

Министерство образования и науки Российской Федерации
Федеральное государственное автономное образовательное учреждение
высшего образования
**«ЮЖНО-УРАЛЬСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ
(НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ)»**
Институт «Политехнический», факультет «Энергетический»
Кафедра «Теоретические основы электротехники»
Направление подготовки 13.03.02. «Электроэнергетика и электротехника»

ДОПУСТИТЬ К ЗАЩИТЕ

Заведующий кафедрой теоретических
основ электротехники, д.т.н.

_____/С.А. Ганджа/

“ ____ ” _____ 2017 г.

**Асинхронизированный синхронный генератор 10кВт, 220 В,
60 об/мин, для ветроэнергетической установки**

**ПОЯСНИТЕЛЬНАЯ ЗАПИСКА К ВЫПУСКНОЙ
КВАЛИФИКАЦИОННОЙ РАБОТЕ БАКАЛАВРА**

ЮУрГУ-13.03.02.2017.260.07 ПЗ ВКР

Руководитель проекта:
Профессор, д.т.н.

_____/С.А. Ганджа/

“ ____ ” _____ 2017 г.

Автор проекта
студент группы П-478

_____/Г.А. Литвинчук/

“ ____ ” _____ 2017 г.

Нормоконтролер
Профессор, д.т.н.

_____/С.А. Ганджа/

“ ____ ” _____ 2017 г.

Челябинск 2017 г.

АННОТАЦИЯ

Литвинчук Г.А. Асинхронизированный
синхронный генератор 10 кВт, 220 В, 60 об/мин. –
Челябинск: ЮУрГУ, П-478; 2017, 53 с., 27 ил.,
библиогр. список – 3 наим., 1 прил., 2 таблицы.

Задачей выпускной квалификационной работы является расчет асинхронизированного синхронного генератора мощностью 10 кВт для ветроустановки. Для выполнения данной задачи была взята за основу методика И.П. Копылова, в сочетании с рекомендациями, которые приведены в библиографическом списке. В объеме этого расчета, в соответствии с исходными данными, были определены главные размеры машины, размеры пазово-зубцовой зоны ротора и статора, произведен расчет магнитной цепи электрических и тепловых потерь, рассчитаны рабочие характеристики. выполнен поверочный тепловой расчет. Для анализа машины был использован «ANSYS Maxwell».

Аналитические расчеты производились с помощью программ «Mathcad 15.0».

В заключении сделаны выводы о целесообразности проведенных исследований и расчетов.

ЮУрГУ-13.03.02.2017.260.07 ПЗ				
<i>Изм.</i>	<i>Лист</i>	<i>№ докум.</i>	<i>Подпись</i>	<i>Дат</i>
<i>Разраб.</i>	Литвинчук			
<i>Провер.</i>	Ганджа			
<i>Реценз</i>				
<i>Н. Контр.</i>	Ганджа			
<i>Утверд.</i>	Ганджа			
Асинхронизированный синхронный генератор 10 кВт, 220В, 60 об/мин, для ветроэнергетической установки				
		<i>Лит.</i>	<i>Лист</i>	<i>Листов</i>
			4	

ОГЛАВЛЕНИЕ

ВВЕДЕНИЕ.....	7
Ветроэнергетика в России.....	7
Обеспечение труднодоступных районов РФ энергией ветроустановок	9
Выбор базового варианта	11
1. ПРИНЦИП РАБОТЫ ГЕНЕРАТОРА	13
2 РАСЧЁТ АСИНХРОНИЗИРОВАННОГО СИНХРОННОГО ГЕНЕРАТОРА	17
2.1 Определение главных размеров	17
2.2 Расчет параметров обмотки статора	18
2.3 Расчет размеров зубцовой зоны статора.....	21
2.4 Определение величины воздушного зазора	24
2.5 Расчет размеров зубцовой зоны ротора	24
2.6 Расчет магнитной цепи.....	28
2.7 Определение параметров обмотки статора для установившегося режима работы машины	33
2.8 Определение МДС обмотки возбуждения при нагрузке	35
2.9 Расчет обмотки возбуждения.....	36
2.10 Определение массы активных материалов.....	38
2.11 Определение потерь и КПД генератора.....	39
2.12 Расчет рабочих характеристик генератора.....	40
3 СПЕЦИАЛЬНАЯ ЧАСТЬ.....	44
3.1 Общие сведения о Ansoft.....	44
3.2 Обзор пакета Ansoft Maxwell	45
3.3 Программные модули Ansys Maxwell.....	45
3.4 Моделирование в программе Maxwell.....	46

					ЮУрГУ-140400.62.2016.142. ПЗ ВКР	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		5

4 ЭКОНОМИЧЕСКАЯ ЧАСТЬ	52
4.1. Определение конкурентоспособности и стоимости генератора.....	52
ЗАКЛЮЧЕНИЕ	53
БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК	54
ПРИЛОЖЕНИЕ А – СБОРОЧНЫЙ ЧЕТРЕЖ	55

ВВЕДЕНИЕ

Ветроэнергетика в России

Сегодня в России суммарная установленная мощность ВЭУ составляет около 16 МВт. В стране действуют 9 ветроэнергетических станций установленной мощностью от 0,2 до 5,6 МВт. Среднегодовая выработка электроэнергии всеми ВЭУ составляет 12,8 кВт ч/год.

Рынок ветроэнергетики в России имеет высокий потенциал развития, который характеризуется значительными ветроэнергетическими ресурсами:

- общий ветропотенциал страны оценивается в 2000-3000 ТВтч /год;
- экономический ветропотенциал оценивается в 200-300 млрд кВтч /год;



Рис.1 – Ветроустановки в Мурманской области.

Понимая актуальность проблемы и необходимость развития отрасли, правительство РФ на заседании 23 мая 2013 одобрило нормативные акты, стимулирующие использование возобновляемых источников энергии и локализуемых на территории страны производство оборудования для такой генерации. Был одобрен проект дополнений, касающийся целевых показателей установленной мощности по годам и видам ВИЭ с целью заключения долгосрочных договоров о предоставлении мощности и определения предельных капитальных затрат для проведения конкурсного отбора

					ЮУрГУ-140400.62.2017.260. ПЗ ВКР	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		7

инвестиционных проектов. Также правительством был одобрен проект постановления, определяющий ценовые параметры торговли мощностью объектов генерации на основе ВИЭ, и проект изменений, касающийся установления требований по локализации для объектов такой генерации. В целом все аналитики сошлись на том, что это благотворно скажется на развитии отрасли, привлечет новые инвестиции и увеличит мощность энергетического парка ВИЭ (до 2020г. предусматривается ввод 6,2 ГВт генерации на основе ВИЭ, что позволит увеличить долю такой генерации в текущем энергобалансе до 2,5%, из них доля ветровых электростанций составит порядка 1%).

По признанию российских и западных экспертов у России есть все шансы выйти на лидерские позиции на рынке ветроэнергетики. Но пока эта сфера в нашей стране будет, скорее всего, развиваться несколько по иной модели, нежели в Европе, в силу большой территории, специфики расселения людей и расположения различных отраслей промышленности.

					ЮУрГУ-140400.62.2017.260. ПЗ ВКР	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		8

Обеспечение труднодоступных районов РФ энергией ветроустановок

Жизненно важной характеристикой энергетики в экстремальных природно-климатических условиях является надежность работы всех звеньев системы энергообеспечения. От этого зависит не только эффективность функционирования народного хозяйства, но и здоровье и жизнь людей, которые в случае прекращения энергоснабжения, оказываются один на один с суровой природой без главной системы жизнеобеспечения. В России проблемными для энергоснабжения регионами являются северные и восточные удаленные территории.



Рис. 2 – Труднодоступные районы РФ.

Это районы, лежащие на землях, подверженных вечной мерзлоте, расположенные в труднодоступных местах. Энергообеспечение таких потребителей может быть осуществлено либо за счет централизованного энергоснабжения, либо путем создания децентрализованных зон. Основными

					ЮУрГУ-140400.62.2017.260. ПЗ ВКР	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		9

проблемами энергоснабжения децентрализованных потребителей являются дальний транспорт топлива, с учетом ограниченности сроков сезонного завоза в труднодоступные районы. Низкий уровень развития транспортной инфраструктуры, многозвенность процесса завоза топлива приводят к высоким потерям и многократному его удорожанию. Эксплуатация большей частью устаревших и физически изношенных автономных энергоисточников, определяет их неудовлетворительное техническое состояние, низкую экономичность, что приводит к недостаточной надежности энергоснабжения и неоправданно высоким финансовым затратам. В Сибири и горных районах благодаря наличию большого количества рек энергетический дефицит успешно восполняется использованием гидроэлектростанций. Но в районах побережья Северного Ледовитого океана подобный вариант утрачивает свою привлекательность из-за замерзания зимой рек. Местами осуществление невозможно, поскольку для работы гидроэлектростанции необходимо наличие довольно большого перепада высот, являющегося неотъемлемой частью любого гидроэнергетического объекта. Большинство этих регионов находятся в зоне децентрализованного энергоснабжения и существует за счет локальных энергетических систем, так как энергосистема охватывает всего 15% территории страны. Строительство тепловых энергетических станций на органическом топливе в условиях холодного климата и вечной мерзлоты становится экономически нецелесообразным, поскольку срок их окупаемости слишком долг. Кроме того, месторождения нефти и газа могут находиться на большом расстоянии от мест, где нужна электроэнергия. Во многие прибрежные северные районы топливо завозится по морю. Себестоимость электрической и тепловой энергии, вырабатываемой на местных дизельных электростанциях и котельных, оказывается в несколько раз выше. Другим проблемным регионом с точки зрения энергообеспечения является Калининградская область. В данный момент она получает электроэнергию из России, которая идет через территорию Литвы. В случае возникновения нештатной ситуации область рискует попасть в зависимость от стран

					ЮУрГУ-140400.62.2017.260. ПЗ ВКР	<i>Лист</i>
<i>Изм.</i>	<i>Лист</i>	<i>№ докум.</i>	<i>Подпись</i>	<i>Дата</i>		10

Европейского Союза. Очевидным путем повышения энергоэффективности таких зон является максимальное использование местных возобновляемых энергоресурсов. Внедрение технологий возобновляемой энергетики, при разумном использовании может оказать заметную помощь в энергообеспечении труднодоступных регионах.

Выбор базового варианта

Выбор данной темы был сделан исходя из актуальности проекта и разработок в данном направлении. Ветроэнергетика в наше время бурно развивается. По данным GWEC (Глобального совета по ветроэнергетике) энергия, вырабатываемая ветроустановками в мире увеличивается в два раза каждые три года. Из этого следует что целесообразно и необходимо вкладывать в эту отрасль инженерные и конструкторские усилия для решения главной проблемы в ветроэнергетике.

Главная проблема ветроэнергетики в изменении скорости и направления ветра, вследствие чего изменяется скорость вращения ротора генератора и вырабатываемая им энергия будет различаться по амплитуде частоте и фазе, эта энергия называется грязной. Грязную энергию невозможно использовать и стоит искать и развивать способы превращения ее в чистую энергию соответствующую стандарту. На сегодняшний день существуют способы превращения, но они морально устарели.

Использование в качестве генератора асинхронного генератора с короткозамкнутым ротором имеет свои недостатки хоть он и получает стандарт напряжения на выходе, как известно из теории асинхронный двигатель для своего возбуждения забирает из сети реактивную мощность тем самым резко снижая коэффициент мощности и полезного действия сети.

Использование в качестве генератора синхронного генератора с постоянными магнитами не дает стандартную частоту напряжение на выходе и из-за нескольких ступенях преобразования резко увеличиваются потери и ухудшается КПД генератора.

					ЮУрГУ-140400.62.2017.260. ПЗ ВКР	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		11

В качестве генератора предлагается уникальная электрическая машина: бесконтактный асинхронизированный синхронный генератор. Применение этого генератора позволит синхронизировать частоту напряжения генератора с частотой сети при различных частотах вращения, исключить потребление реактивной энергии из сети, исключить аккумуляторную батарею, получить качественную выходную электроэнергию с минимальным спектром высших гармоник.

Целью данного дипломного проекта является расчёт асинхронизированного синхронного генератора 10 кВт для преобразования энергии ветра в электрическую энергию с минимальными потерями

Задачами, поставленными в рамках проекта, являются расчёт асинхронизированного синхронного генератора, создание модели асинхронизированного синхронного генератора в программной среде ANSYS MAXWELL, для оценки выбранного метода проектирования генератора.

1. ПРИНЦИП РАБОТЫ ГЕНЕРАТОРА

В качестве генератора предлагается уникальная электрическая машина: бесконтактный асинхронизированный синхронный генератор с электронной системой управления. Ротор и статор генератора трехфазные. Применение этого генератора позволит синхронизировать частоту напряжения генератора с частотой сети при различных частотах вращения, исключить потребление реактивной энергии из сети, исключить аккумуляторную батарею, получить качественную выходную электроэнергию с минимальным спектром высших гармоник. Главной особенностью является система автоматического управления. Она состоит из высоковольтного бесконтактного генератора комбинированного возбуждения с постоянными магнитами, питающего обмотку возбуждения основной машины, и электронного блока управления. Это позволяет получить стандартизованную частоту выходного напряжения, независимую от частоты вращения генератора.

Таким образом, предлагаемая модель состоит из двух электрических машин, объединённых в один общий корпус. Данная конструкция является бесконтактной, что существенно повышает срок службы всей установки.

Также в установке используется уникальная ветроустановка с вертикальной осью вращения которая эффективно использует поток ветра и не нуждается в редукторе и поворотном механизме в сторону максимального потока ветра. И из-за этого резко увеличивается ее ресурс надежность и упрощается ремонт. Ветроустановка представлена на рисунке 3.

					ЮУрГУ-140400.62.2017.260. ПЗ ВКР	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		13



Рис.3 – Ветроустановка с вертикальной осью вращения.

<i>Изм.</i>	<i>Лист</i>	<i>№ докум.</i>	<i>Подпись</i>	<i>Дата</i>

ЮУрГУ-140400.62.2017.260. ПЗ ВКР

Лист

14

Трехмерная модель генератора с системой возбуждения представлена на рисунке 4.

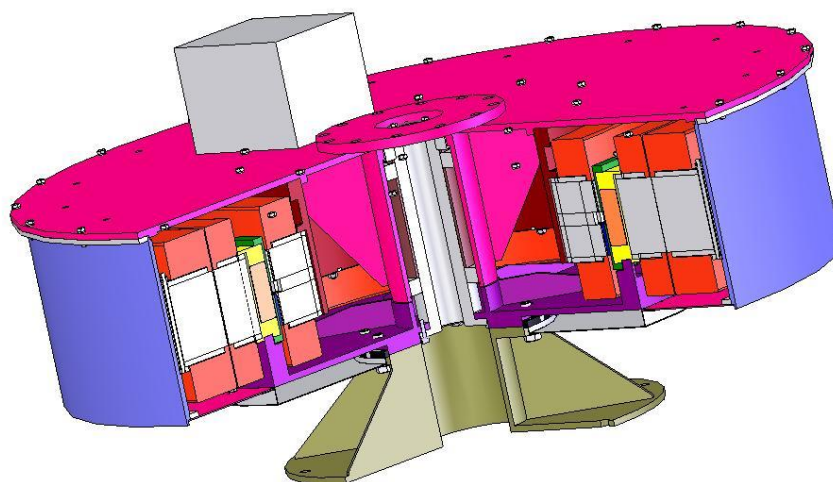


Рис.4 – Трехмерная модель генератора с сборе.

Эскиз асинхронизированного генератора без системы возбуждения приведен на рисунке 5.

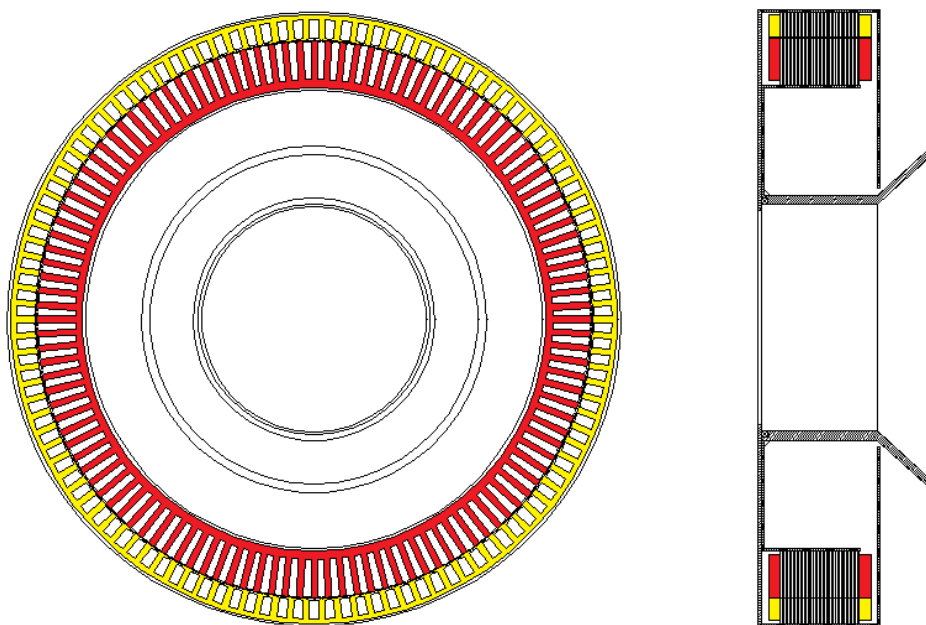


Рис.5 – Эскиз генератора.

Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата

Электрическая блок-схема ветроэнергетической установки при работе в режиме параллельного соединения с внешней стационарной сетью приведена на рисунке 6.

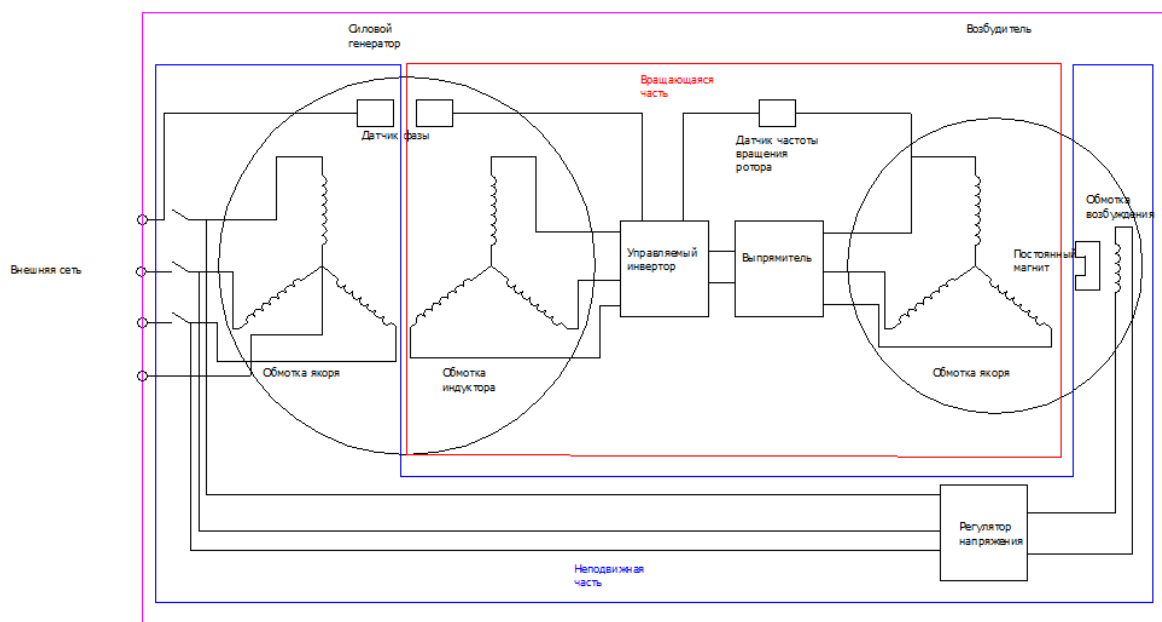


Рис.6 – Электрическая блок схема.

Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата

2 РАСЧЁТ АСИНХРОНИЗИРОВАННОГО СИНХРОННОГО ГЕНЕРАТОРА

2.1 Определение главных размеров

Расчет электрической машины начинается с определения главных размеров: наружного диаметра статора и расчетной длины.

Электромагнитная мощность $P_{\text{эл.маг}}$:

$$P_{\text{эл.маг}} = \frac{k_E \cdot P_H}{\cos\varphi}; \quad (1)$$

$$P_{\text{эл.маг}} = \frac{1.11 \cdot 10000}{0.8} = 13880 \text{ Вт};$$

где k_E – коэффициент, представляющий собой отношение ЭДС в якоре при номинальной нагрузке к номинальному напряжению;

P_H – номинальная мощность генератора, $P_H = 10000$ Вт

$\cos\varphi$ – входное напряжение, $\cos\varphi = 0,8$

Наружный диаметр статора D_a ;

$$D_a = 0.96 \text{ м}; \quad (2)$$

Расчетная длина l_δ :

$$l_\delta = \frac{6.1 \cdot P_{\text{эл.маг}}}{\alpha_\delta \cdot k_\delta \cdot k_{ob1} \cdot B_\delta \cdot A \cdot D_a^2 \cdot n}; \quad (3)$$

$$l_\delta = \frac{6.1 \cdot 13880}{0.71 \cdot 1.11 \cdot 0.866 \cdot 0.55 \cdot 30000 \cdot 0.96^2 \cdot 60} = 0.136 \text{ м.}$$

где α_δ – расчетный коэффициент полюсного перекрытия, $\alpha_\delta = 0,71$;

k_δ – коэффициент формы поля, $k_\delta = 1,11$;

k_{ob1} – обмоточный коэффициент обмотки статора, $k_{ob1} = 0,866$

B_δ – максимальное значение магнитной индукции в воздушном зазоре при номинальной нагрузке, $B_\delta = 0,55$ Тл;

A – линейная нагрузка, $A = 30000$ А/м

Число пар полюсов p :

$$p = \frac{60 \cdot f}{n}; \quad (4)$$

$$p = \frac{60 \cdot 50}{60} = 50.$$

2.2 Расчет параметров обмотки статора

Число зубцов статора Z_1 :

$$Z_1 = 2 \cdot p \cdot m_1 \cdot q_1; \quad (5)$$

$$Z_1 = 2 \cdot 50 \cdot 3 \cdot 0.4 = 120.$$

где m – число фаз статора, $m = 3$;

q_1 – число пазов на полюс и фазу статора, $q_1 = 3$.

Полюсное деление статора τ ;

$$\tau = \frac{\pi \cdot D_a}{2p}; \quad (6)$$

$$\tau = \frac{3.14 \cdot 0.96}{2 \cdot 50} = 0,03 \text{ м.}$$

Зубцовое деление статора t_1 :

$$t_1 = \frac{\pi \cdot D_a}{Z_1}; \quad (7)$$

$$t_1 = \frac{3.14 \cdot 0.96}{120} = 0.25 \text{ м;}$$

Номинальный ток обмотки статора определяем исходя из заданных номинальных значений мощности и напряжения:

Номинальный ток обмотки статора $I_{1Н}$:

$$I_{1Н} = \frac{P_{\text{эл.маг}}}{3 \cdot \cos\varphi \cdot U_H}; \quad (8)$$

$$I_{1Н} = \frac{13880}{3 \cdot 0,8 \cdot 220} = 18.94 \text{ А.}$$

где U_H – номинальное фазное напряжение генератора

					ЮУрГУ-140400.62.2017.260. ПЗ ВКР	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		18

Число эффективных проводников в пазу статора u_{Π} :

$$u_{\Pi} = \frac{\pi \cdot a \cdot D_a \cdot A}{Z_1 \cdot I_{1H}}; \quad (9)$$

$$u_{\Pi} = \frac{3.14 \cdot 1 \cdot 0.96 \cdot 30000}{120 \cdot 18.94} = 39.81.$$

где a – число параллельных ветвей обмотки статора, $a = 1$.

Округляем число эффективных проводников в пазу статора до ближайшего целого числа:

$$u_{\Pi} = 40 \quad (10)$$

С учетом принятого округленного числа эффективных проводников в пазу статора, корректируем значение линейной нагрузки статора:

$$A = \frac{Z_1 \cdot u_{\Pi} \cdot I_{1H}}{\pi \cdot D_a \cdot a}; \quad (11)$$

$$A = \frac{120 \cdot 40 \cdot 18.94}{3.14 \cdot 0.96 \cdot 1} = 30140 \text{ А/м.}$$

Отклонение скорректированного значения линейной нагрузки статора от принятого ранее составляет 1 %, что свидетельствует о приемлемой величине зубцового деления статора.

Плотность тока в обмотке статора J_1 :

$$J_1 = \frac{a J_1}{A}; \quad (12)$$

$$J_1 = \frac{10 \cdot 10^8}{30000} = 3.318 \cdot 10^6 \text{ А/м};$$

где $a J_1$ – характеризует тепловую нагрузку обмотки статора, $a J_1 = 1 \cdot 10^9$

Сечение эффективного проводника в обмотке статора $q_{\text{ЭФ}}$:

$$q_{\text{ЭФ}} = \frac{I_{1H}}{a \cdot J_1}; \quad (13)$$

$$q_{\text{ЭФ}} = \frac{18.94}{1 \cdot 3.318 \cdot 10^6} = 5.709 \cdot 10^{-6} \text{ м}^2.$$

					ЮУрГУ-140400.62.2017.260. ПЗ ВКР	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		19

Разбиваем эффективный проводник на элементарные. Число элементарных проводников в одном эффективном $n_{эл1}$:

$$n_{эл1} = 2 \quad (14)$$

По определенному сечению эффективного проводника из сортамента подбираем провод необходимого сечения. Размеры стандартного провода:

$$q_{1ГОСТ} = 3.14 \cdot 10^{-6} \text{ м}^2 \quad (15)$$

$$d_{1неизГОСТ} = 2 \cdot 10^{-3} \text{ м} \quad (16)$$

$$d_{1изГОСТ} = 2.095 \cdot 10^{-3} \text{ м} \quad (17)$$

Далее уточняем значение плотности тока в обмотке статора:

$$J_1 = \frac{I_{1н}}{a \cdot n_{эл1} \cdot q_{1ГОСТ}}; \quad (18)$$

$$J_1 = \frac{18.94}{1 \cdot 2 \cdot 3.14 \cdot 10^{-6}} = 3.016 \cdot 10^6 \text{ А/м}. \quad (19)$$

Эффективные витки в обмотке фазы статора w_1 :

$$w_1 = 2 \cdot p \cdot q_1 \frac{u_{п}}{2 \cdot a}; \quad (20)$$

$$w_1 = 2 \cdot 50 \cdot 0.4 \frac{40}{2 \cdot 1} = 800$$

Обмотка статора двухслойная. Шаг обмотки y_1 :

$$y_1 = 1 \quad (21)$$

Обмоточный коэффициент $k_{об1}$:

$$k_{об1} = 0.866; \quad (22)$$

2.3 Расчет размеров зубцовой зоны статора

Ширина зубца статора b_{z1} :

$$b_{z1} = \frac{B_{\delta} \cdot t_1 \cdot l_{\delta}}{B_{z1} \cdot l_{ct1} \cdot k_{ct}}; \quad (23)$$

$$b_{z1} = \frac{0.55 \cdot 0.025 \cdot 0.136}{1.3 \cdot 0.136 \cdot 0.95} = 11 \cdot 10^{-3} \text{ м:}$$

где B_{z1} – магнитная индукция в зубцах статора, $B_{z1} = 1.3$ Тл

l_{ct1} – длина пакета статора, $l_{ct1} = l_{\delta}$

k_{ct} – коэффициент заполнения статора сталью, $k_{ct} = 0.95$

Высота ярма статора h_{a1} :

$$h_{a1} = \frac{\alpha_{\delta} \cdot B_{\delta} \cdot \tau \cdot l_{\delta}}{2 \cdot B_{a1} \cdot l_{ct1} \cdot k_{ct}} \quad (24)$$

$$h_{a1} = \frac{0.71 \cdot 0.55 \cdot 0.03 \cdot 0.136}{2 \cdot 0.136 \cdot 0.5 \cdot 0.95} = 12 \cdot 10^{-3} \text{ м.}$$

где B_{a1} – магнитная индукция в ярме статора, $B_{a1} = 0.5$ Тл

Внутренний диаметр пакета статора принимаем с учетом того, что в качестве корпуса будет использоваться труба стандартного диаметра.

Внутренний диаметр пакета статора D :

$$D = 0.8 \text{ м}$$

Высота паза статора h_{p1} :

$$h_{p1} = \frac{(D_a - D)}{2} - h_{a1}; \quad (25)$$

$$h_{p1} = \frac{(0.96 - 0.8)}{2} - 12 \cdot 10^{-3} = 68 \cdot 10^{-3} \text{ м.}$$

Высота шлица паза статора $h_{ш1}$:

$$h_{ш1} = 0.0028 \text{ м.} \quad (26)$$

Ширина шлица паза статора $b_{ш1}$:

$$b_{ш1} = d_{1изГОСТ} + 0.001 = 3 \cdot 10^{-3} \text{ м.} \quad (27)$$

Величина пазовой изоляции $b_{из1}$:

$$b_{из1} = 0.4 \cdot 10^{-3} \text{ м.} \quad (28)$$

Эскиз пазово зубцовой зоны статора представлен на рисунке 1.

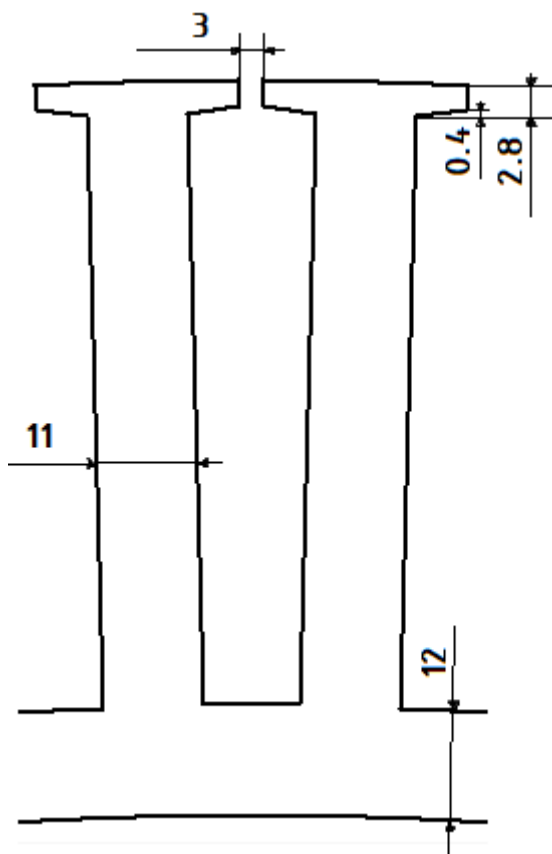


Рис.7 – Эскиз паза статора.

Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата

Схема обмотки статора. Обмотка двухслойная. $Z_1=120$, $q_1=0.4$

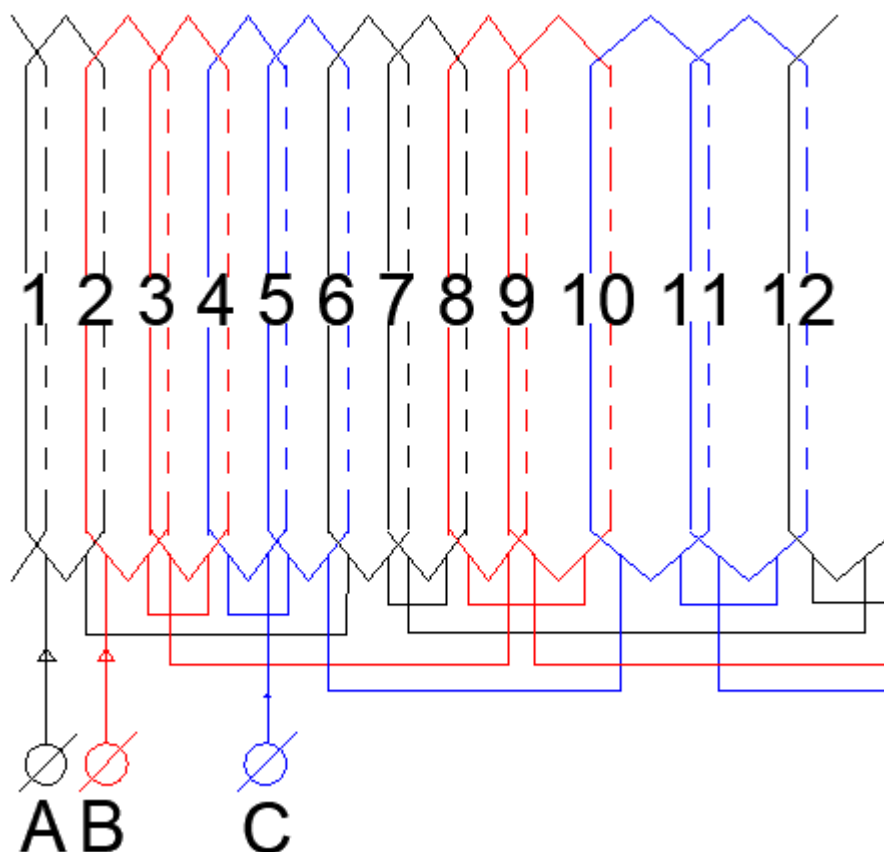


Рис.8 – Схема обмотки статора.

Стоит отметить что в машине исполнена конструкция с дробным числом пазов на полюс и фазу. Обмотки с дробным числом q применяют в многополюсных машинах в которых из-за ограниченных размеров полюсного деления q может быть небольшим. Такие обмотки позволяют при сравнительно небольшом общем числе пазов машины получить приближающуюся к синусоиде кривую ЭДС. Объясняется это тем, что последовательно соединенные группы катушек одной фазы, лежащие под разными полюсами, оказываются немного сдвинутыми в поле, что и ведет к уменьшению высших гармонических.

Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата

2.4 Определение величины воздушного зазора

Воздушный зазор в основном определяет технико-экономические показатели машины. При увеличении зазора возрастают размеры полюсов, обмотки возбуждения и потери в этой обмотке. При малых зазорах повышаются добавочные потери на поверхности полюсных наконечников, а также появляется опасность при деформации ротора задевания его о статор. От зазора зависят возможные кратковременные перегрузки по моменту и мощности. Величина воздушного зазора одинакова по всей ширине полюсного наконечника.

Воздушный зазор δ :

$$\delta = 1 \cdot 10^{-3} \text{ м} \quad (29)$$

2.5 Расчет размеров зубцовой зоны ротора

Электрическая машина неявнополюсной конструкции. Каждый полюс состоит из двух зубцов. Обмотка возбуждения трехфазная. Это позволяет уменьшить объем меди обмотки возбуждения и повысить коэффициент использования материалов. Число пазов на роторе следует выбирать различно пазам статора для уменьшения реактивных моментов, ухудшающих энергетику машины.

Число пазов на полюс и фазу ротора q_2 :

$$q_2 = 0.38 \quad (30)$$

Число фаз обмотки ротора m_2 :

$$m_2 = 3 \quad (31)$$

Число зубцов ротора Z_2 :

$$Z_2 = 2 \cdot p \cdot q_2 \cdot m_2 \quad (32)$$

$$Z_2 = 2 \cdot 50 \cdot 0.38 \cdot 3 = 114$$

Зубцовое деление ротора t_2 :

$$t_2 = \frac{\pi \cdot (D_a + 2 \cdot \delta)}{Z_2}; \quad (33)$$

$$t_2 = \frac{3.14 \cdot (0.96 + 2 \cdot 0.001)}{114} = 0.027 \text{ м}$$

Ширина зубца ротора b_{z2} :

$$b_{z2} = \frac{B_\delta \cdot t_2 \cdot l_\delta}{B_{z2} \cdot l_{ct2} \cdot k_{ct2}}; \quad (34)$$

$$b_{z2} = \frac{0.55 \cdot 0.027 \cdot 0.136}{1.35 \cdot 0.136 \cdot 0.95} = 11 \cdot 10^{-3} \text{ м.}$$

где B_{z2} – магнитная индукция в зубцах ротора, $B_{z2} = 1.35$ Тл

l_{ct2} – длина пакета ротора, $l_{ct2} = l_\delta$

k_{ct} – коэффициент заполнения ротора сталью, $k_{ct} = 0.95$

Высота ярма ротора h_{a2} :

$$h_{a2} = \frac{\alpha_\delta \cdot B_\delta \cdot \tau \cdot l_\delta}{2 \cdot B_{a2} \cdot l_{ct2} \cdot k_{ct}} \quad (35)$$

$$h_{a2} = \frac{0.71 \cdot 0.55 \cdot 0.03 \cdot 0.136}{2 \cdot 0.55 \cdot 0.136 \cdot 0.95} = 11 \cdot 10^{-3} \text{ м.}$$

где B_{a2} – магнитная индукция в ярме ротора, $B_{a2} = 0.55$ Тл

Наружный диаметр пакета ротора $D_{\text{нар}}$:

$$D_{\text{нар}} = 1.05 \text{ м.} \quad (36)$$

Высота паза ротора h_{p2} :

$$h_{p2} = \frac{D_{\text{нар}} - (D_a + 2\delta) - 2h_{a2}}{2} \quad (37)$$

$$h_{p2} = \frac{1.05 - (0.96 + 0.002) - 2 \cdot 11 \cdot 10^{-3}}{2} = 33 \cdot 10^{-3} \text{ м.}$$

Высота шлица паза ротора $h_{ш2}$:

$$h_{ш2} = 0.002 \text{ м} \quad (38)$$

Ширина шлица паза ротора $b_{ш2}$:

$$b_{ш2} = 0.002 \text{ м} \quad (39)$$

Толщина пазовой изоляции ротора $b_{из2}$:

$$b_{из2} = 0.0004 \text{ м} \quad (40)$$

Эскиз пазово зубцовой зоны ротора представлен на рисунке 2.

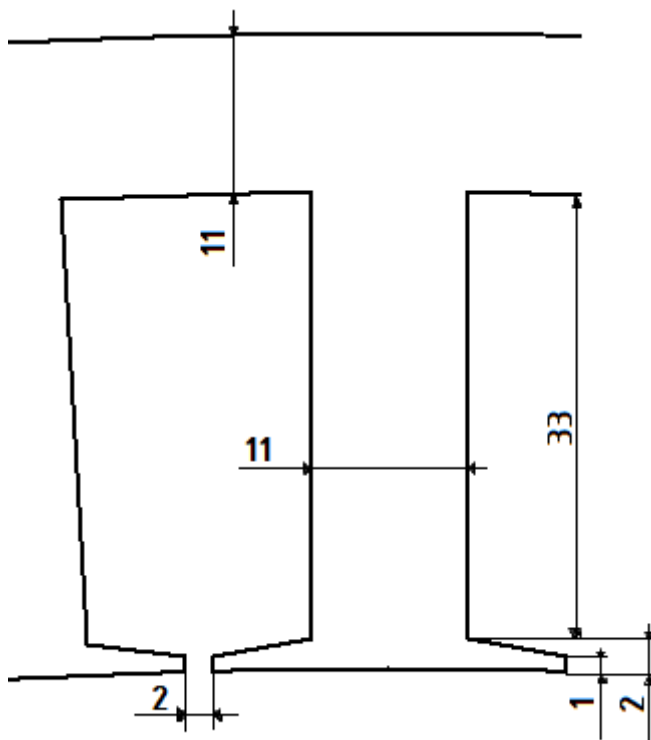


Рис.9 – Эскиз пазово зубцовой зоны ротора.

Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата

Обмотка ротора двухслойная. $Z_2=114$, $q_2=0.38$.

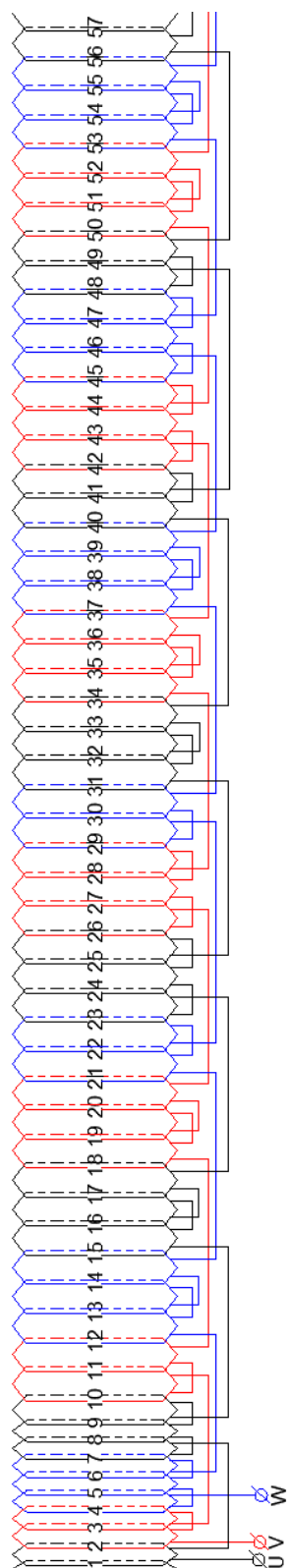


Рис.10 – Схема обмотки ротора.

Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата

2.6 Расчет магнитной цепи

Расчет магнитной цепи проводят с целью определения МДС обмотки возбуждения, необходимой для создания магнитного потока машины при холостом ходе. При вращении ротора этот поток наводит в обмотке статора ЭДС. Таким образом, в результате расчета магнитной цепи можно построить зависимость $E = f(F_{в0})$, которая называется характеристика холостого хода.

Листы статора и ротора изготавливаются из электротехнической стали 2013.

При расчете магнитной цепи задаются фазной ЭДС E в обмотке статора и определяют поток в воздушном зазоре Φ_{δ} :

$$\Phi_{\delta} = \frac{U_H \cdot k_e}{4 \cdot f_1 \cdot w_1 \cdot k_b \cdot k_{ob1}}; \quad (41)$$

$$\Phi_{\delta} = \frac{220 \cdot 1.11}{4 \cdot 50 \cdot 800 \cdot 1.11 \cdot 0.866} = 1.588 \cdot 10^{-3} \text{ Вб.}$$

где f_1 – частота выходного напряжения, $f_1 = 50$ Гц.

Индукция в воздушном зазоре B_{δ} :

$$B_{\delta} = \frac{\Phi_{\delta}}{\alpha_{\delta} \cdot \tau \cdot l_{\delta}}; \quad (42)$$

$$B_{\delta} = \frac{1.588 \cdot 10^{-3}}{0.71 \cdot 0.03 \cdot 0.136} = 0.548 \text{ Тл.}$$

Магнитное напряжение воздушного зазора F_{δ} :

$$F_{\delta} = \frac{1}{\mu_0} \cdot B_{\delta} \cdot \delta \cdot k_{\delta}; \quad (43)$$

$$F_{\delta} = \frac{1}{1.25 \cdot 10^{-6}} \cdot 0.55 \cdot 0.001 \cdot 1.2 = 523.71 \text{ А.}$$

где k_{δ} – коэффициент воздушного зазора, учитывающий зубчатое строение статора и ротора. Из-за наличия зубцов и пазов происходит перераспределение

потока в зазоре, в результате чего индукция, а, следовательно, и магнитное напряжение зазора над коронками зубцов возрастают, $k_{\delta} = 1.2$.

Индукция в зубцах статора B_{z1} :

$$B_{z1} = \frac{B_{\delta} \cdot t_1 \cdot l_{\delta}}{b_{z1} \cdot l_{ct1} \cdot k_{ct}}; \quad (44)$$

$$B_{z1} = \frac{0.55 \cdot 0.027 \cdot 0.136}{0.011 \cdot 0.136 \cdot 0.95} = 1.299 \text{ Тл}$$

Напряженность магнитного поля в зубцах статора H_{z1} :

$$H_{z1} = 486 \text{ А/м.} \quad (45)$$

Магнитное напряжение зубцов статора F_{z1} :

$$F_{z1} = H_{z1} \cdot h_{p1}; \quad (46)$$

$$F_{z1} = 486 \cdot 0.068 = 32.855 \text{ А.}$$

Индукция в спинке статора B_{a1} :

$$B_{a1} = \frac{\Phi_{\delta}}{2 \cdot h_{a1} \cdot l_{\delta} \cdot k_{ct}}; \quad (47)$$

$$B_{a1} = \frac{1.588 \cdot 10^{-3}}{2 \cdot 0.012 \cdot 0.136 \cdot 0.95} = 0.498 \text{ Тл}$$

Напряженность магнитного поля в спинке статора H_{a1} :

$$H_{a1} = 64 \text{ А/м} \quad (48)$$

Длина магнитной линии в спинке статора L_{a1} :

$$L_{a1} = \frac{\pi \cdot (D - 2 \cdot h_{p1} - h_{a1})}{2p}; \quad (49)$$

$$L_{a1} = \frac{3.14 \cdot (0.8 - 2 \cdot 0.068 - 0.012)}{2 \cdot 50} = 0.02 \text{ м.}$$

Магнитное напряжение спинки статора F_{a1} :

$$F_{a1} = \varepsilon_1 \cdot H_{a1} \cdot L_{a1}; \quad (50)$$

$$F_{a1} = 0.65 \cdot 64 \cdot 0.02 = 0.853 \text{ А.}$$

где ε_1 – коэффициент, учитывающий неравномерное распределение индукции по поперечному сечению спинки статора, $\varepsilon_1 = 0.65$

Индукция в зубцах ротора B_{z2} :

$$B_{z2} = \frac{B_\delta \cdot t_2 \cdot l_\delta}{b_{z2} \cdot l_{ct2} \cdot k_{ct}}; \quad (51)$$

$$B_{z2} = \frac{0.55 \cdot 0.027 \cdot 0.136}{0.011 \cdot 0.136 \cdot 0.95} = 1.348 \text{ Тл}$$

Напряженность магнитного поля в зубцах ротора H_{z2} :

$$H_{z2} = 533 \text{ А/м.} \quad (52)$$

Магнитное напряжение зубцов ротора F_{z2} :

$$F_{z2} = H_{z2} \cdot h_{p2}; \quad (53)$$

$$F_{z2} = 533 \cdot 0.033 = 17.44 \text{ А.}$$

Индукция в спинке ротора B_{a2} :

$$B_{a2} = \frac{\Phi_\delta}{2 \cdot h_{a2} \cdot l_\delta \cdot k_{ct}}; \quad (54)$$

$$B_{a2} = \frac{1.588 \cdot 10^{-3}}{2 \cdot 0.011 \cdot 0.136 \cdot 0.95} = 0.548 \text{ Тл}$$

Напряженность магнитного поля в спинке ротора H_{a2} :

$$H_{a2} = 71 \text{ А/м} \quad (55)$$

Длина магнитной линии в спинке ротора L_{a2} :

$$L_{a2} = \frac{\pi \cdot (D_{\text{нар}} + h_{p2} - h_{a2})}{2p}; \quad (56)$$

$$L_{a2} = \frac{3.14 \cdot (1.05 - 2 \cdot 0.033 - 0.011)}{2 \cdot 50} = 0.034 \text{ м.}$$

Магнитное напряжение спинки ротора F_{a2} :

$$F_{a2} = \varepsilon_2 \cdot H_{a2} \cdot L_{a2}; \quad (57)$$

$$F_{a2} = 0.65 \cdot 71 \cdot 0.034 = 1.553 \text{ А.}$$

где ε_2 – коэффициент, учитывающий неравномерное распределение индукции по поперечному сечению спинки ротора, $\varepsilon_2 = 0.65$

МДС обмотки возбуждения на один полюс при холостом ходе F_b :

$$F_b = F_{\delta} + F_{Z1} + F_{Z2} + F_{a1} + F_{a2}; \quad (58)$$

$$F_b = 523.7 + 32.85 + 17.44 + 0.853 + 1.55 = 576.4 \text{ А.}$$

Повторяем расчет для ряда значений ЭДС: 0,5; 0,8; 1,1; 1,2; 1,3; 1,4·Е. Результаты расчета сведем в табл. 1.

Таблица 1 – Расчётные значения ЭДС для номинальных напряжений в фазе

Параметр	0,5Е	0,8Е	Е	1,1Е	1,2Е	1,4Е
Е,В	122,1	195,36	244,2	268,62	293,04	341,88
Фб10е-3,Вб	0,79	1,27	1,58	1,747	1,905	2,223
Вб,Тл	0,276	0,442	0,548	0,608	0,663	0,774
Fb,А	265	424	530	583	636	742
Bz1,Тл	0,653	1,045	1,299	1,437	1,578	1,829
Hз1,А/м	205	338	479	610	777	813
Fz1,А	19	31	44	56	72	75

Ba1,Тл	0,276	0,442	0,498	0,608	0,663	0,774
Ha1,А/м	30	55	69	80	89	93
Fa1,А	0,423	0,678	0,79	0,902	0,987	1
Bz2,Тл	0,678	1,086	1,349	1,493	1,628	1,9
Hз2,А/м	212	355	524	670	878	1890
Fz2,А	11	20	29	37	49	106
Ba2,Тл	0,276	0,442	0,548	0,608	0,663	0,774
Ha2,А/м	30	55	71	80	89	93
Fa2,А	0,863	1,384	1,613	1,841	2	2,073
Fв,А	297	478	576,4	681	761	928

По результатам расчет строится характеристика холостого хода, изображенная на рисунке 3.

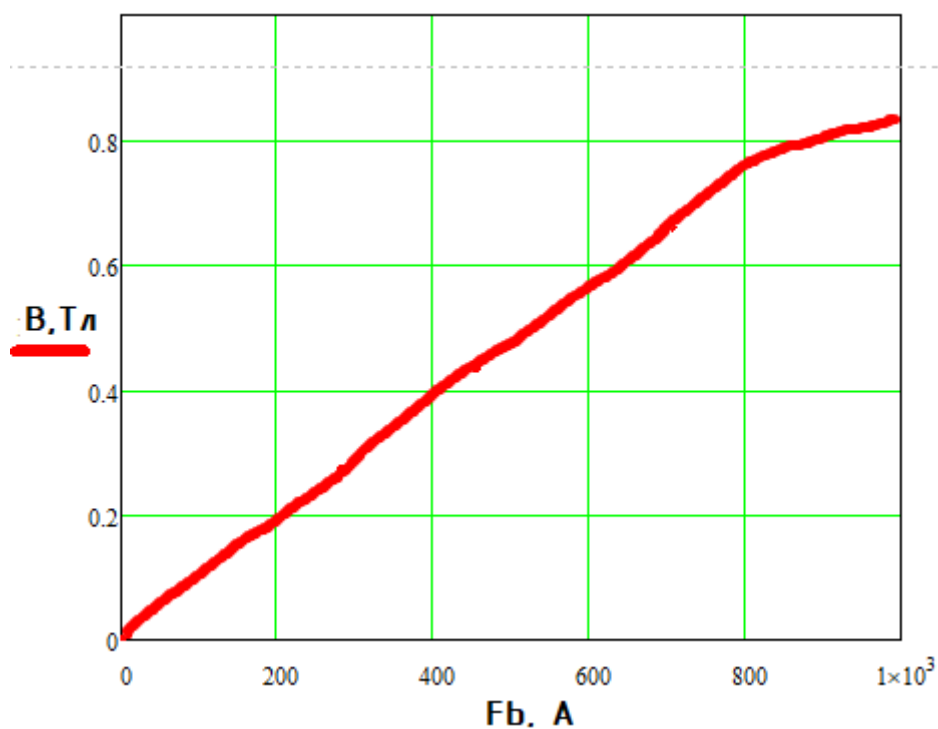


Рис.11 – Характеристика холостого хода.

2.7 Определение параметров обмотки статора для установившегося режима работы машины

Средняя ширина катушки обмотки статора b_{kt1} :

$$b_{kt1} = \frac{\pi(D_a - h_{p1})}{2p}; \quad (59)$$

$$b_{kt1} = \frac{3.14(0.96 - 0.068)}{2 \cdot 50} = 0.028 \text{ м}$$

Длина лобовой части обмотки статора l_{l1} :

$$l_{l1} = K_{l1} \cdot b_{kt1} + 2B; \quad (60)$$

$$l_{l1} = 1.407 \cdot 0.028 + 2 \cdot 0.015 = 0.069 \text{ м.}$$

Средняя длина витка обмотки статора l_{cp1} :

$$l_{cp1} = 2 \cdot (l_\delta + l_{l1}); \quad (61)$$

$$l_{cp1} = 2 \cdot (0.136 + 0.069) = 0.411 \text{ м}$$

Активное сопротивление обмотки статора r_a :

$$r_a = \frac{\rho_j \cdot w_1 \cdot l_{cp1}}{n_{el1} \cdot q_{1ГОСТ} \cdot a}; \quad (62)$$

$$r_a = \frac{0.024 \cdot 10^{-6} \cdot 800 \cdot 0.411}{2 \cdot 3.14 \cdot 10^{-6} \cdot 1} = 1.256 \text{ Ом.}$$

где ρ_j – удельное сопротивление проводника обмотки статора, $\rho_j = 2.4 \cdot 10^{-8}$ Ом/м.

Активное сопротивление обмотки статора в относительных единицах r_a^* :

$$r_a^* = r_a \cdot \frac{I_H}{U_H} \quad (63)$$

$$r_a^* = 1.256 \cdot \frac{18.94}{220} = 0.108$$

Коэффициент удельной проводимости между стенками паза λ_{Π} :

$$\lambda_{\Pi} = \frac{h_1 - 2b_{\text{из1}}}{b_1} k_{\beta} + \left(\frac{b_{\text{из1}}}{b_1} + \frac{3h_{k1}}{b_1 + 2b_{\text{ш1}}} + \frac{h_{\text{ш1}}}{b_{\text{ш1}}} \right) k_{\beta}'; \quad (64)$$

$$\lambda_{\Pi} = \frac{0.011 - 2 \cdot 0.0004}{0.011} 1.11 + \left(\frac{0.0004}{0.011} + \frac{3 \cdot 0.001}{0.012} + \frac{0.001}{0.003} \right) 1.11 = 1.826$$

где $k_{\beta} = 1.11$

Коэффициент удельной проводимости по коронкам зубцов λ_{κ} :

$$\lambda_{\kappa} = (\alpha_{\delta} \cdot \lambda_{\kappa}' + (0.22 + 0.35 \cdot \sqrt{\frac{t_1 - b_{\text{ш1}}}{b_{\text{ш1}}}} \cdot (1 - \alpha_{\delta})) \cdot k_{\beta}'; \quad (65)$$

$$\lambda_{\kappa} = (0.71 \cdot 0.18 + (0.22 + 0.35 \cdot \sqrt{\frac{0.03 - 0.003}{0.003}} \cdot (1 - 0.71)) \cdot 1.11 = 0.424$$

где $\lambda_{\kappa}' = 0.18$

Коэффициент удельной проводимости пазового рассеяния $\lambda_{\text{ПК}}$:

$$\lambda_{\text{ПК}} = \lambda_{\Pi} + \lambda_{\kappa}; \quad (66)$$

$$\lambda_{\text{ПК}} = 0.424 + 1.826 = 2.251$$

Коэффициент удельной проводимости лобового рассеяния $\lambda_{\text{Л}}$:

$$\lambda_{\text{Л}} = 0.34 \cdot (l_{l1} - 0.64 \cdot \beta_1 \cdot \tau) \frac{q_1}{l_{\delta}}; \quad (67)$$

$$\lambda_{\text{Л}} = 0.34 \cdot (0.069 - 0.64 \cdot 1 \cdot 0.03) \frac{0.4}{0.136} = 0.05$$

Коэффициент удельной проводимости дифференциального рассеяния $\lambda_{\text{Д}}$:

$$\lambda_{\text{Д}} = 0.03 \frac{\tau \cdot \alpha_{\delta}}{\delta \cdot k_{\delta} \cdot q_1} \quad (68)$$

$$\lambda_{\text{Д}} = 0.03 \frac{0.03 \cdot 0.71}{0.001 \cdot 1.11 \cdot 0.4} = 1.447$$

Индуктивное сопротивление рассеяния фазы обмотки статора x_σ :

$$x_\sigma = 15.8 \cdot \left(\frac{w_1}{100}\right)^2 \frac{l_\delta}{pq_1} (\lambda_d + \lambda_l + \lambda_{пк}) \frac{f}{100}; \quad (69)$$

$$x_\sigma = 15.8 \cdot \left(\frac{800}{100}\right)^2 \frac{0.136}{50 \cdot 0.4} (1.447 + 0.05 + 2.251) \frac{50}{100} = 12.87 \text{ Ом}$$

Индуктивное сопротивление фазы обмотки статора в относительных единицах x_σ^* :

$$x_\sigma^* = x_\sigma \cdot \frac{I_H}{U_H}; \quad (70)$$

$$x_\sigma^* = 12.87 \cdot \frac{18.94}{220} = 1.109$$

2.8 Определение МДС обмотки возбуждения при нагрузке

Для определения МДС обмотки возбуждения при нагрузке строится векторная диаграмма и частичные характеристики электрической машины. Векторная диаграмма представлена на рисунке 4.

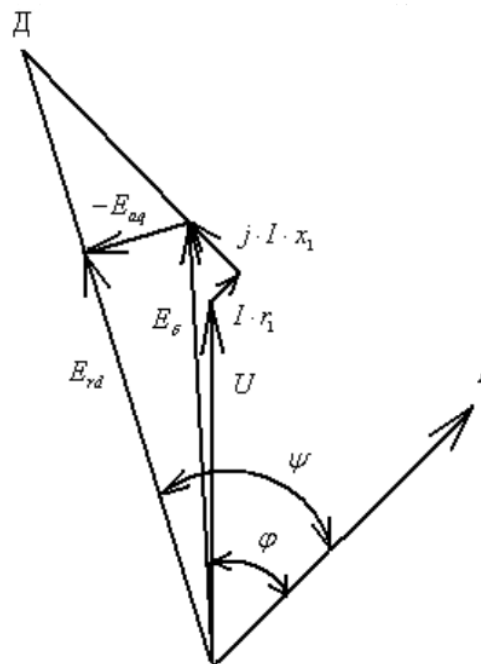


Рис.12 – Векторная диаграмма

По результатам построения векторной диаграммы определили МДС обмотки возбуждения при нагрузке в физических единицах. Эта МДС на один полюс наводится трехфазной обмоткой возбуждения.

Величина МДС, наводимая одной фазой F_{BH} :

$$F_{BH} = \frac{F_B}{2} \quad (71)$$

$$F_{BH} = \frac{576.416}{2} = 288.2 \text{ A}$$

2.9 Расчет обмотки возбуждения

Средняя ширина катушки обмотки возбуждения ротора b_{kt2} :

$$b_{kt2} = \frac{\pi(D_a + h_{p2} + 2\delta)}{2p}; \quad (72)$$

$$b_{kt2} = \frac{3.14(0.96 + 0.033 + 0.002)}{2 \cdot 50} = 0.031 \text{ м}$$

Длина лобовой части обмотки возбуждения ротора l_{l2} :

$$l_{l2} = K_{l1} \cdot b_{kt2} + 2B; \quad (73)$$

$$l_{l2} = 1.407 \cdot 0.031 + 2 \cdot 0.015 = 0.074 \text{ м.}$$

Средняя длина витка обмотки возбуждения ротора l_{cp2} :

$$l_{cp2} = 2 \cdot (l_\delta + l_{l2}); \quad (74)$$

$$l_{cp2} = 2 \cdot (0.136 + 0.074) = 0.42 \text{ м}$$

Сечение проводника обмотки возбуждения q_B :

$$q_B = \frac{2 \cdot p \cdot F_{BH} \cdot p_j \cdot l_{cp2}}{U_H}; \quad (75)$$

$$q_B = \frac{2 \cdot 50 \cdot 288.2 \cdot 2.4 \cdot 10^{-8} \cdot 0.42}{300} = 1.32 \cdot 10^{-6} \text{ м}^2$$

По сортаменту подбираем стандартное сечение провода:

$$q_{\text{ВГОСТ}} = 1.767 \cdot 10^{-6} \text{ м}^2 \quad (76)$$

$$d_{\text{внеизГОСТ}} = 1.5 \cdot 10^{-3} \text{ м} \quad (77)$$

$$d_{\text{визГОСТ}} = 1.585 \cdot 10^{-3} \text{ м} \quad (78)$$

Плотность тока в обмотке возбуждения J_B :

$$J_B = 1.5 \cdot 10^6 \text{ А/м.} \quad (79)$$

Значение тока в обмотке возбуждения I_B :

$$I_B = J_B \cdot q_{\text{ВГОСТ}}; \quad (80)$$

$$I_B = 1.5 \cdot 10^{-6} \cdot 1.767 \cdot 10^{-6} = 2.65 \text{ А}$$

Число витков в катушке обмотки возбуждения w_B :

$$w_B = \frac{F_{\text{ВН}}}{I_B}; \quad (81)$$

$$w_B = \frac{288.02}{2.65} = 108$$

Сопротивление обмотки возбуждения ротора r_B :

$$r_B = \frac{2p \cdot \rho_j \cdot w_B \cdot l_{\text{ср}2}}{q_{\text{ВГОСТ}}}; \quad (82)$$

$$r_B = \frac{2 \cdot 50 \cdot 0.024 \cdot 10^{-6} \cdot 108 \cdot 0.42}{1.767 \cdot 10^{-6}} = 62.025 \text{ Ом.}$$

2.10 Определение массы активных материалов

Масса зубцов статора m_{z1} :

$$m_{z1} = 7800 \cdot l_{ct1} \cdot k_{ct} \cdot h_{p1} \cdot b_{z1} \cdot Z_1; \quad (83)$$

$$m_{z1} = 7800 \cdot 0.136 \cdot 0.95 \cdot 0.068 \cdot 0.011 \cdot 120 = 91.451 \text{ кг}$$

Масса ярма магнитопровода статора m_{a1} :

$$m_{a1} = 7800 \cdot l_{ct1} \cdot k_{ct} \cdot h_{a1} \cdot \pi \cdot (D + h_{a1}); \quad (84)$$

$$m_{a1} = 7800 \cdot 0.136 \cdot 0.95 \cdot 0.011 \cdot 3.14 \cdot (0.8 + 0.011) = 31.8 \text{ кг}$$

Масса меди обмотки статора m_{m1} :

$$m_{m1} = 8900 \cdot q_{1\text{ГОСТ}} \cdot n_{\text{эл1}} \cdot u_{\text{п1}} \cdot Z_1 \frac{l_{cp1}}{2}; \quad (85)$$

$$m_{m1} = 8900 \cdot 3.14 \cdot 10^{-6} \cdot 2 \cdot 40 \cdot 120 \frac{0.411}{2} = 55 \text{ кг}$$

Масса зубцов ротора m_{z2} :

$$m_{z2} = 7800 \cdot l_{ct2} \cdot k_{ct} \cdot h_{p2} \cdot b_{z2} \cdot Z_2; \quad (86)$$

$$m_{z2} = 7800 \cdot 0.136 \cdot 0.95 \cdot 0.033 \cdot 0.011 \cdot 114 = 42.725 \text{ кг}$$

Масса ярма магнитопровода ротора m_{a2} :

$$m_{a2} = 7800 \cdot l_{ct2} \cdot k_{ct} \cdot h_{a2} \cdot \pi \cdot (D_{\text{нар}} - h_{a2}); \quad (87)$$

$$m_{a2} = 7800 \cdot 0.136 \cdot 0.95 \cdot 0.012 \cdot 3.14 \cdot (1.05 - 0.012) = 37.04 \text{ кг}$$

Масса меди обмотки статора m_{m2} :

$$m_{m2} = 8900 \cdot q_{\text{ВГОСТ}} \cdot n_{\text{эл2}} \cdot u_{\text{п2}} \cdot Z_2 \frac{l_{cp2}}{2}; \quad (85)$$

$$m_{m2} = 8900 \cdot 1,79 \cdot 10^{-6} \cdot 1 \cdot 6 \cdot 114 \frac{0.42}{2} = 15.08 \text{ кг}$$

Полная масса меди m_m :

$$m_m = m_{m1} + m_{m2}; \quad (86)$$

$$m_m = 55 + 15.08 = 70.08 \text{ кг.}$$

Полная масса активной стали m_{ct} :

$$m_{ct} = m_{a1} + m_{a2} + m_{z1} + m_{z2}; \quad (87)$$

$$m_{ct} = 31.8 + 37.04 + 91.451 + 37.04 = 203.03 \text{ кг.}$$

2.11 Определение потерь и КПД генератора

Потери на возбуждение P_{OB} :

$$P_{OB} = m_2 \cdot I_B^2 \cdot r_B; \quad (88)$$

$$P_{OB} = 3 \cdot 2.65^2 \cdot 60,025 = 1.307 \cdot 10^3 \text{ Вт}$$

Основные электрические потери в обмотке статора $P_{эл}$:

$$P_{эл} = m_1 \cdot I_H^2 \cdot r_a; \quad (89)$$

$$P_{эл} = 3 \cdot 18.94^2 \cdot 1.62 = 1.351 \cdot 10^3 \text{ Вт}$$

Магнитные потери в ярме статора P_a :

$$P_a = k_{da} \cdot B_{a1} \cdot m_{a1} \cdot pz \cdot \left(\frac{f}{50}\right)^{\frac{1}{3}}; \quad (90)$$

$$P_a = 1.5 \cdot 0.5 \cdot 31.8 \cdot 3.1 \cdot \left(\frac{50}{50}\right)^{\frac{1}{3}} = 73.489 \text{ Вт}$$

Магнитные потери в зубцах статора P_z :

$$P_z = k_{dz} \cdot B_{z1} \cdot m_{z1} \cdot pz \cdot \left(\frac{f}{50}\right)^{\frac{1}{3}}; \quad (91)$$

$$P_z = 2 \cdot 1.35 \cdot 42.7 \cdot 3.1 \cdot \left(\frac{50}{50}\right)^{\frac{1}{3}} = 731.03 \text{ Вт}$$

Полные магнитные потери P_{mag} :

$$P_{mag} = P_z + P_a; \quad (92)$$

$$P_{mag} = 731.03 + 73.489 = 804.591 \text{ Вт}$$

Добавочные потери $P_{доб}$:

$$P_{доб} = 0.005P_H \quad (93)$$

$$P_{доб} = 0.005 \cdot 10000 = 50 \text{ Вт}$$

Общие потери ΣP :

$$\Sigma P = P_{mag} + P_{ОВ} + P_{эл} + P_{доб}; \quad (94)$$

$$\Sigma P = 804.591 + 1.307 \cdot 10^3 + 2.614 \cdot 10^3 + 50 = 3.513 \cdot 10^3 \text{ Вт}$$

Коэффициент полезного действия η ;

$$\eta = 1 - \frac{\Sigma P}{P_H + \Sigma P}; \quad (95)$$

$$\eta = 1 - \frac{3.513 \cdot 10^3}{10 \cdot 10^3 + 3.513 \cdot 10^3} = 0.74$$

2.12 Расчет рабочих характеристик генератора

Основными характеристиками генератора являются внешняя и регулировочная. Для их построения используется векторная диаграмма. Регулировочная характеристика представляет собой зависимость тока возбуждения от тока якоря при постоянном напряжении и коэффициенте мощности. Для построения этой характеристики задают ряд значений тока якоря и при одних и тех же значениях напряжения и коэффициента мощности строят векторные диаграммы, из которых находят ток возбуждения.

Внешняя характеристика представляет собой зависимость напряжения на выходе генератора от тока якоря при постоянном значении тока возбуждения и коэффициента мощности; определяет зависимость напряжения генератора от его нагрузки. Точки характеристики находят построив ряд регулировочных характеристик при различных значениях фазного напряжения. Регулировочная и внешняя характеристики представлены на рисунке 13, 14. Остальные характеристики представлены на рисунках 15, 16.

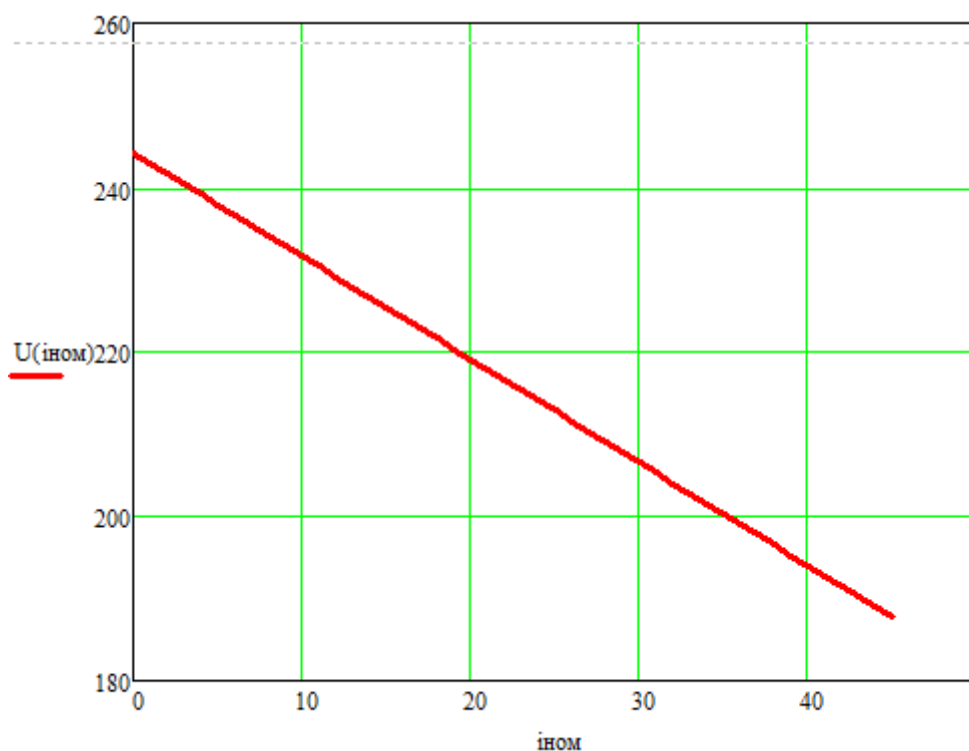


Рис.13 - Внешняя характеристика

Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата

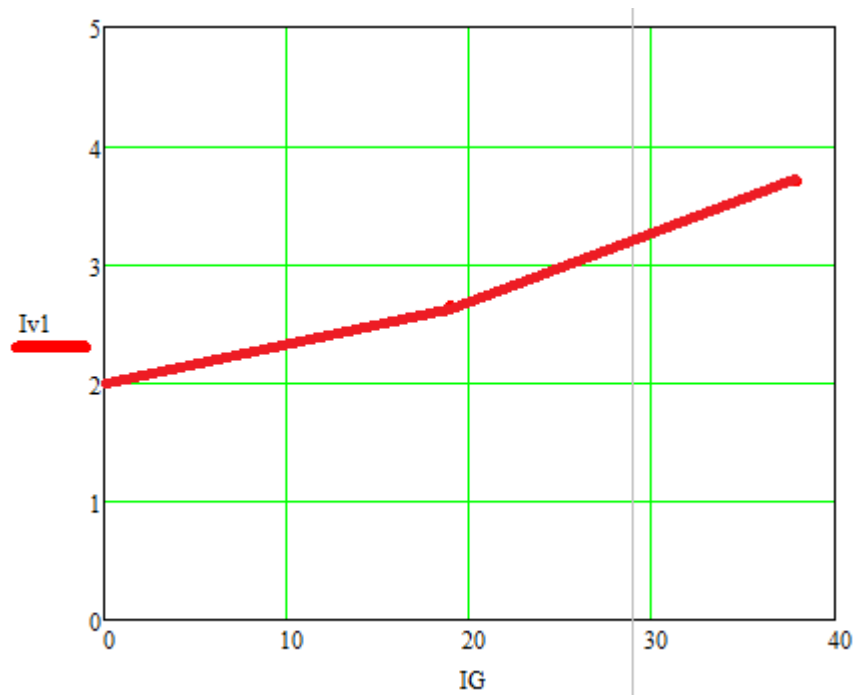


Рис.14 – Регулировочная характеристика

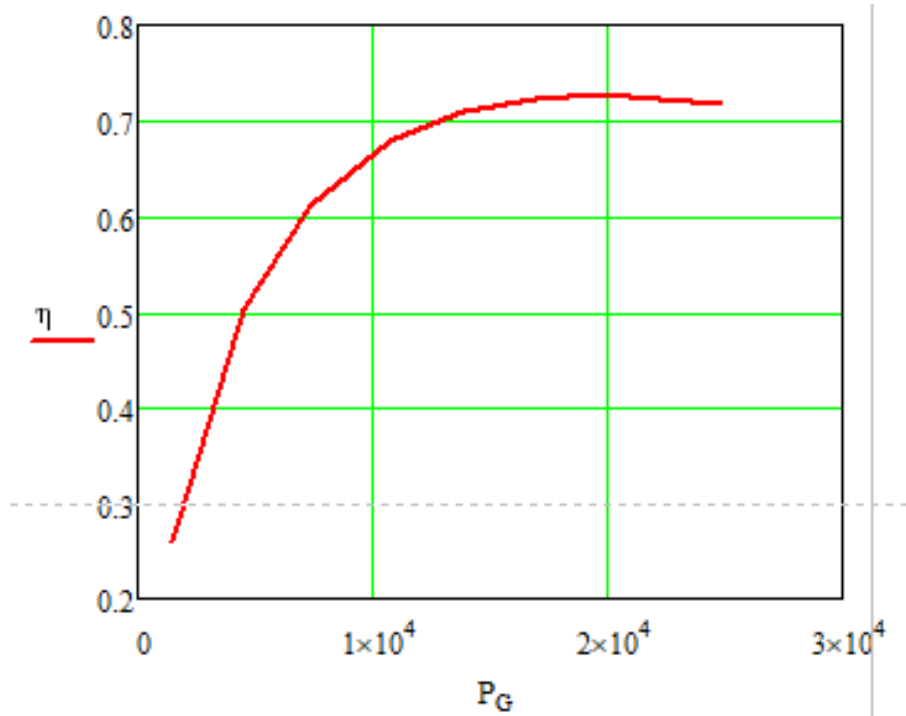


Рис.15 – Зависимость КПД от полезной мощности.

Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата

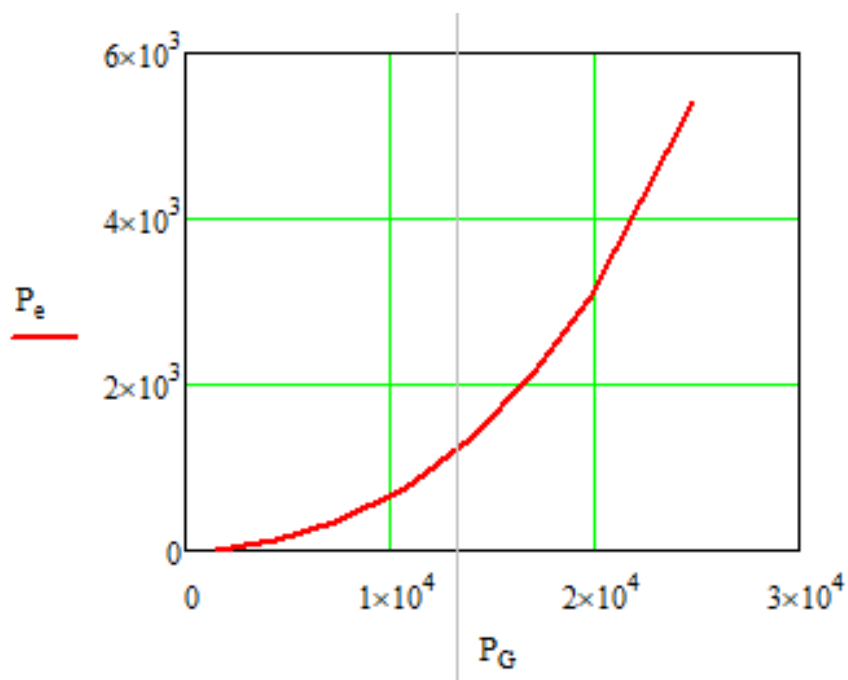


Рис.16 – Зависимость полезной мощности от потребляемой

Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата

3 СПЕЦИАЛЬНАЯ ЧАСТЬ

3.1 Общие сведения о Ansoft

Корпорация Ansoft, входящая в состав компании ANSYS, Inc., занимается разработками программного обеспечения для автоматизации проектирования электронных приборов и устройств (САПР электроники). Продукты компании Ansoft расширяют и углубляют линейку программных продуктов Ansys, предназначенных для инженерного моделирования и отличающихся повышенной функциональностью и совместимостью.

Программные продукты Ansoft:

- Ansoft Designer - Разработка высокопроизводительных СВЧ/ВЧ-устройств и систем;
- HFSS - Электродинамическое моделирование трехмерных СВЧ-структур методом конечных элементов;
- Nexxim - Моделирование и анализ интегральных схем;
- Q3D Extractor - 3D/2D расчёт паразитных параметров при проектировании электроники;
- SIwave - Анализ целостности сигнала в печатных платах и корпусах интегральных схем;
- TPA - Автоматический расчёт паразитных параметров в корпусах интегральных схем;
- Maxwell - 3D/2D моделирование электромагнитного поля;
- PExprt - Разработка электромагнитных устройств и компонентов;
- RMxprt - Разработка электрических механизмов;
- Simplorer - Разработка мультидоменных систем;
- Ansoft Links - Импорт EDA компоновок и CAD моделей;
- Distributed Analysis - Распараллеленный расчёт;
- ePhysics - Анализ тепловых и механических нагрузок;
- Full-Wave SPICE - Широкополосные SPICE модели;
- Optimetrics - Параметрический анализ и оптимизация.

3.2 Обзор пакета Ansoft Maxwell

В данном дипломном проекте использовался программный пакет Ansoft Maxwell v.16.0.

Maxwell – это ведущее программное обеспечение для моделирования электромагнитных полей, используемое для проектирования и исследования двумерных и трехмерных моделей, типа двигателей, датчиков, трансформаторов и других электрических и электромеханических устройств различного применения. Maxwell базируется на методе конечных элементов (Finite Element Method - FEM) и точно рассчитывает статические, гармонические электромагнитные и электрические поля, а также переходные процессы в полевых задачах.

Программное обеспечение Ansoft Maxwell характеризуется выгодным на фоне аналогов сочетанием широты возможностей и простоты освоения. Известный аналог ANSYS Emag гораздо более сложен в освоении.

Программы Maxwell нацелены на то, чтобы разработчик электротехнического оборудования тратил как можно меньше времени непосредственно на решение полевых задач. Для этого предусмотрена библиотека свойств материалов, удобные средства для параметризации модели и автоматизации расчетов при различных сочетаниях параметров. Большинство потребностей пользователя в автоматизации реализуются стандартными средствами без применения скрипта.

3.3 Программные модули Ansys Maxwell

Ansys Maxwell включает в себя следующие программные модули:

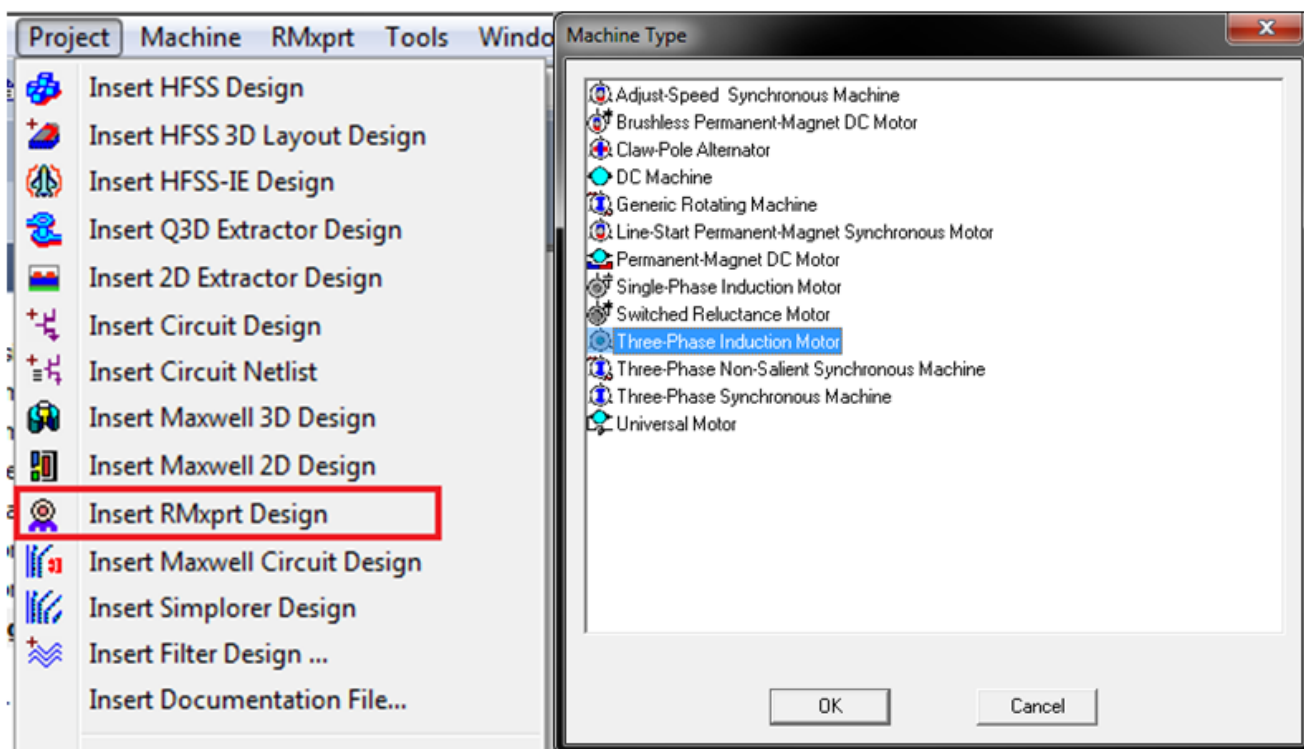
- Maxwell 2D (расчёт переменного/постоянного магнитного поля, электростатики, расчет вихревых токов и скин-эффекта, переходных во времени процессов, параметрическое моделирование и оптимизация);
- Maxwell 3D (электрические и электростатические трёхмерные поля, магнитостатические линейные и нелинейные поля, гармонические

установившиеся трёхмерные поля, переходные процессы в трёхмерных магнитных полях)

- RМхprt (проектирование и оптимизация вращающихся электрических машин)

3.4 Моделирование в программе Maxwell

Моделирование в программе Maxwell начинается с открытия нового проекта в RМхprt. Выбирается тип машины в данном случае асинхронизированный синхронный генератор можно отнести к виду вращающихся генерирующих машин (generic rotating machine).



а)

б)

Рис.17 – Создание нового проекта (а) выбор типа машины (б).

Далее открывается новый проект который содержит в себе части электрической машины такие как вкладка Машина (Machine) где содержится информация о типе пазов, вид ротора машины и виде выходного напряжения. По конструкции генератор спроектирован с наружным ротором.

Name	Value	Unit	Evaluated Value	Description	Read-only
Source Type	AC			AC or DC source to deli...	<input type="checkbox"/>
Structure	Outer Rotor			Inner rotor, outer rotor, ...	<input type="checkbox"/>
Stator Type	SLOT_AC			The stator core type	<input type="checkbox"/>
Rotor Type	SLOT_AC			The rotor core type	<input type="checkbox"/>

Рис.18 – Вкладка «Machine».

Во вкладке «Stator» мы определяем количество полюсов и пазов статора машины, а также вид паза, в данном случае паз трапецеидальный.

Name	Value	Unit
Number of Poles	100	
Number of Slots	120	
Circuit Type	Y3	
Slot Type	3	
Position Control	<input type="checkbox"/>	

Рис.19 – Вкладка «Stator».

Во вкладке «Core» раздела статора указываем главные размеры машины и материал из которого изготовлен статор.

Name	Value	Unit	Evaluated Value
Outer Diameter	960	mm	960mm
Inner Diameter	800	mm	800mm
Length	136	mm	136mm
Stacking Factor	0.95		
Steel Type	steel_1010		
Press Board T...	0	mm	
Magnetic Pres...	<input type="checkbox"/>		
Skew Width	0	deg	0deg
Lamination Se...	0		

Рис.20 – Вкладка «Core».

Во вкладке «Slot» раздела статора указываем главные размеры паза статора.

Name	Value	Unit	Evaluated Value
Auto Design	<input type="checkbox"/>		
Parallel Tooth	<input checked="" type="checkbox"/>		
Tooth Width	11	mm	11mm
Hs0	2.8	mm	2.8mm
Hs1	1	mm	1mm
Hs2	64.2	mm	64.2mm
Bs0	3	mm	3mm
Rs	0	mm	0mm

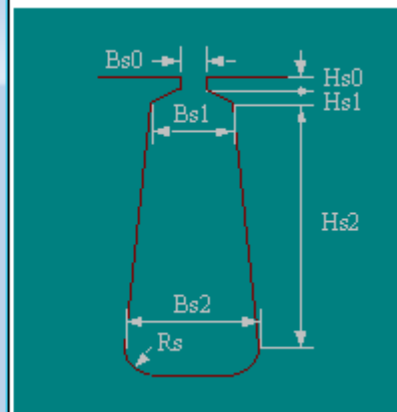


Рис.21 – Вкладка «Slot».

Во вкладке «Winding» раздела статора указывается тип обмотки (двуслойная), число параллельных ветвей, количество элементарных проводников, шаг обмотки и, коэффициент заполнения паза медью и материал из которого изготовлена обмотка статора.

Name	Value	Unit	Evaluated Value
Winding Layers	2		
Winding Type	Whole-Coiled		
Parallel Branch...	1		
Conductors pe...	40		40
Coil Pitch	1		
Number of Stra...	2		2
Wire Wrap	0	mm	
Wire Size	Diameter: 0mm		
Conductor Type	copper		

Рис.22 – Вкладка «Winding».

Далее указываем данные для ротора. Все действия выполняются аналогично моделированию статора. После окончания моделирования статора производится переход во вкладку «Setup» – «Analyze setup». В этой вкладке содержится информация об номинале выходного напряжения и номинальной скорости вращения. Далее полученную аналитическую модель необходимо преобразовать в 2D плоскость для получения характеристик и графиков путем симуляции вращения. Для этого во всплывающем меню анализа выбираем пункт «Create Maxwell 2d design» и программа автоматически проецирует ее в плоскость и делит на кратное число «кусков машины» для упрощения анализа.

Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата

В результате получаем разрез машины.

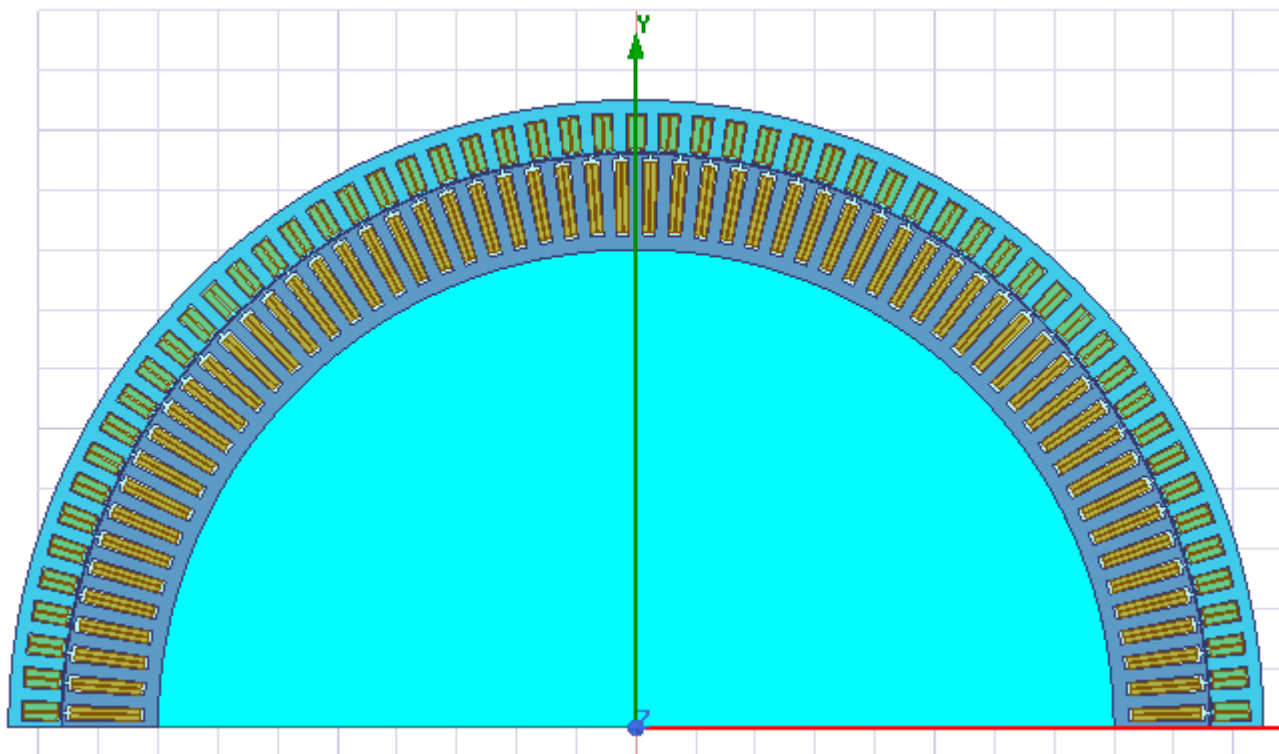


Рис.23 – Плоскость разреза машины.

Далее запускаем анализ вращения машины после чего можем посмотреть интересный нас график выходного напряжения.

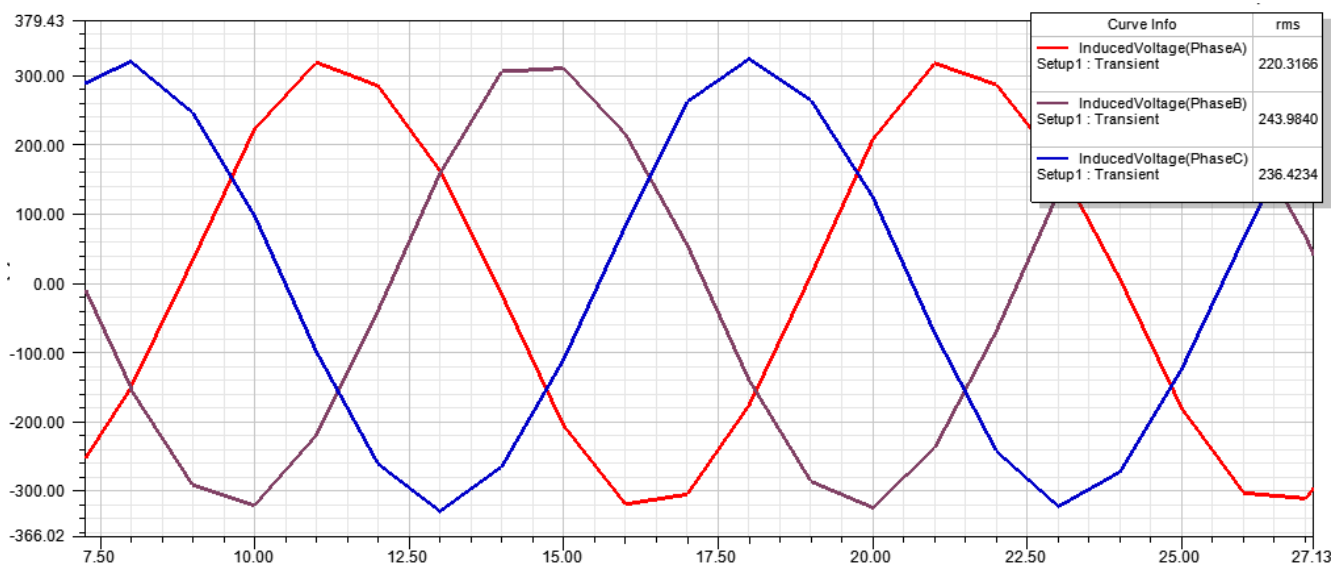


Рис.24 – Выходное напряжение генератора.

Стоит отметить что погрешность в программном комплексе может достигать 10 – 15 процентов.

Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата

Программа предлагает посмотреть картину магнитного поля машины.

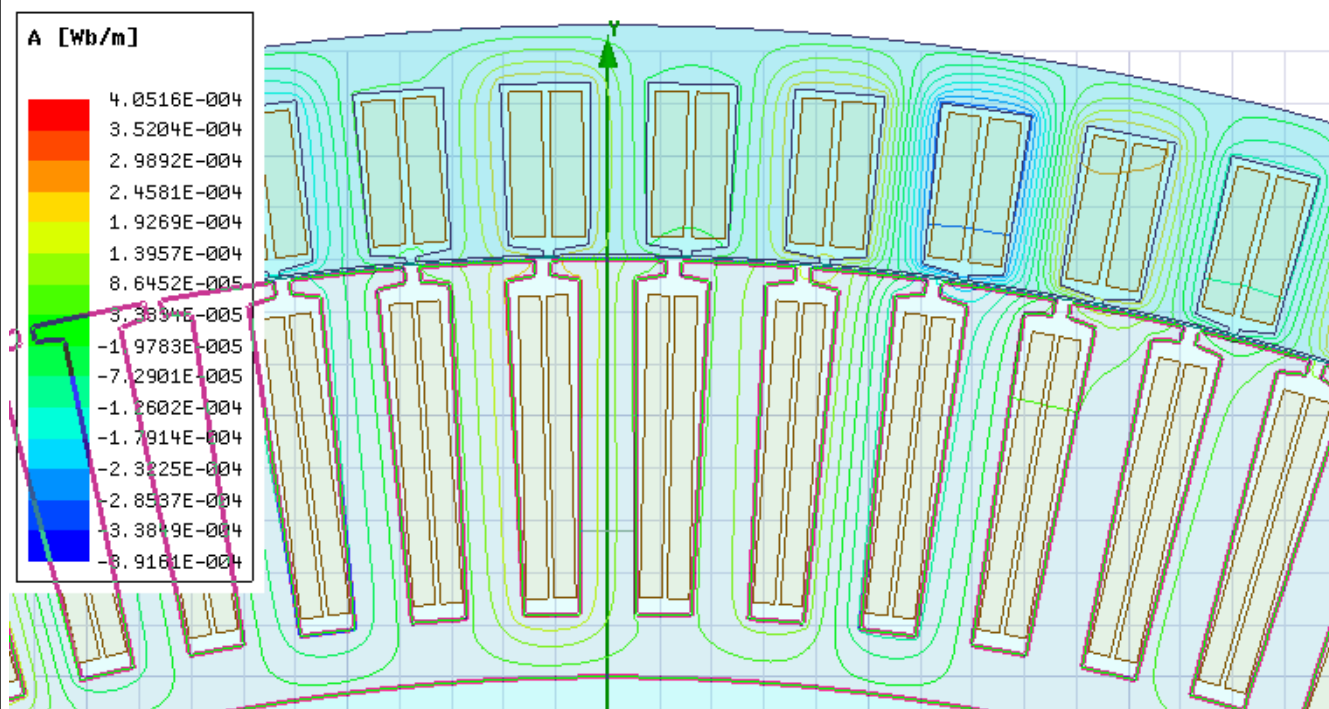


Рис.25 – Магнитное поле.

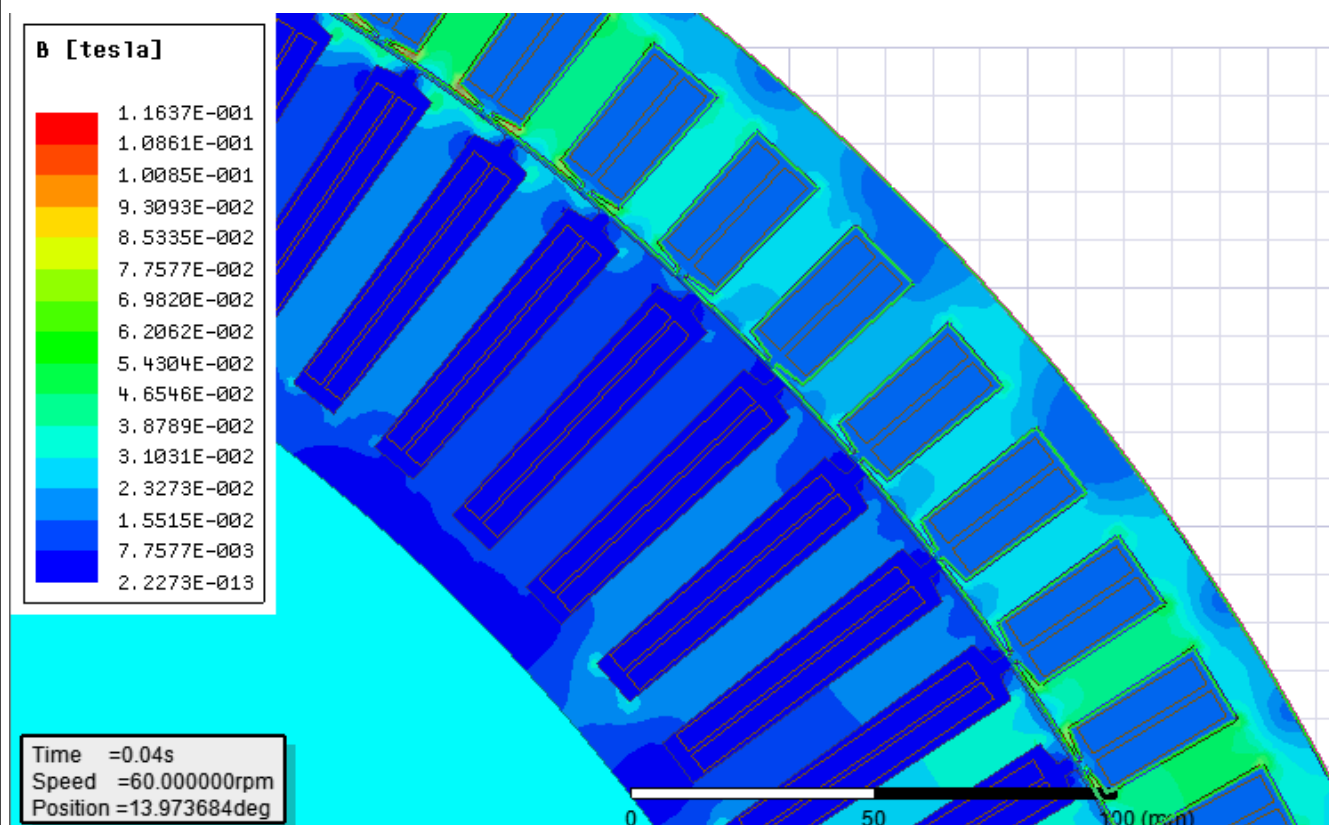


Рис.26 – Магнитное поле.

Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата

Так же инициализируем построение 3d модели генератора.

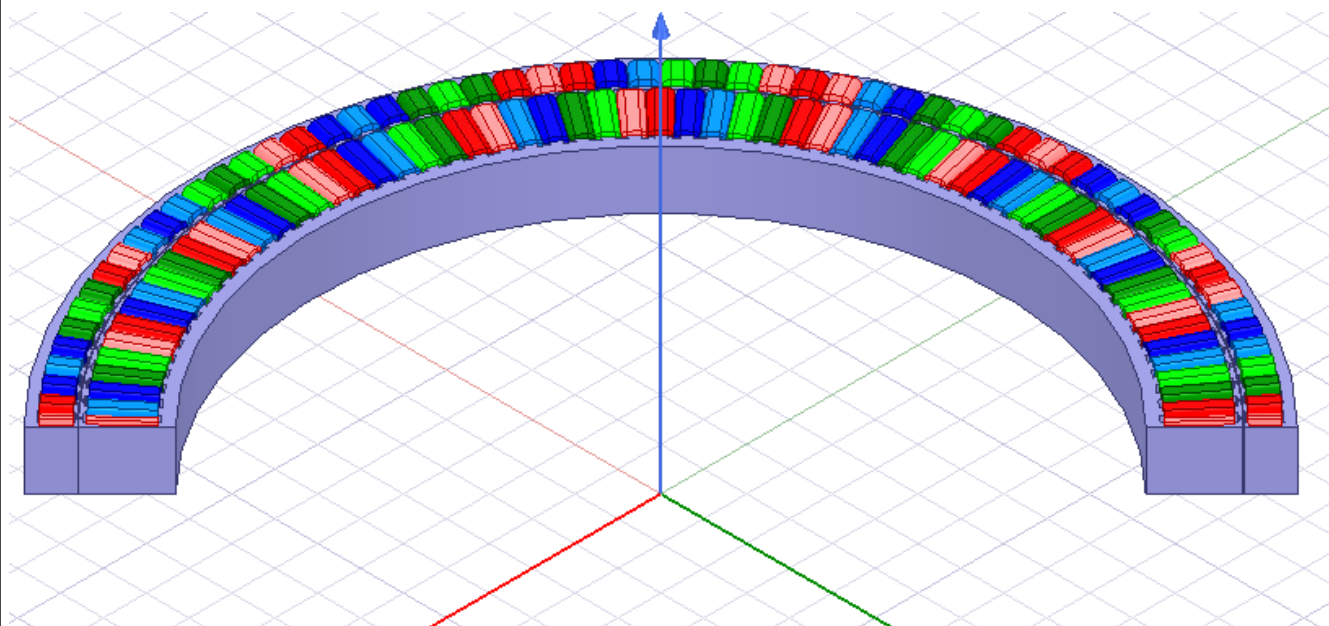


Рис.27 – Трехмерная модель машины.

4 ЭКОНОМИЧЕСКАЯ ЧАСТЬ

4.1. Определение конкурентоспособности и стоимости генератора.

Таблица 2. Сравнение с аналогами.

Производитель	ЗАО «Ветро- энергетика»	ГУП НПП «Ветроэн»	ГКМБ «Радуга»	ОАО «Инвест- профит»	ПРОЕК Т
Наименование	USW56-10	АВЭ-10СМ	Радуга-10	ВЭУ-10	АСГ-10 кВт
Номинальная мощность, кВт	10	10	10	10	10
Рабочая скорость ветра	13	13	10	11	8
Тип генератора	Синхронны й	Синхронны й	Синхронны й	Синхронны й	АСГ
Инвертор в системе возбуждения	Есть	Есть	Есть	Есть	Есть
КПД генератора, %	60	58	62	60	74
Цена в полной комплектации	830 т.руб.	870 т.руб.	850 т.руб.	870 т.руб.	600 т.руб.

Предлагаемый генератор превосходит аналоги по техническим параметрам (КПД, рабочая скорость ветра) и цене.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В процессе выпускной квалификационной работы по заданным параметрам был разработан асинхронизированный синхронный генератор мощностью 10 кВт.

Были выбраны форма магнитопровода, его длина, площадь; рассчитаны параметры обмоток. Так же была выбрана марка проводов, подходящих под рассчитанные параметры. Были рассчитаны потери в обмотках, магнитные потери в сердечнике.

Спроектированный генератор полностью удовлетворяет требованиям технического задания.

Пакет программного обеспечения MathCAD.15 обеспечил точность расчётов.

С помощью Microsoft Office.2007 была оформлена пояснительная записка к выпускной квалификационной работе.

					ЮУрГУ-140400.62.2017.260. ПЗ ВКР	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		53

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Копылов И.П. Проектирование электрических машин. М.: Логос, 2000. - 607 с. ISBN: 5-06-003841-6.

2. ГОСТ 15150-69 «Машины, приборы и другие технические изделия. Исполнения для различных климатических районов. Категорий, условия эксплуатации, хранения и транспортирования в части воздействия климатических факторов внешней среды».

3. Стандарт организации. Курсовое и дипломное проектирование. Общие требования к содержанию и оформлению / составители: Т.И. Парубочная, Н.В. Сырейщикова, В.И. Гузеев, Л.В. Винокурова. – Челябинск: Изд-во ЮУрГУ, 2008. – 56 с.

					ЮУрГУ-140400.62.2017.260. ПЗ ВКР	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		54

ПРИЛОЖЕНИЕ А – СБОРОЧНЫЙ ЧЕТРЕЖ

