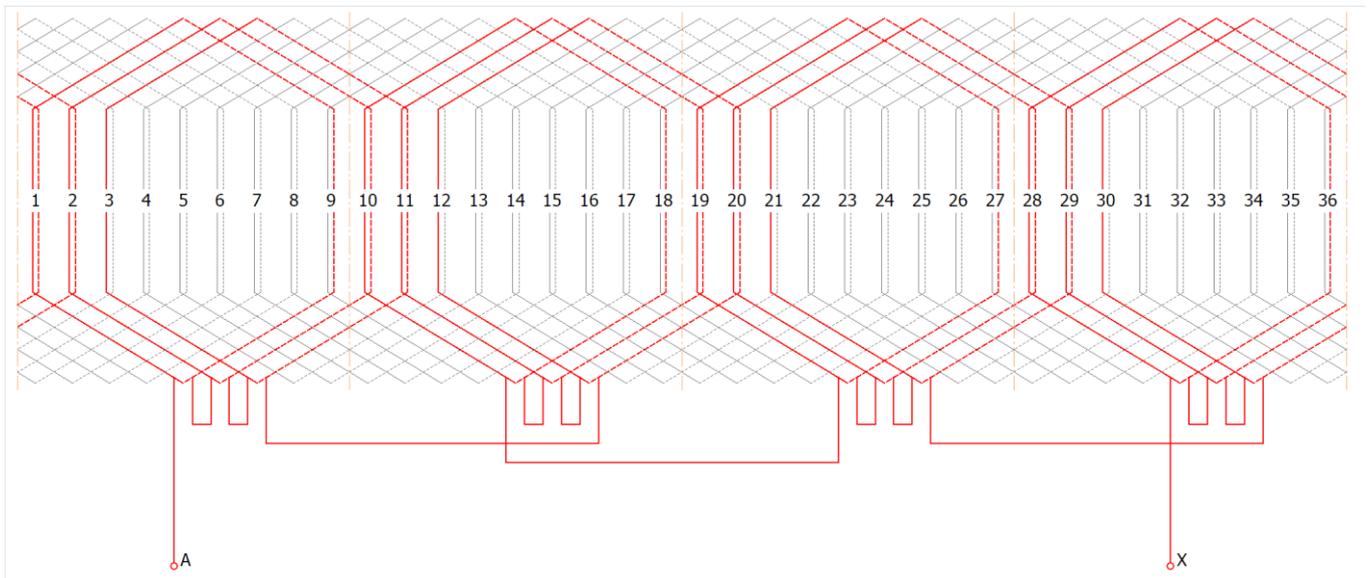


Рисунок 2 – Схема обмотки (фаза А) $Z=36$, $2p=4$, $y=8$, $m=3$

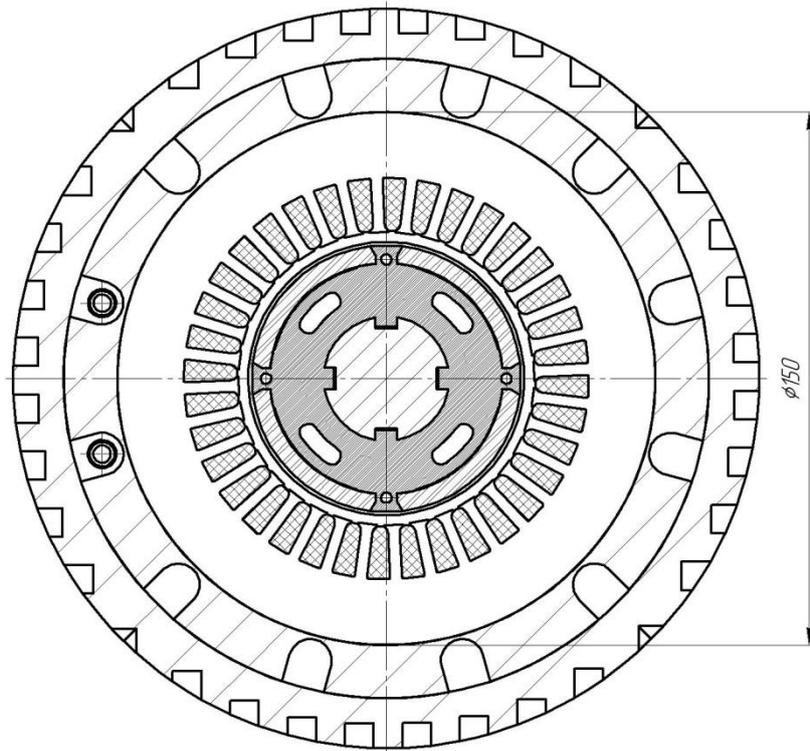


Рисунок - Геометрия

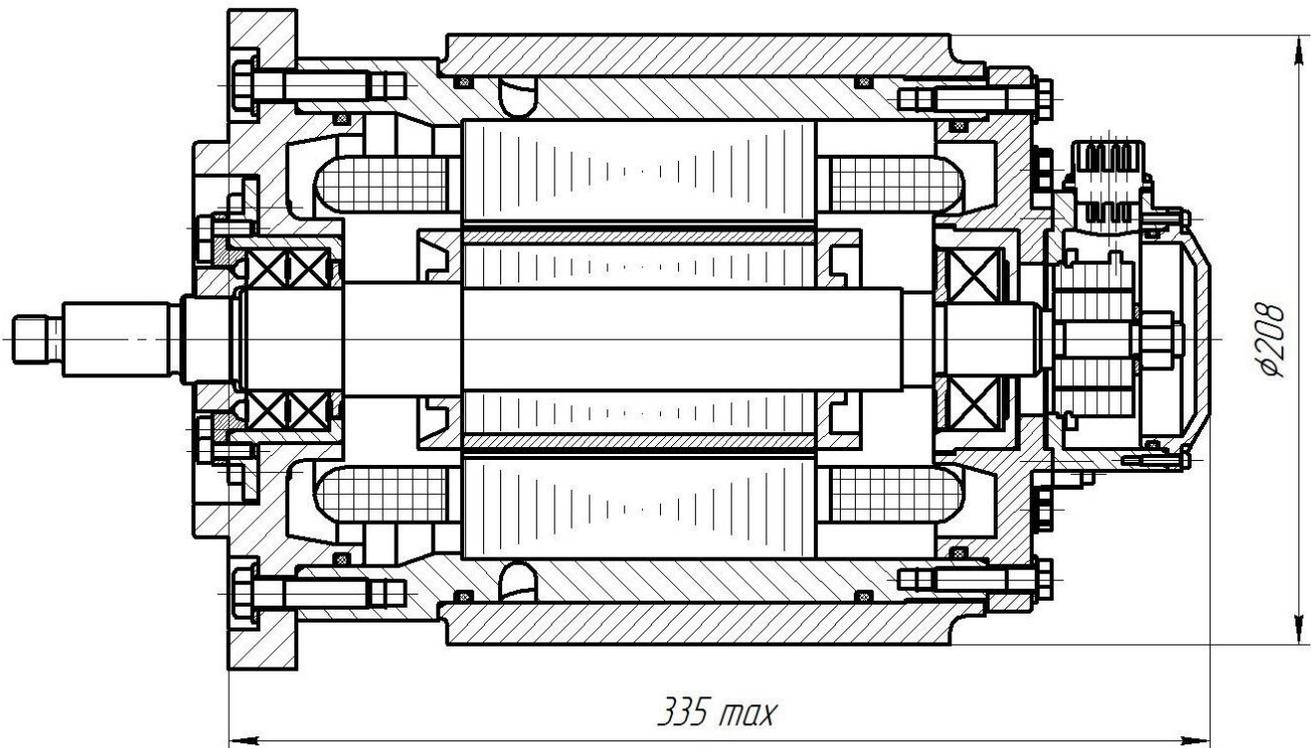


Рисунок – Предельные размеры

Таблица 1

R _{фазы}	U _{пит}	M _с	Коммутация от датчиков Холла					Примечание
			I _{НОМ}	n _{НОМ}	P ₁	P ₂	КПД	
Ом	В	Н·м	А	об/мин	кВт	кВт	%	
0,04	400	31.8	436.7	5031	53.51	31.56	59.0	Работа с нагрузкой в 50кВт
	400/3	47.75	305,59	1975	23,306	12,616	54,1	Работа с нагрузкой в 25 кВт

Таблица 2

R _{фазы}	U _{пит}	M _с	Векторное управление					Примечание
			I _{НОМ}	n _{НОМ}	P ₁	P ₂	КПД	
Ом	В	Н·м	А	об/мин	кВт	кВт	%	
0.04	400	31.8	201,3	9355,5	55,506	31,920	57,5	Работа с нагрузкой в 50кВт
	400/3	47.75	172.8	433.0	9.367	2.098	22.4	Работа с нагрузкой в 25 кВт

Таблица 3

w _к	R _{фазы} , Ом	U _{пит} , В	M _с , Н·м*	delta, град	Векторное управление с синусоидальным ШИМ и коррекцией угла коммутации					Примечание
					I _{НОМ}	n _{НОМ}	P ₁	P ₂	КПД	
					А	об/мин	кВт	кВт	%	
2	0.04	400	1	0	50,3	12932	10,881	2,12	19,5	Работа с нагрузкой в 50кВт
			32	-90	154,5	10387	50,346	31,455	62,5	
			32	-70	117,0	11136	50,33	34,89	69,3	
			32	-60	111,7	11254	50,132	35,941	71,7	
			32	-50	103,3	11413	50,125	36,305	72,4	
			32	-45	100,6	11193	48,605	34,888	71,8	
			32	-30	104,5	10993	47,46	33,17	69,9	
			32	-10	143,8	10077	48,671	30,23	62,1	
			32	-5	156,7	9591	49,145	28,413	57,8	
			32	0	171,8	9322	49,409	26,251	53,1	
			32	5	195,7	8934	51,398	26,276	51,1	
			32	10	211,9	8466	51,515	22,412	43,5	
3	0,085	400	32	-90	107,8	11742	44,930	38,951	86,7	Работа с нагрузкой в 50кВт
			32	-60	70,9	11225	38,139	36,159	94,8	
			32	-45	60,5	9768	31,671	28,934	91,4	
4	0,16	400	32	-100	103,2	12000	47,062	41,016	87,2	Работа с нагрузкой в 50кВт
			32	-90	82,6	12155	42,039	39,714	94,5	
			32	-60	50,7	9342	25,858	25,011	96,7	
			32	-45	37,5	7667	19,978	18,554	92,9	

Модель 2

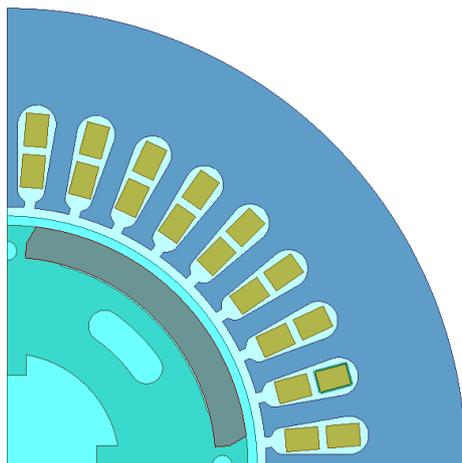


Рисунок 3 – Геометрия двигателя

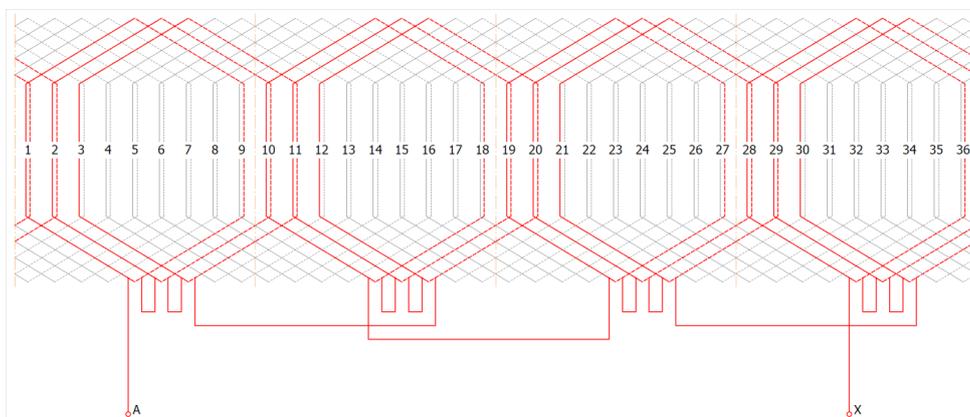


Рисунок 4 – Схема обмотки (фаза А) $Z=36$, $2p=4$, $y=8$, $m=3$

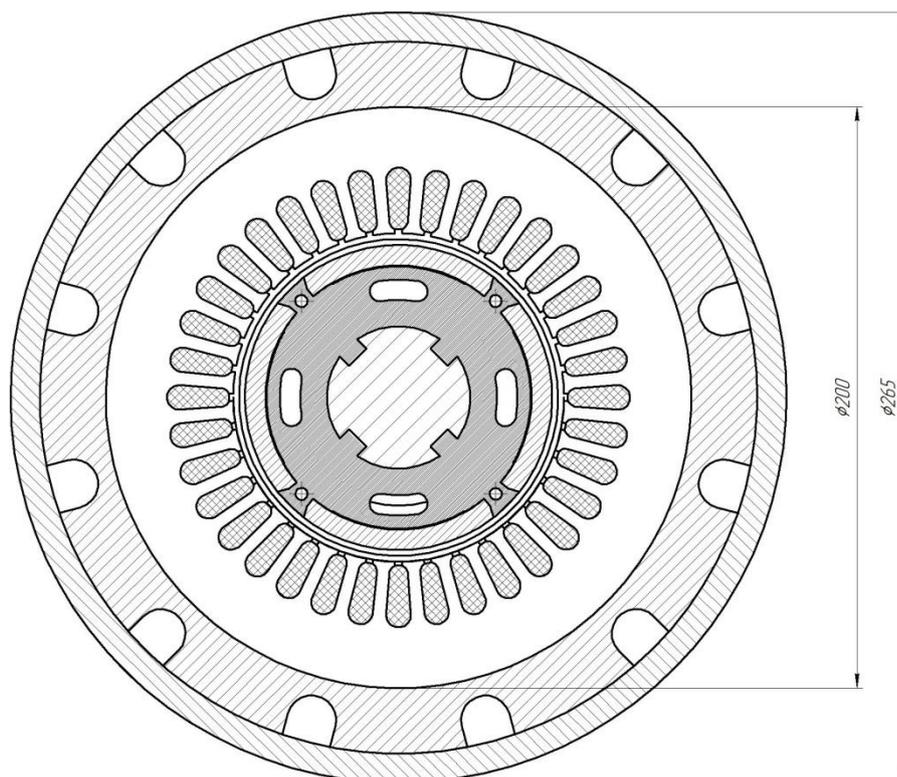


Рисунок - Геометрия

Таблица – 4 – Работа с датчиками Холла, датчики установлены на геометрической нейтрали

w _к	u _п	a	R _{фазы} , Ом	U _{пит.} , В	M _с , Н·м*	6-зонная коммутация					Примечание
						I _{НОМ} , А	n _{НОМ}	P ₁	P ₂	КПД	
						А	об/мин	кВт	кВт	%	
2	4	1	0,023	400	31.8	284,84	5431	41,623	36,711	88,2	Работа с нагрузкой в 50 кВт
2	4	1	0,023	400/3	47.75	203.67	2075	16.217	13.401	82.6	Работа с нагрузкой в 25 кВт
3	6	2	0.013	400	31,8	443.7	5489	43,977	35,949	81.7	Работа с нагрузкой в 50 кВт
3	6	2	0.013	400/3	47.75	342.38	2091	18.724	13.510	72.2	Работа с нагрузкой в 25 кВт

Таблица – 4.1 – Работа с датчиками Холла, со сдвигом с геометрической нейтрали – двигатель нереверсивный

w _к	u _п	a	R _{фазы} , Ом	U _{пит.} , В	M _с , Н·м*	delta, град	6-зонная коммутация					Примечание
							I _{НОМ} , А	n _{НОМ}	P ₁	P ₂	КПД	
							А	об/мин	кВт	кВт	%	
2	4	1	0,023	400	31.8	-45	344,49	9238	96,079	89,585	93,2	Работа с нагрузкой в 50 кВт
2	4	1	0,023	400/3	47.75	-45	297.57	3338	30.847	24.507	79.4	Работа с нагрузкой в 25 кВт
3	6	2	0.013	400	31,8	-45	415,89	9642	100,02	95,236	95,2	Работа с нагрузкой в 50 кВт
3	6	2	0.013	400/3	47.75	-45	370.72	3807	34.827	29.292	84.1	Работа с нагрузкой в 25 кВт

Таблица 5

w _к	u _п	a	R _{фазы} , Ом	U _{пит.} , В	M _с , Н·м*	delta, град	Векторное управление с синусоидальным ШИМ и коррекцией угла коммутации					Примечание
							I _{НОМ} , А	n _{НОМ} , об/мин	P ₁ , кВт	P ₂ , кВт	КПД	
											%	
2	4	1	0,023	400	31.8	0	217.8	3799	19.342	16.62	65.3	Работа с нагрузкой в 50 кВт
						-45	77.6	6184	20.090	19.314	96.1	
						-60	107.9	7563	23.574	23.478	99.6	
3	6	2	0.013	400	31,8	0	233	5308	24,695	17,248	69,8	Работа с нагрузкой в 50 кВт
						-45	106,3	8106	28,084	26,970	96,0	
						-60	123,9	8863	29,545	28,882	97,8	

Результаты

Модель 1 – Предварительные расчеты разработанной конструкции:

В таблице 1 представлены значения тока, мощности при коммутации от датчиков Холла, которые установлены на геометрической нейтрали. То есть машина реверсивная симметрично в обе стороны.

В таблице 2 представлены значения тока, мощности при векторном управлении без фазовой коррекции.

В таблице 3 представлены значения тока, мощности, при синусоидальной ШИМ с фазовой коррекцией (δ , град).

В таблицах 1 – 3 также приведены различные сочетания витков в обмотке статора.

Анализируя полученные результаты, становится видно, почему применение датчиков Холла в данной задаче не совсем обоснованно.

Анализ результатов расчета показывает, что в полученном объеме (разработанной конструкции) возможно получение требуемых характеристик при условии применения синусоидального ШИМ управления с фазовой коррекцией, при этом скорость под нагрузкой составит порядка 12 000 об/мин при развиваемой мощности на валу до 40 кВт.

Дальнейшее увеличение скорости до 14 000 – 15 000 об/мин потребует введение в цифровую модель электропривода режима ослабления поля, за счет управления током подмагничивания.

Рост скорости при ослаблении поля будет сопровождаться повышением потребляемого тока.

Модель 2 – Предварительный расчет двигателя с увеличенным диаметром на 30%. Длина сердечника при этом осталась без изменений (конструкция не прорабатывалась.)

В целом электродвигатель получил значительный резерв мощности, потери на нагрев снизились практически в два раза.

Двигатель также нуждается в индивидуальном подборе обмоточных данных, поиска своего угла фазового сдвига и введения режима ослабления поля.

Предложения по корректировке требований

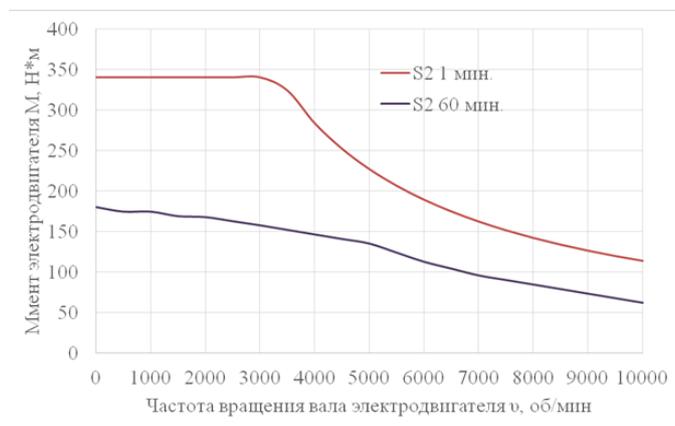
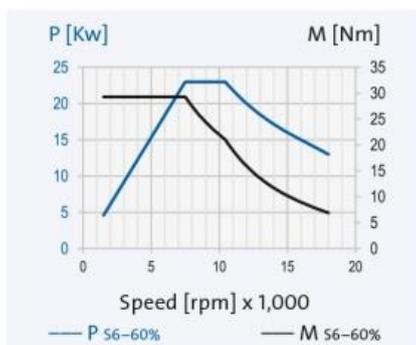
Чтобы развить требуемую мощность 50 кВт при 15 000 об/мин электродвигатель должен иметь размеры примерно на 20 % больше чем разработанная конструкция. При этом масса увеличится ориентировочно на 10 кг.

Сейчас масса изделия составляет порядка 32 кг.

1. В целом предлагается уточнить требования технического задания в части уменьшения скорости до 8000 – 10 000 об/мин, так как изготовление электродвигателя на 15 000 об/мин технологически сложная задача в части точности изготовления деталей и сборочных узлов. Снижение частот вращения также будет способствовать увеличению полюсности с $2p=4$ до $2p=6$ или 8 с повышением нагрузочной способности в зоне малых частот вращения.

2. Также рекомендуется привести тяговую характеристику к виду, который справочно представлен на рисунках ниже.

Двигатель предназначен для работы в режиме максимального момента в зоне до 3000 об/мин (при условии что верхняя граница скорости снижена до 8000-10 000 об/мин) с последующим переходом в номинальный режим работы.



Если допустить что п.1 и 2 принимаются, то в разработанной конструкции возможно получить момент вращения порядка 50 Н*м на частотах вращения до 3000 об/мин с последующим снижением его до 30 – 35 Н*м при 5000 – 7500 об/мин и далее до 20 Н*м на 8000 – 10 000 об/мин