

Федеральное агентство по образованию Российской Федерации
Государственное образовательное учреждение высшего профессионального образования
«Южно-Уральский государственный университет»
Факультет «Энергетический»
Кафедра «ТОЭ»

ДОПУСТИТЬ К ЗАЩИТЕ
Заведующий кафедрой
_____ (С.А. Ганджа)
_____ 2018 г.

РАЗРАБОТКА ВЕТРОЭНЕРГЕТИЧЕСКОЙ УСТАНОВКИ С
ЭЛЕКТРОТЕХНОЛОГИЕЙ НАКОПЛЕНИЯ ЭЛЕКТРОЭНЕРГИИ

ПОЯСНИТЕЛЬНАЯ ЗАПИСКА
К ВЫПУСКНОЙ КВАЛИФИКАЦИОННОЙ РАБОТЕ
ЮУрГУ–130302.2018.223.ПЗ ВКР

Руководитель проекта,
(декан энергетического факультета)
_____ (С.А. Ганджа)
_____ 2018 г.

Автор проекта
студент группы П-474
_____ (И.А. Мельников)
_____ 2018г.

Нормоконтролер,
(заведующий кафедрой ТОЭ)
_____ (С.А. Ганджа)
_____ 2018г.

Оглавление

ВВЕДЕНИЕ 6

Глава 1 ИССЛЕДОВАНИЕ АЛЬТЕРНАТИВНЫХ ВАРИАНТОВ, КОТОРЫЕ
МОГУТ БЫТЬ ИСПОЛЬЗОВАНЫ В КАЧЕСТВЕ ВЭУ 8

Глава 2 ОПИСАНИЕ ПРИНЦИПА РАБОТЫ МАШИНЫ ДВОЙНОГО
ПИТАНИЯ (МДП) 12

Глава 3 ЭЛЕКТРОПАГНИТНЫЙ РАСЧЕТ ПО КОПЫЛОВУ 15

Глава 4 РАСЧЕТ В ПРОГРАММЕ MAXWELL ANSYS 41

ЗАКЛЮЧЕНИЕ 57

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК 59

					130302.2018.223 ПЗ ВКР	7
<i>Изм.</i>	<i>Лист</i>	<i>№ докум.</i>	<i>Подпись</i>	<i>Дата</i>		

Введение

Актуальность.

На сегодняшний день можно уже точно сказать, что те ресурсы, которые используются в энергетике Российской Федерации - исчерпаемые, так как главным звеном в энергетике РФ для производства электрической энергии является использование углеводородов. По самым оптимистичным подсчетам данных видов ресурсов должно хватить на 30-40 лет, но в то же время, существует гипотеза, что "нефтегазовый век" закончится уже к 2030-ому году. Неудивительно, что основным источником электрической энергии в Российской Федерации являются ТЭС. Они дают свыше 2/3 электроэнергии. Это связано с тем, что Россия обладает большими и разнообразными запасами топливных ресурсов, ТЭС можно размещать непосредственно вблизи потребителя. Тепловые станции России работают на угле, мазуте, природном газе, сланцах, торфе, используют внутреннюю энергию Земли. Поэтому очевидным плюсом альтернативной энергетики является фактически бесконечность "рабочего тела".

Наиболее существенным является тот факт, что альтернативные способы добытия электрической энергии не несут никакой экологической опасности в отличие от знакомых нам способов. Например, при переработке газо- и нефтепродуктов в электроэнергию образуется огромное количество вредных веществ, которые даже, не смотря на всевозможные фильтры, устанавливающиеся на данные предприятия, все равно загрязняют окружающую среду своими выбросами.

В настоящее время известны следующие возможные способы альтернативных электротехнологий "добычи" энергии:

1. Использование солнечных батарей.
2. Использование органических отходов.
3. Использование энергии ветра.

					130302.2018.223 ПЗ ВКР	8
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		

Для своей дипломной работы я выбрал электротехнологию использования энергии ветра в качестве исходной для преобразования её в электрическую.

В настоящее время проблемой для ветровых установок является вырабатываемая с их помощью энергия. Из-за постоянно изменяемых направлений и скоростей ветрового потока электрические генераторы ветроэнергетических установок (ВЭУ) вращаются с различной скоростью и генерируют выходное напряжение с нестабильными величинами : напряжением, частотой, амплитудой. Использование такого вида энергии приведет к выходу из строя потребителей и к загрязнению сети.

Цель данной работы: найти наиболее выгодный с технической, экономической, технологической точек зрения агрегат, который будет надежно и качественно преобразовывать энергию ветра в электрическую.

					130302.2018.223 ПЗ ВКР	9
<i>Изм.</i>	<i>Лист</i>	<i>№ докум.</i>	<i>Подпись</i>	<i>Дата</i>		

ИССЛЕДОВАНИЕ АЛЬТЕРНАТИВНЫХ ВАРИАНТОВ, КОТОРЫЕ МОГУТ БЫТЬ ИСПОЛЬЗОВАНЫ В КАЧЕСТВЕ ВЕТРОЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ УСТАНОВОК (ВЭУ).

На сегодняшний день существуют следующие способы преобразования энергии ветра в электрическую:

1. Использование генератора с постоянными магнитами, который работает с помощью инверторов, выпрямителей, различных видов контролеров.
2. Использование асинхронного генератора.
3. Использование специальных синхронных генераторов с магнитоэлектрическим возбуждением.
4. Использование синхронных генераторов с электромагнитным возбуждением.
5. Использование асинхронизированного синхронного генератора.

Ниже приведена наиболее распространенная схема для преобразования энергии ветра в электрическую.

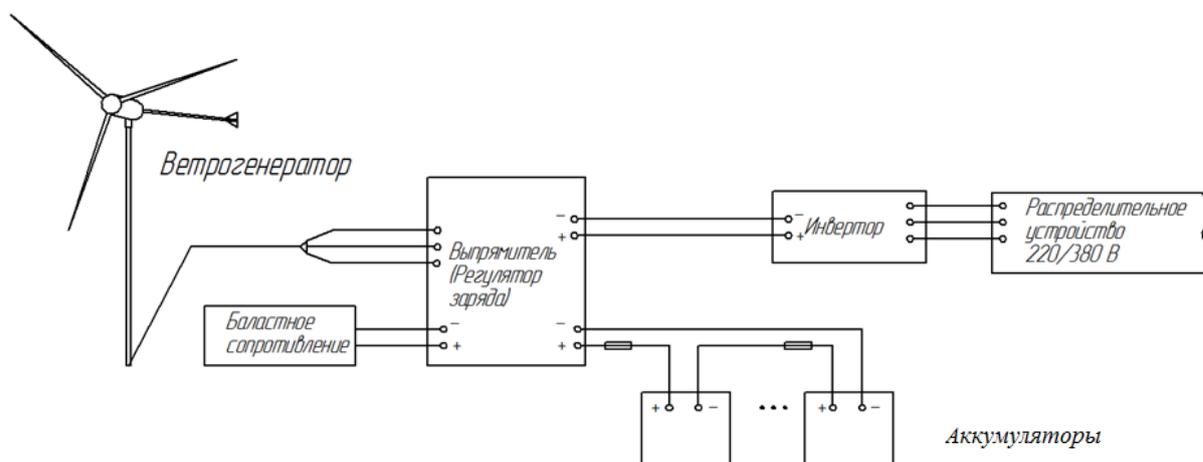


Рис. 1 распространенная схема для преобразования энергии ветра в электрическую

Данная модель состоит из большого количества элементов силовой цепи, которые делают установку ветрогенераторов дорогостоящей и долгоокупаемой. Так же при увеличении мощности установок существенно увеличатся затраты на более мощные инверторы и другие составляющие преобразователей "грязной энергии" ветрогенераторов в "чистую".

Разберем эти элементы подробнее.

1. Инверторы.

В силовой цепи данные элементы используются с целью преобразования из "грязной" энергии в "чистую" путем инвертирования напряжения из постоянного в переменное с нужными нам параметрами. Такая теоретическая возможность сталкивается с ее практической реализацией, так затраты на подобного рода электронное оборудование будут большими, а если увеличивать номинальную мощность установки, то и затраты будут увеличиваться с большей скоростью, а надежность будет снижаться.

Инвертор для ветрогенератора (преобразователь тока-напряжения) - это устройство, преобразующее постоянное напряжение аккумуляторов в переменное с частотой 50 Гц для обеспечения электропитанием 220В 50Гц бытовых приборов. Большинство инверторов способны работать как источник бесперебойного питания. То есть они автоматически переключают питание бытовых приборов на аккумулятор и обратно при отключении сети 220V 50Гц и её «появлении». Инвертора также способны автоматически заряжать аккумуляторы после использования их в качестве источника электроэнергии. Инверторная система становится полноценной системой бесперебойного электропитания для дома.

					130302.2018.223 ПЗ ВКР	11
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		

2. Выпрямители.

В нашей схеме обязательно должен стоять выпрямитель. Выпрямитель представляет собой полупроводниковый преобразователь энергии, который нужен для преобразования электрической энергии переменного тока в энергию постоянного тока из-за того, что разные потребители электрической энергии нуждаются в разном роже тока для поддержания своей работы.

Итог: из-за невозможности использовать электроэнергию, полученную от ВЭУ на базе генератора с постоянными магнитами напрямую из-за наличия большого спектра высших гармоник используют инверторы, выпрямители. Они служат для преобразования полученной "грязной" энергии в "чистую". Наличие данных элементов делает установку дорогостоящей и ненадежной. КПД снижается в результате большого количества элементов в цепи.

Использование асинхронного генератора.

Главным минусом данного решения является отсутствие собственного источника возбуждения для создания магнитного потока и дальнейшего возникновения токов. Является необходимым установка конденсаторных батарей, которые, во-первых, могут занимать большое рабочее пространство в зависимости от мощности установки, во-вторых, являются дорогими. Так же для возбуждения поля асинхронный генератор потребляет энергию из сети, что может повлечь к уменьшению коэффициента мощности ($\cos\phi$) и ухудшению качества электроэнергии в целом, что повлечет за собой штрафы.

Использование специальных синхронных генераторов с магнитоэлектрическим возбуждением.

Основными плюсами являются: исключение скользящего контакта, которые свойственен всем асинхронным машинам; простота в использовании; высокий КПД и коэффициент мощности. Отрицательными сторонами

					130302.2018.223 ПЗ ВКР	12
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		

использования данного варианта в качестве ВЭУ являются: необходимости покупки постоянных магнитов, которые несут очень большие материальные издержки; невозможность регулирования магнитного потока, т.к он наводится постоянными магнитами и тоже является постоянным, высокая стоимость генераторов.

Использование синхронных генераторов с электромагнитным возбуждением.

Преимуществом служит тот факт, что у нас появляется возможность управления реактивной составляющей мощности со стороны генератора; при применении преобразователя с явным звеном постоянного тока и инвертором напряжения при широтно-импульсном управлении, возможно получить в токе низкий состав гармоник. Недостатками являются: высокая стоимость; большое количество элементов в цепи, отсюда получается низкий КПД всей установки; наличие скользящего контакта; жесткая зависимость частоты ЭДС от скорости вращения, что не позволяет использовать данный вид ВЭУ для прямого включения в сеть в зонах с нестабильным ветровым потоком без применения ПЧ.

					130302.2018.223 ПЗ ВКР	13
<i>Изм.</i>	<i>Лист</i>	<i>№ докум.</i>	<i>Подпись</i>	<i>Дата</i>		

ОПИСАНИЕ ПРИНЦИПА РАБОТЫ МАШИНЫ ДВОЙНОГО ПИТАНИЯ

Асинхронизированный синхронный генератор это частный случай машины двойного питания (МДП). По конструкции МДП это асинхронный двигатель с фазным ротором. Это значит, что ротор и статор имеют отдельные источники питания. При этом сумма или разность частот тока, питающего ротор и статор кратны частоте вращения вала. Это значит, что если по обмотке статора течет ток с частотой 60 Гц, а обмотка фазного ротора запитана частотой 20 Гц, то частота вращения вала МДП может быть либо 40 Гц, либо 80 Гц. Но в то же время МДП имеет и характерные особенности работы синхронных машин. Так, например, ток, получаемый в роторе, идет из внешнего источника, а не в результате скольжения, как в асинхронных машинах. В машинах подобного типа обмотку статора и ротора подключают таким образом, чтобы поля статора и ротора вращались в противоположные стороны. При этом получается частота вращения выше синхронной. Неподвижность полей статора и ротора будет только в том случае, если ротор будет вращаться в сторону вращения поля статора с двойной частотой.

Достоинства машин двойного питания:

1. Возможность работы с достаточно высокой частотой вращения вала- порядка 6000 об/мин при питании от производственной сети, это позволяет получать удвоенную мощность при аналогичных габаритных размерах, номинальных параметров магнитного потока и крутящего момента.
2. Возможность удвоения номинального напряжения в генераторе за счет последовательной схемы соединения обмоток статора и ротора.

					130302.2018.223 ПЗ ВКР	14
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		

Недостатки машины двойного питания:

1. Так называемое, "качание" ротора, которое возможно в синхронных машинах. Именно качание и может стать причиной того, что машина выпадет из синхронного режима работы.

2. Могут присутствовать скользящие контакты для передачи тока на ротор. Суть скользящих контактов при передаче тока: подаваемая на ротор мощность может достигать половины всей мощности машины, в отличие от синхронных машин, у которых данный показатель равен примерно 1-5%. Данный недостаток не присущ БМДП.

Бесконтактная машина двойного питания - именно то исполнение МДП, которое было использовано в качестве силового агрегата для данной дипломной работы.

Данную машину можно описать следующим образом: она конструктивно состоит из двух синхронных машин. Статор данного агрегата имеет два магнитопровода с двумя секциями обмоток. На валу установлены два ротора, обмотки которых создают единую общую цепь.

В качестве вариантов использования данных машин можно привести несколько наиболее распространенных сфер применения:

1. Использование в качестве турбогенераторов. В данной отрасли очень выгодно используется один из плюсов - возможность работы на повышенных частотах вращения вала - 6000 об/мин. Это позволяет получить большую удельную мощность генератора и турбины. В случае использования обычных синхронных генераторов при частоте вращения 6000 об/мин частота тока равна 100 Гц, следовательно для получения производственной частоты 50 Гц необходима установка преобразователей, что влечет за собой дополнительные капиталовложения.

					130302.2018.223 ПЗ ВКР	15
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		

2. Ветроэлектрогенераторы. Для получения на выходе напряжения промышленной частоты и параметров ротор генератора запитывается от инвертора с частотой, равной разности частоты сети и частоты вращения вала генератора. В этом случае мощность инвертора оказывается меньше выходной мощности генератора.

3. Преобразователи частоты. Машины двойного питания могут использоваться в качестве преобразователей частоты с действующего значения до нужной нам производственной - 50 Гц. Для достижения данной задачи используются две соединенные валами одинаковые МДП. Роторы обоих силовых агрегатов запитываются частотой 5 Гц, но с разным чередованием фаз.

Асинхронизированная синхронная машина (АСМ) - это разновидность машины двойного питания. Главным отличием АСМ от обычной синхронной машины состоит в наличии у первой двух обмоток возбуждения, которые располагаются вдоль и поперек оси. Можно сказать, что ротор имеет двухфазную обмотку. В нормальном режиме работы ротор питается постоянным током, что присуще и нормальному режиму обычной синхронной машины. Но как только АСМ переходит в аварийный режим работы (то есть нарушается синхронность вращения полей ротора и статора), ротор начинает получать питание от источника переменного тока. Частоты данных токов сдвинуты по фазе на 90 градусов, что делает возможным получить поле возбуждения, вращающееся относительно ротора. Частота токов возбуждения регулируется автоматически и непрерывно таким образом, что поля возбуждения и якоря вращаются синхронно, благодаря чему они создают вращающий момент постоянного знака. В результате машина не выпадает из синхронизма и устойчивость её работы повышается, что и составляет преимущество данной машины.

					130302.2018.223 ПЗ ВКР	16
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		

Глава 3

ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫЙ РАСЧЕТ ПО КОПЫЛОВУ

Расчет выполняется по учебнику "Проектирование электрических машин" под редакцией профессора И.П. Копылова.

Так как асинхронизированная синхронная машина по своему принципу действия является синхронной машиной, то и расчет производится по примеру расчета синхронной машины.

Исследуемый генератор имеет внутреннее исполнение статора и внешнее исполнение ротора.

Исходные данные представлены в табл. 1

$P_H, \text{Вт}$	10000	U_H	220
n	60	$f_1, \text{Гц}$	50
p	12	q_1	1
b_{z1}	0.004	$B\delta$	0.5
$A, \text{А/м}$	30000	$\alpha\delta$	0.75
K_B	1.11	$K_{об}$	1
$\cos\phi$	0.95	K_e	1.1
a	1	k_{st}	0.95

					130302.2018.223 ПЗ ВКР	17
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		

Табл. 1

Выбор главных размеров

Проектирование синхронных машин начинают с выбора главных размеров: внутреннего диаметра статора D и расчетной длины $l\delta$.

Расчетную электромагнитную мощность (Вт) определяем по формуле :

$$P_{элмаг} = \frac{K_e \cdot P_n}{\cos\phi} = 11579 \text{ (Вт)} \quad (1)$$

Коэффициент K_e представляет собой отношение ЭДС в якоре при номинальной нагрузке к номинальному напряжению. Он зависит от $\cos\phi$ и сопротивления обмотки статора.

Диаметр расточки статора находим по формуле:

$$D = \frac{t_1 \cdot Z_1 \cdot q_1}{\pi} = 1,016 \text{ (м)} \quad (2)$$

По найденному диаметру определяем полюсное деление:

$$\tau = \frac{\pi \cdot D}{2p} = 0,0319 \quad (3)$$

Так же по полученному диаметру D находим расчетную длину машины $l\delta$

$$l\delta = \frac{6,1 \cdot P_{элмаг}}{\alpha\delta \cdot K_v \cdot K_{об} \cdot A \cdot B\delta \cdot D^2 \cdot n} = 0,1 \text{ (м)} \quad (4)$$

Где: $\alpha\delta$ - расчетный коэффициент полюсного перекрытия; K_v - коэффициент формы поля; $K_{об}$ - коэффициент обмотки статора; A - линейная

					130302.2018.223 ПЗ ВКР	18
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		

нагрузка статора, А/м; $B\delta$ - максимальное значение индукции в воздушном зазоре при номинальной нагрузке, Тл; D - внутренний диаметр статора, м.

Как $\alpha\delta$, так и $K\psi$ зависят от размеров и конфигурации полюсного наконечника, так же от воздушного зазора и полюсного деления.

Обмоточный коэффициент $K_{об}$ определяют по шагу обмотки статора и числу пазов на полюс и фазу.

Значения индукции $B\delta$ и линейной нагрузки A определяем по рис. 2

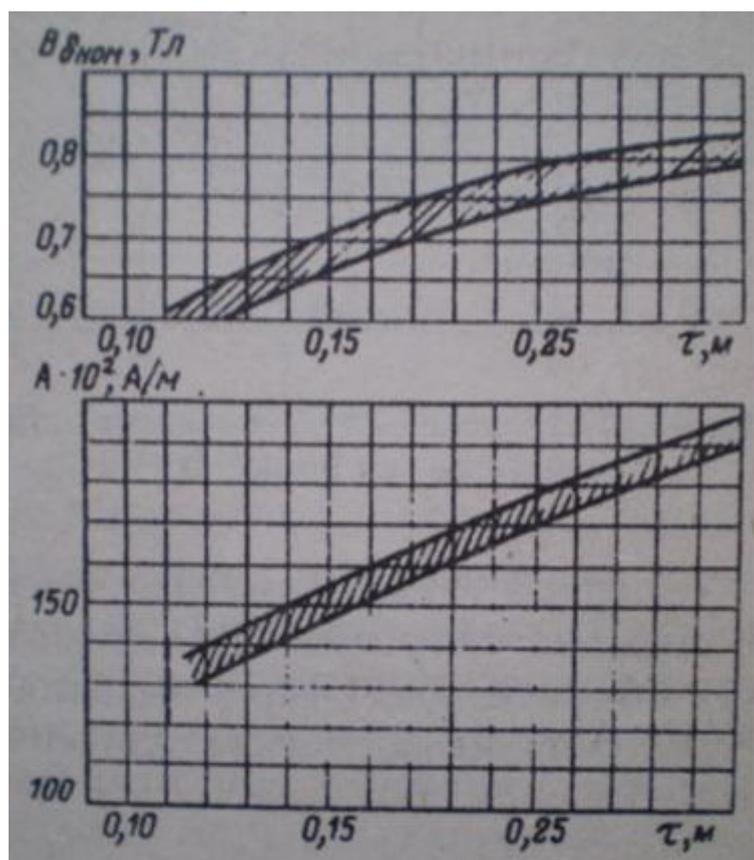


Рис. 2 Значения индукции $B\delta$ и линейной нагрузки A

Главным фактором, который контролирует линейную нагрузку - A , является нагрев обмотки возбуждения, потому что с возрастанием величины линейной нагрузки электрические потери, возникающие в обмотке, становятся больше. Оптимально возможное значение A зависит от класса нагревостойкости используемой в агрегате изоляции. Также данная величина

					130302.2018.223 ПЗ ВКР	19
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		

зависит от типа конструкции и, в первую очередь, от возможных вариантов охлаждения.

Максимальный предел индукции $B\delta$ контролируется насыщением магнитной цепи, главным образом, индукция ограничивается насыщением слоя, расположенного в зубцовой зоне. С увеличением насыщения повышается и мощность, которая требуется для возбуждения машины, что является причиной возрастания габаритных размеров обмотки и полюсов.

Индуктивные сопротивления обмотки напрямую зависят от отношения $A/B\delta$. При увеличении данного отношения величина индуктивных сопротивлений также становится больше.

Обмотка и зубцовая зона статора

Номинальный фазный ток обмотки статора (I_n) при соединении в треугольник имеет величину в $\sqrt{3}$ раз меньше, чем величина номинального тока. Если обмотка статора соединена в звезду, то фазный ток равен линейному.

Номинальный ток определяется по формуле:

$$I_n = \frac{P_n}{m \cdot U_n \cdot \cos\phi} = 16.8 \text{ (A)} \quad (5)$$

Далее выбираем число пазов. При этом нужно учитывать некоторые факты, которые влияют на технико-экономические показатели моделируемой машины. При большом количестве пазов увеличивается расход дорогостоящей пазовой изоляции, так же механическая прочность зубцовой зоны становится меньше, однако становится лучше форма кривых ЭДС и МДС обмотки статора.

Уменьшение числа пазов приводит к возрастанию объема тока в пазу. Так же увеличивается перепад температуры в изоляционном слое, увеличиваются добавочные потери в меди, а так же пульсационные и поверхностные потери.

					130302.2018.223 ПЗ ВКР	20
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		

Помимо этого, увеличение катушки в размере усложняется ее практическое производство и укладка в пазы.

Оптимальный выбор числа пазов Z_1 достигается методом расчета и сопоставления между собой определенного количества вариантов. Для начала рассчитывается зубцовое деление t_{z1} по формуле:

$$t_{z1} = \frac{b_{z1} \cdot B_{z1} \cdot k_{st}}{B \delta} = 0.01 \text{ (м)} \quad (6)$$

Количество пазов Z_1 должно удовлетворять следующим критериям:

1. Число пазов должно быть кратно числу фаз и числу параллельных ветвей.
2. Число пазов на полюс и фазу $q_1 = \frac{Z_1}{2 \cdot p \cdot m}$ должно быть целым, причем d не может быть кратно числу фаз и должно быть меньше пар полюсов.

Число пазов Z_1 находится по формуле:

$$Z_1 = \frac{\pi \cdot D}{t_{z1}} = 63 \quad (7)$$

Затем определяем число эффективных проводников в пазу u_n

$$u_n = \frac{t_1 \cdot A \cdot \frac{f}{f_1}}{I_H} = 18.3 \quad (8)$$

Значение числа эффективных проводников округляем до ближайшего целого четного числа: $u_n=18$.

					130302.2018.223 ПЗ ВКР	21
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		

По найденному значению u_n уточняем линейную нагрузку:

$$A_{ум} = \frac{Z_1 \cdot u_n \cdot I_H}{\pi \cdot a \cdot D} = 28945 \text{ (A/м)} \quad (9)$$

Полученное уточненное значение линейной нагрузки отличается от выбранной в начале расчета менее, чем на $\pm 5\%$. Из этого можно сделать вывод, что данное число пазов является наилучшим вариантом для нашей машины.

Число пазов статора не равно числу пазов ротора. Этим достигается так называемое "дробление". Это нужно для уменьшения колебаний мощности. Это будет видно на графике зависимости мощности от времени, который будет представлен ниже.

Для определения общего числа зубцов нужно рассчитать число пазов на полюс и фазу q_1 :

$$q_1 = \frac{Z_1}{2 \cdot p \cdot m} = 1 \quad (10)$$

Задавшись числом q_1 , определяем общее число зубцов статора:

$$Z_1 = 2 \cdot p \cdot m \cdot q_1 = 63 \quad (11)$$

Пазы, обмотка и ярмо статора

					130302.2018.223 ПЗ ВКР	22
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		

После окончательного определения числа пазов статора и зубцового деления t_{z1} начинаем определять габаритные размеры пазов проводниковой зоны обмотки.

Опытные данные, полученные из предыдущих случаев проектирования, показывают, что с точки зрения продуктивного использования конструируемой машины существует наиболее оптимальное отношение паза $b_{п1}$ к зубцовому делению. В случае прямоугольной формы пазов для агрегатов с номинальной мощностью свыше 100 кВт, самым оптимальным отношением является число 0,42. Небольшие численные погрешности (численные отклонения) несущественно отражаются на выходных показателях двигателя. Пользуясь данной информацией можно составить пропорциональную зависимость ширины паза $b_{п1}$ от зубцового деления t_{z1} :

$$b_{п1} \approx (0,34 \dots 0,50) \cdot t_{z1} \quad (12)$$

Чем больше габариты у проектируемой машины, тем больше выбирают данное значение. Ширина паза тем больше, чем выше напряжение у машины и чем толще изоляция. Коэффициент заполнения меньше, если паз уже. При увеличении численного значения ширины паза начинают расти и добавочные потери на поверхности полюсных наконечников. Окончательное значение ширины паза появляется только после выбора проводников обмотки.

Сечение эффективного проводника обмотки статора определяют по формуле:

$$q_{эф} = \frac{I_n}{a \cdot J_1} = 5,61 \text{ (мм}^2\text{)} \quad (13)$$

					130302.2018.223 ПЗ ВКР	23
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		

После получения значения сечения эффективного проводника в обмотке статора можно рассчитать диаметр $d_{эф}$ по формуле:

$$d_{эф} = \sqrt{\frac{4 \cdot q_{эф1}}{\pi}} = 2,6 \text{ (мм)} \quad (14)$$

Максимально возможная плотность тока определяется по произведению величин A - линейной нагрузки и J_1 - плотности тока. Данное произведение является характеристикой тепловой нагрузки обмотки и зависит от класса нагревостойкости используемой изоляции. Плотность тока для нашего расчета равна 3.

Во время определения габаритных размеров проводников следует пользоваться рядом рекомендаций.

Для уменьшения вихревых токов и ,соответственно, для уменьшения потерь на них, проводники укладываются в паз плашмя. Размеры проводника по высоте паза - толщину проводника a_1 - не следует брать больше 3...3,5 мм. По возможности необходимо "держат" значение поперечного значения проводника не больше, чем 18...20 мм² . Если полученное значение сечения эффективного проводника больше данного порога, то следует его разбить на несколько элементарных проводников - $n_{эл}$.

Физическая плотность тока вычисляется по формуле:

					130302.2018.223 ПЗ ВКР	24
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		

$$J1 = \frac{I_{ном}}{a \cdot q_{эф}} = 3 \text{ (A/м}^2\text{)} \quad (15)$$

Обмотка статора

Число эффективных витков в фазе статора вычисляется по формуле:

$$w1 = Z1 \cdot \frac{u_n \cdot q1}{a \cdot m \cdot 2} = 46 \quad (16)$$

Длина лобовой части обмотки статора:

$$Ln1 = m \cdot t_{z1} \cdot q1 + b_{z1} \cdot 4 = 0,0468 \text{ (м)} \quad (17)$$

Расчет зубцовой зоны статора

Площадь паза в обмотке статора:

$$S_{паза} = 400 \text{ (мм}^2\text{)} \quad (18)$$

Ширина зубца:

$$b_{z1} = \frac{B\delta \cdot t_{z1}}{B_{z1} \cdot k_{st}} = 0,02 \text{ (м)} \quad (19)$$

Высота зубца:

					130302.2018.223 ПЗ ВКР	25
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		

$$h_{n1} = \frac{S_{паза}}{b_{z1} \cdot 1000000} = 0,02 \text{ (м)} \quad (20)$$

Воздушный зазор и полюсы ротора

Определяющим фактором в возможных больших или маленьких технико-экономических потерях является воздушный зазор. При увеличении зазора увеличиваются и размеры обмотки возбуждения, так же возрастают и потери в этой обмотке. С другой стороны, если воздушные зазоры маленькие, то повышаются добавочные потери на поверхности полюсных наконечников, а так же при возможных деформациях ротора, связанных с аварией, либо с увеличением температур, может появиться опасность задевания ротором статора.

От зазора зависят возможные кратковременные перегрузки синхронной машины по моменту и мощности. Максимальные численные значения момента и электромагнитной мощности напрямую зависят от синхронного индуктивного сопротивления по продольной оси X_d . Чем больше зазор, тем меньше индуктивное сопротивление по данной оси, и, следовательно, большими будут и кратности максимальных значений момента $M_{max}/M_{ном}$ и мощности $P_{эм}/P_{ном}$.

Находим длину полюсной дуги по формуле:

$$b_p = \alpha \cdot \tau = 0,0215 \text{ (м)}, \quad (21)$$

где α - коэффициент полюсного перекрытия (конструктивный).

					130302.2018.223 ПЗ ВКР	26
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		

От данного коэффициента α зависит использование активного объема машины. При увеличении численного значения данного коэффициента при остальных неизменных значениях уменьшается и объем активной части машины, но увеличивается поток рассеяния полюсов. Как правило, данный коэффициент имеет значения в пределах 0,68...0,73.

Полюсы изготавливают обычно шихтованными. В крупногабаритных машинах полюса выполняют из стали Ст3 толщиной 1 или 1,4 мм.

В быстроходных машинах - скорость которых: $v \approx \pi \cdot D \cdot \frac{n}{60} > 30 \text{ м/с}$ прикрепляют с помощью хвостов к шихтованному острову.

В машинах, у которых номинальная мощность меньше 100 кВт полюсы собираются из листов электротехнической стали и скрепляются болтами, которые проходят через эти листы и присоединяются к напресованной на вал втулке или напрямую к валу.

Толщина воздушного зазора равна 0,7 мм.

Расчет зубцовой зоны ротора

Длина витка обмотки ротора вычисляется по формуле:

$$L_{cp} = 2 \cdot (l\delta + Ln1) = 0,3 \text{ (м)} \quad (22)$$

Число зубцов ротора определяется по формуле:

$$Z_2 = \frac{2 \cdot p \cdot q_2 \cdot m}{m} \cdot m^2 = 45 \quad (23)$$

					130302.2018.223 ПЗ ВКР	27
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		

Зубцовое деление находится по формуле:

$$t_2 = \frac{\pi \cdot (D + 2 \cdot \delta)}{Z_2} = 0,01 \quad (24)$$

Ширина зубца ротора:

$$b_{z_2} = \frac{B \delta \cdot t_2}{B_{z_2} \cdot k_{st}} = 0,02 \text{ (м)} \quad (25)$$

Высота зубца ротора:

$$h_{n_2} = 2 \cdot h_{n_1} = 0,02 \text{ (м)} \quad (26)$$

Наружный диаметр ротора:

$$D_{нар} = D + 2 \cdot \delta + 2 \cdot h_{n_2} + 2 \cdot h_{a_2} = 1,2 \text{ (м)} \quad (27)$$

Расчет магнитной цепи

Расчет магнитной цепи производят для определения МДС обмотки возбуждения, которая нужна для создания магнитного потока машины Φ , когда агрегат работает на холостом ходу.

При вращении ротора данный магнитный поток наводит в обмотке статора электродвижущую силу - ЭДС. Тем самым, после расчета магнитной цепи может быть произведено построение зависимости $E=f(F_{f0})$, которая имеет название - характеристика холостого хода.

					130302.2018.223 ПЗ ВКР	28
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		

При расчете магнитной цепи задаются фазной ЭДС E в обмотке статора и по известному выражению определяют полезный поток:

$$\Phi = \frac{E}{4 \cdot k_{\delta} \cdot f \cdot w_1 \cdot k_{об1}} = 1,196 \cdot 10^{-3} \text{ (Вб)}, \quad (28)$$

где w_1 и $k_{об1}$ - число витков и обмоточный коэффициент фазы статора; f - частота, Гц; k_{δ} - коэффициент формы поля, который представляет собой отношение действующего значения индукции к ее среднему значению.

В случае синусоидального распределения магнитного потока в зазоре двигателя коэффициент формы поля равен 1,11.

Магнитодвижущая сила обмотки возбуждения находится путем сложения всех магнитных напряжений отдельных участков магнитной цепи исследуемой машины.

МДС воздушного зазора

Магнитное напряжение воздушного зазора:

$$F_{\delta} = \frac{B_{\delta} \cdot \delta \cdot k_{\delta}}{\mu} = 327,8 \text{ (А)} \quad (29)$$

В данной формуле $\mu = 1,256 \cdot 10^{-6}$ Гн/м.

Коэффициент воздушного зазора учитывает зубчатое строение статора и ротора. Перераспределение потока в зазоре происходит в результате наличия зубцов и пазов, из-за индукция и магнитное напряжение зазора над коронками зубцов увеличиваются. Данный коэффициент находится путем умножения коэффициентов воздушного зазора для статора и ротора.

					130302.2018.223 ПЗ ВКР	29
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		

$$k_{\delta} = k_{\delta 1} \cdot k_{\delta 2} = 1,17 \quad (30)$$

Коэффициенты $k_{\delta 1}$ и $k_{\delta 2}$ определяются по следующим формулам:

$$k_{\delta 1} = \frac{t_{z1} + 10 \cdot \delta}{t_{z2} - h_{u1} + 10 \cdot \delta} = 1,13 \quad (31)$$

$$k_{\delta 2} = \frac{t_{z2} + 10 \cdot \delta}{t_{z2} - h_{u2} + 10 \cdot \delta} = 1,04 \quad (32)$$

МДС зубцовой зоны статора

Магнитное напряжение зубцов статора:

$$Fz1 = Hz1 \cdot h_{n1} = 12,6 (A) \quad (33)$$

Во время нахождения значения H_{z1} , которое соответствует найденному значению индукции, применяют кривые намагничивания стали, из которой изготовлена магнитная система статора.

В нашем случае была использована сталь марки Ст2212.

Кривая намагничивания стали марки Ст2112 представлена на Рис.3

					130302.2018.223 ПЗ ВКР	30
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		

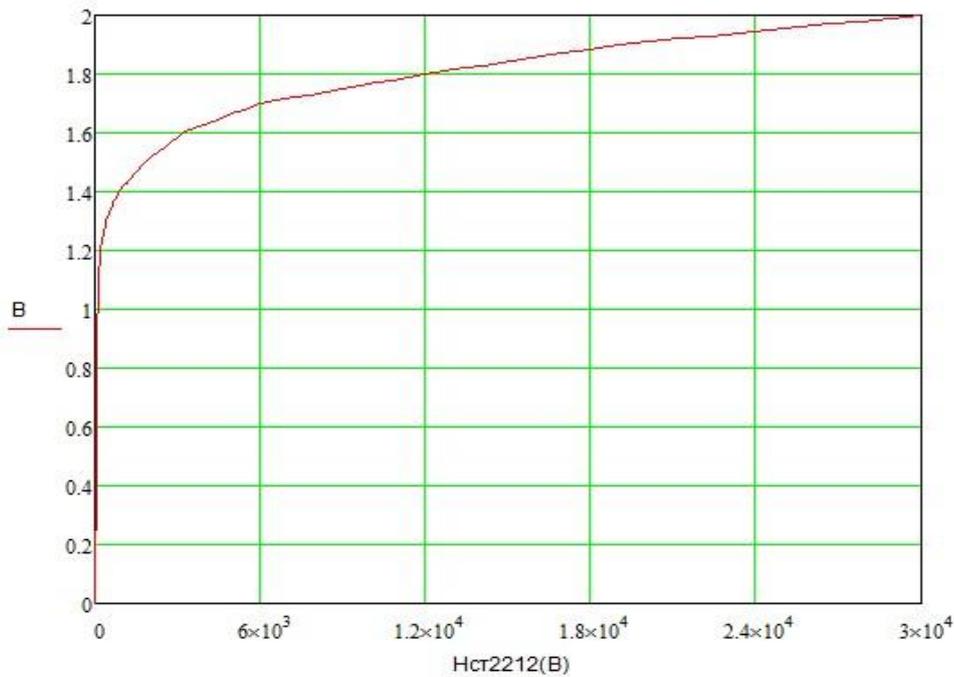


Рис.3 Кривая намагничивания стали марки Ст2112

Расчет значения магнитной индукции для одного сечения ведется по формуле:

$$B_{z1} = \frac{B\delta \cdot t_{z1}}{b_{z1} \cdot k_{st}} = 1,35 \text{ (Тл)} \quad (34)$$

МДС спинки статора

Магнитное напряжение для спинки статора:

$$F_a = L_{a1} \cdot H_{a1} = 108,9 \text{ (А)} \quad (35)$$

В данной формуле L_a - это длина магнитной линии в спинке статора, которая высчитывается по формуле:

					130302.2018.223 ПЗ ВКР	31
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		

$$La1 = \frac{\pi \cdot (D - 2 \cdot h_{n1} - h_{a1})}{2 \cdot p} = 0,0268 \text{ (м)} \quad (36)$$

Напряженность $Ha1$ определяется по той же кривой намагничивания стали марки Ст2212, которая представлена на рисунке выше.

Индукции, соответствующая данному значению напряженности находится по формуле:

$$Ba = \frac{\Phi_H}{2 \cdot l\delta \cdot h_{a1} \cdot k_{st}} = 1,4 \text{ (Тл)} \quad (37)$$

МДС зубцовой зоны ротора

Магнитное напряжение зубцов ротора:

$$Fz2 = Hz2 \cdot h_{z2} = 18,7 \text{ (А)} \quad (38)$$

Напряженность магнитного поля зубцов ротора находится по кривой намагничивания стали, из которой выполнен ротор, по индукции с численным значение равным индукции в зубце ротора - $Bz2$.

В нашем случае полюсы ротора изготовлены из стали марки Ст2112. Соответственно используем эту же кривую намагничивания для стали марки Ст2112.

Исходя из полученных значений определяем индукцию:

					130302.2018.223 ПЗ ВКР	32
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		

$$B_{z2} = \frac{B\delta \cdot t_{z2}}{b_{z2} \cdot k_{st}} = 1,35 \text{ (Тл)} \quad (39)$$

МДС спинки ротора

Находим индукцию по формуле:

$$B_{a2} = \frac{\Phi_n}{2 \cdot l\delta \cdot h_{a2} \cdot k_{st}} = 1,4 \text{ (Тл)} \quad (40)$$

Длина магнитной линии в спинке ротора высчитывается по следующей формуле:

$$L_{a2} = \frac{\pi \cdot (D + 2 \cdot h_{n2} + h_{a2})}{2 \cdot p} = 0,143 \text{ (м)} \quad (41)$$

Магнитное напряжение в спинке ротора:

$$F_{a2} = L_{a2} \cdot H_{z2} = 123,161 \text{ (А)} \quad (42)$$

МДС холостого хода

Магнитное напряжение, действующее во время ХХ находится по формуле:

$$F_e = F\delta + F_{z1} + F_{a1} + F_{z2} + F_{a2} = 588 \text{ (А)} \quad (43)$$

					130302.2018.223 ПЗ ВКР	33
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		

$$I_{\mu} = \frac{p \cdot F_{\nu}}{0,9 \cdot m \cdot w_1 \cdot K_{об1}} = 56,7 \text{ (A)} \quad (44)$$

Определение МДС реакции якоря

МДС обмотки возбуждения нужна для создания необходимого потока при нагрузке. Для ее определения нужно учитывать определенное влияние реакции якоря.

Для этого сначала находится амплитуда первой гармоники МДС реакции якоря:

$$F_a = 0,45 \cdot m \cdot \frac{w_1 \cdot K_{об1} \cdot I_H}{p} = 87,26 \text{ (A)} \quad (45)$$

Обычно МДС реакции якоря - F_a разделяют на две составляющие: продольную F_d и поперечную F_q . Это необходимо для количественного учета влияния реакции якоря на магнитное поле, создаваемое в исследуемой машине. У F_d максимум совпадает с осью полюсов, а у F_q максимум совпадает с осью, которая проходит через середину межполюсного пространства.

Углом, который проходит между током I_f и ЭДС E_0 , является, так называемый, угол Ψ . Магнитодвижущие силы якоря и обмотки возбуждения имеют различное пространственное распределение, и поэтому различные потоки создаются за счет равенства их значений.

Для более легкого рассмотрения данных двух составляющих необходимо привести одну из составляющей МДС к другой. Как правило при расчетах используется характеристика ХХ, поэтому рациональным будет решение - привести синусоидальные МДС якоря привести к прямоугольным МДС обмотки возбуждения. Это достигается путем замены F_d и F_q эквивалентными

					130302.2018.223 ПЗ ВКР	34
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		

им значениями МДС обмоток возбуждения - F_{ad} и F_{qd} . Данные F определяются таким образом, чтобы потоки первой гармоники, создаваемые ими, были соответственно равны потокам первой гармоники, создаваемой F МДС якоря. Чтобы была возможность перевода от F_d и F_q к F_{ad} и F_{qd} необходим ввод коэффициентов - k_{ad} и k_{aq} .

$$F_{ad} = k_{ad} \cdot F_d = 64,23 \quad (46)$$

$$F_{aq} = k_{aq} \cdot F_q = 41,45 \quad (47)$$

Данные коэффициенты берем равными: $k_{ad} = 0,85$ и $k_{aq} = 0,95$.

В случае, когда машина является ненасыщенной, следует принимать, что продольное и поперечное поля существуют независимо друг от друга и оказывают непосредственное влияние друг на друга. Но если машине присуще насыщение, то такое отступление может сделать расчет неправильным - с погрешностями. Стоит заметить, что учет взаимного влияния данных двух составляющих МДС - продольного и поперечного потоков в случае, когда машина является насыщенной, несет большие трудности, отсюда есть допущения и данный этап расчета может быть приближенным.

Эмпирическим путем анализирования магнитных полей были выведены коэффициенты, описанные выше - k_d и k_q , на которые умножают непосредственно F_{ad} и F_{aq} .

					130302.2018.223 ПЗ ВКР	35
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		

Ослабление поля под одним краем полюса и усиление данного поля под другим, в основном, идет из-за влияния поперечной реакции якоря. В ненасыщенной машине изменения результирующего потока не наблюдается. По мере насыщения магнитной цепи машины происходит увеличение потока, принадлежавшему одному из краев полюса, в меньшей степени, чем ослабление под другим краем полюса. Отсюда следует, что результирующим поток в этом случае уменьшается. Для обеспечения компенсации размагничивающего действия поперечной реакции якоря необходимо увеличение значения МДС на величину равную численному значению F_{qd} .

При равномерном воздушном зазоре данную величину значения F_{qd} можно определить по формуле:

$$F_{qd} = 0,005 \cdot \frac{b_p}{\delta} \cdot Fa \cdot \cos(\psi) = 31,08 \quad (48)$$

$$F_{ad} = \chi_d \cdot k_{ad} \cdot Fa \cdot \sin(\psi) \cdot 0 = 0 \quad (49)$$

Параметры обмотки статора для установившегося режима

Параметры обмотки статора необходимо знать, в первую очередь, для построения векторных диаграмм, а в дальнейшем они необходимы и для расчета характеристик синхронных машин.

Сначала рассчитываем активное сопротивление обмотки статора по формуле:

$$r_1 = \frac{\rho_1 \cdot w_1 \cdot L_{cp1}}{q_{\phi 1} \cdot 0,000001} = 0,875 \text{ (Ом)} \quad (50)$$

					130302.2018.223 ПЗ ВКР	36
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		

Далее высчитывается активное сопротивление фазы в относительных единицах:

$$r_1^* = r_1 \cdot \frac{I_{ном.ф}}{U_{ном.ф}} = 0,067 \quad (51)$$

Расчет обмотки возбуждения

Обмотка возбуждения в синхронных машин запитывается постоянным током. Несколько лет назад для осуществления питания обмоток использовались специальные генераторы постоянного тока, которые называются возбудители.

В настоящее время для осуществления процесса возбуждения синхронной машины используются статические устройства.

Некоторые серии синхронных машин, например, 13-21 габаритов - СД2, СГ2, СДН2 и прочие оснащаются тиристорными возбудительными устройствами - ТВУ. Главной отличительной чертой данного вида устройства является бесконтактная и быстродействующая система управления током возбуждения во всех возможных эксплуатационных режимах работы устройства. Так же одной из главных особенностей является возможность автоматического регулирования возбуждения. Два данных фактора позволяют увеличить надежность и повышает качество использование машин. Так же немаловажным фактом является то, что КПД тиристорных возбудительных устройств выше, чем у генераторов постоянного тока.

Питание обмотки возбуждения в ТВУ может осуществляться несколькими возможными вариантами:

1. Через тиристорный преобразователь;

					130302.2018.223 ПЗ ВКР	37
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		

2. От сети переменного тока с номинальным напряжением 380 В с использованием согласующего трансформатора;
3. От дополнительной трехфазной обмотки, которая расположена на статоре.

Специальные преобразователи выполняют функцию выпрямления переменного тока в постоянный. Они имеют трехфазную схему со средним выводом при выпрямленном напряжении до 100 В или трехфазную мостовую при напряжении выше 100 В. Пусковой резистор подключается параллельно обмотке возбуждения проектируемого синхронного двигателя через тиристорный ключ.

Регулирование и управление в тиристорном возбудительном устройстве осуществляется с помощью электронной системы управления.

Иногда в качестве возбудительных устройств применяют бесконтактные системы. В данном варианте к обмотке возбуждения напрямую (без использования контактных колец) подключается уже выпрямленное напряжение от машины переменного тока небольшой мощности (синхронной или асинхронной), у которой якорь располагается на одном валу с синхронной машиной. Выпрямителя, закрепленные на роторе, вращаются вместе с ним.

В нашем случае, питание для возбуждения получается от аккумуляторной батареи, которая установлена рядом с генератором. Данный способ решает очень важную задачу - накопление электроэнергии непосредственно у места, где она добывается. При желании можно устанавливать большее количество аккумуляторных батарей, что позволит увеличить количество накопленной энергии. Так же данный способ возбуждения позволяет уменьшить стоимость ветровой установки, так как во всех других способах для возбуждения участвуют дополнительные машины, которые стоят гораздо дороже аккумуляторной батареи. Данный способ также уменьшает шум, который вырабатывается ВЭУ.

					130302.2018.223 ПЗ ВКР	38
<i>Изм.</i>	<i>Лист</i>	<i>№ докум.</i>	<i>Подпись</i>	<i>Дата</i>		

Во время проектирования обмоток возбуждения стараются увеличить сечение используемых проводников обмотки и уменьшить количество ее витков при непосредственном увеличении тока возбуждения. Все это делается для улучшения теплоотдачи и заполнения катушки медью.

Из-за этого питающее обмотки возбуждения напряжение выбирают низкое и в ряде случаев нестандартное. В качестве начального ряда напряжений, которые могут быть использованы для этой цели, выделяют следующий ряд напряжений : 25, 35, 45, 65, 80, 100, 115, 160, 200, 230 В. Данный перечень численных значений напряжений не является строго обязательным, и в зависимости конкретной поставленной задачи и цели напряжения могут принимать иные значения, не представленные в данном ряду.

При расчете МДС обмотки возбуждения пользуются следующей формулой:

$$F_{ov} = F_v + F_{ad} + F_{qd} = 561,7 \text{ (A)} \quad (52)$$

Номинальное напряжение на возбудителе: $U_v=220 \text{ (В)}$

Длина лобовой части обмотки ротора:

$$L_{n2} = m_2 \cdot t_{z2} + b_{z2} \cdot 4 = 0,0468 \text{ (м)} \quad (53)$$

Длина витка обмотки ротора определяется по формуле:

$$L_{cp2} = 2 \cdot (l_{\delta} + L_{n2}) = 0,3 \text{ (м)} \quad (54)$$

					130302.2018.223 ПЗ ВКР	39
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		

Следующим шагом является расчет поперечного сечения проводников обмотки:

$$q_{\phi} = \frac{\rho \cdot 2 \cdot F_{\phi n} \cdot \rho_2 \cdot L_{cp2}}{U_{\phi}} = 1,25 \cdot 10^{-6} \quad (55)$$

$$d_{\phi} = \sqrt{\frac{4 \cdot q_{\phi}}{4}} = 1,12 \cdot 10^{-3} \quad (56)$$

Плотность тока в обмотке ротора берем равной: $J = 1500000 \text{ А/м}^2$.

Благодаря этому можно определить ток фазы обмотки ротора по формуле:

$$I_{\phi} = J_{\phi} \cdot q_{\phi} = 1,87 \text{ (А)} \quad (57)$$

Число проводников в пазу определяется по формуле:

$$u_{\phi n} = \frac{F_{\phi n}}{I_{\phi}} = 182,7 \quad (58)$$

Число проводников в фазе:

$$w_{\phi} = \frac{F_{\phi n} \cdot 2 \cdot p}{I_{\phi}} = 18272 \quad (59)$$

					130302.2018.223 ПЗ ВКР	40
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		

Глава 4

РАСЧЕТ В ПРОГРАММЕ MAXWELL ANSYS

Предварительные расчеты показали, что при выборе целого числа пазов на полюс и фазу генератор имеет недопустимый уровень пульсаций реактивного момента (более 20 %). Для ветроэнергетической установки это недопустимо из-за высокого уровня создаваемого генератором шума, так как ветрогенераторы могут работать вблизи жилых помещений и даже на крышах зданий. Для уменьшения уровня шума обычно применяют скос пазов, но данное решение усложняет технологию изготовления железа статора при его больших диаметрах. Достаточно эффективным способом борьбы с реактивным моментом является использование дробного числа на полюс и фазу. Это

					130302.2018.223 ПЗ ВКР	41
<i>Изм.</i>	<i>Лист</i>	<i>№ докум.</i>	<i>Подпись</i>	<i>Дата</i>		

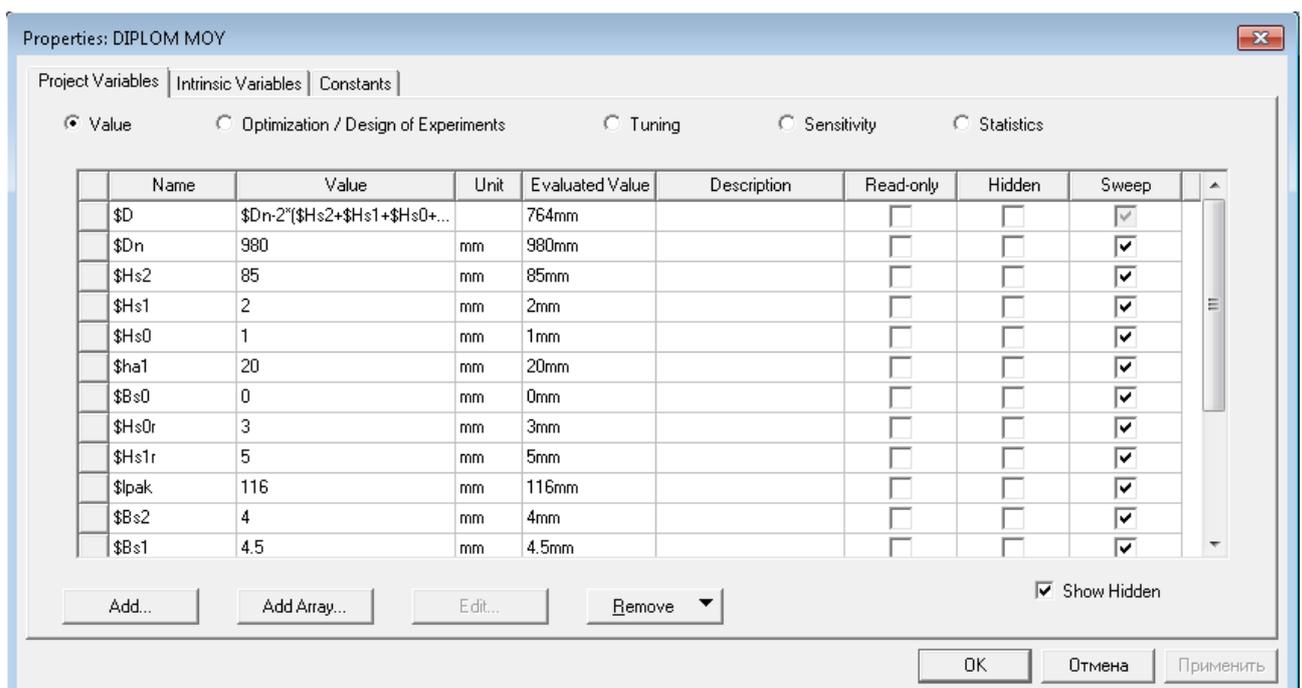
показали последние исследования, проводимые доцентом кафедры «Электрооборудование летательных аппаратов» Согриным А.И. По его рекомендациям была подобрана следующая дробность: 63 паза на статоре и 45 пазов на роторе. Для данной дробности были выполнены поверочные расчеты в программе Maxwell Ansys.

Расчет в программе Maxwell Ansys условно можно разделить на три этапа:

1. Создание модели при помощи инструмента RMXprt;
2. Создание модели при помощи инструмента Maxwell2D на основании уже созданной модели в RMXprt;
3. Создание модели при помощи инструмента Maxwell3D на основании модели, созданной в RMXprt.

Создание модели при помощи инструмента RMXprt

Первым шагом является задание в специальном окне Project Variables переменных, которые могут быть изменены при дальнейшей работе в данном окне.



					130302.2018.223 ПЗ ВКР	42
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		

Рис. 4 Окно "переменные"

Далее нужно задать габаритные размеры, вид исполнения ротора/статора, количество полюсов/зубцов в нужных окнах, представленных на Рис. 5, 6.

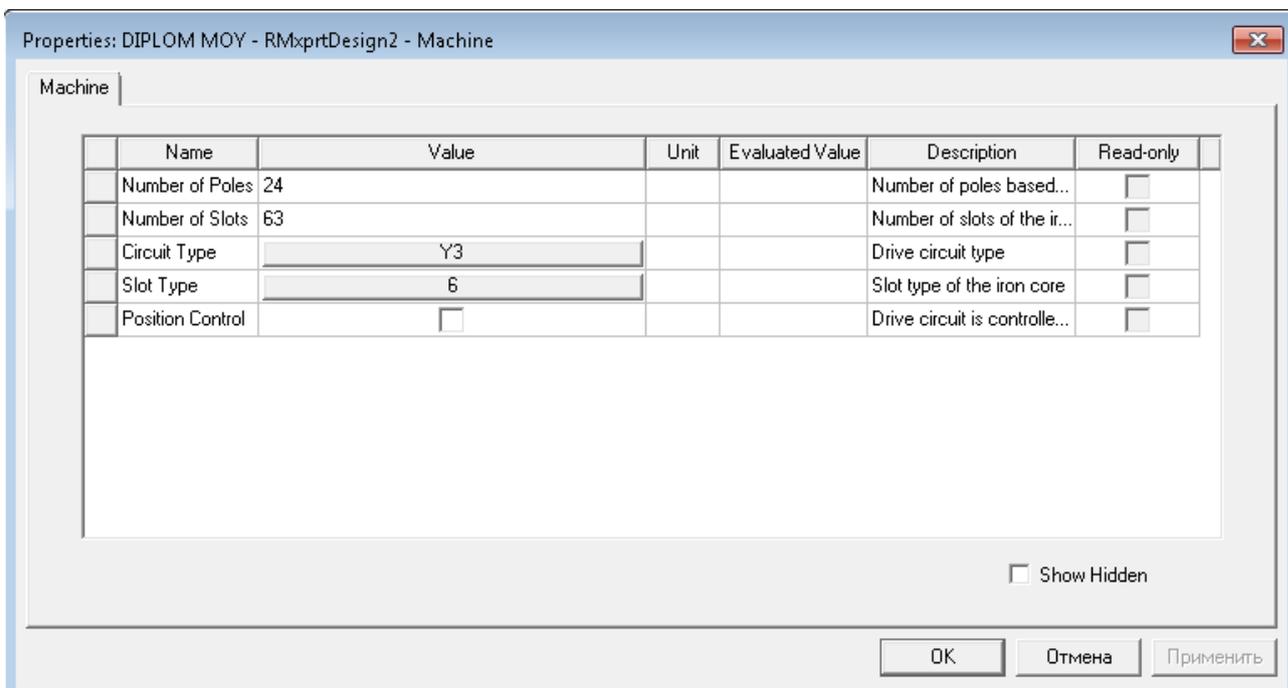


Рис. 5 Окно с числом полюсов и зубцов

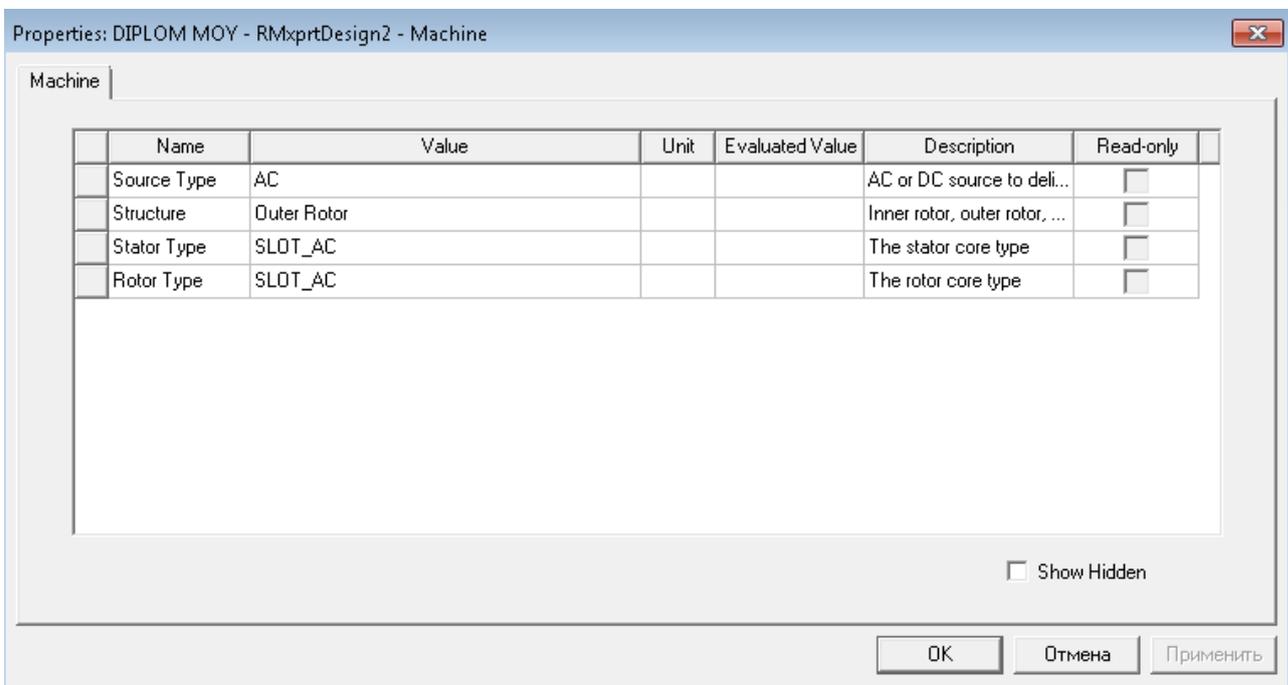


Рис.6 Окно с исполнением ротора/статора

					130302.2018.223 ПЗ ВКР	43
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		

Так же происходит "закладка" обмотки в пазы ротора и статора (окно Winding) - Рис. 7

Winding		End/Insulation				
Name	Value	Unit	Evaluated Value	Description	Read-only	
Winding Layers	2			Number of winding layers	<input type="checkbox"/>	
Winding Type	Whole-Coiled			Stator winding type	<input type="checkbox"/>	
Parallel Branch...	1			Number of parallel bran...	<input type="checkbox"/>	
Conductors pe...	6		6	Number of conductors ...	<input type="checkbox"/>	
Coil Pitch	3			Coil pitch measured in ...	<input type="checkbox"/>	
Number of Stra...	0		0	Number of strands (nu...	<input type="checkbox"/>	
Wire Wrap	0.1	mm		Double-side wire wrap t...	<input type="checkbox"/>	
Wire Size	Width:2.05mm Thickness:1.45mm			Wire size, 0 for auto-de...	<input type="checkbox"/>	
Conductor Type	copper1			Steel type of the stator ...	<input type="checkbox"/>	

Рис. 7 Окно "Winding"

Был использован двухслойный вариант исполнения обмотки. Программа раскладывает обмотку по пазам с использованием наших заданных параметров. Это показано на Рис. 8

					130302.2018.223 ПЗ ВКР	44
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		

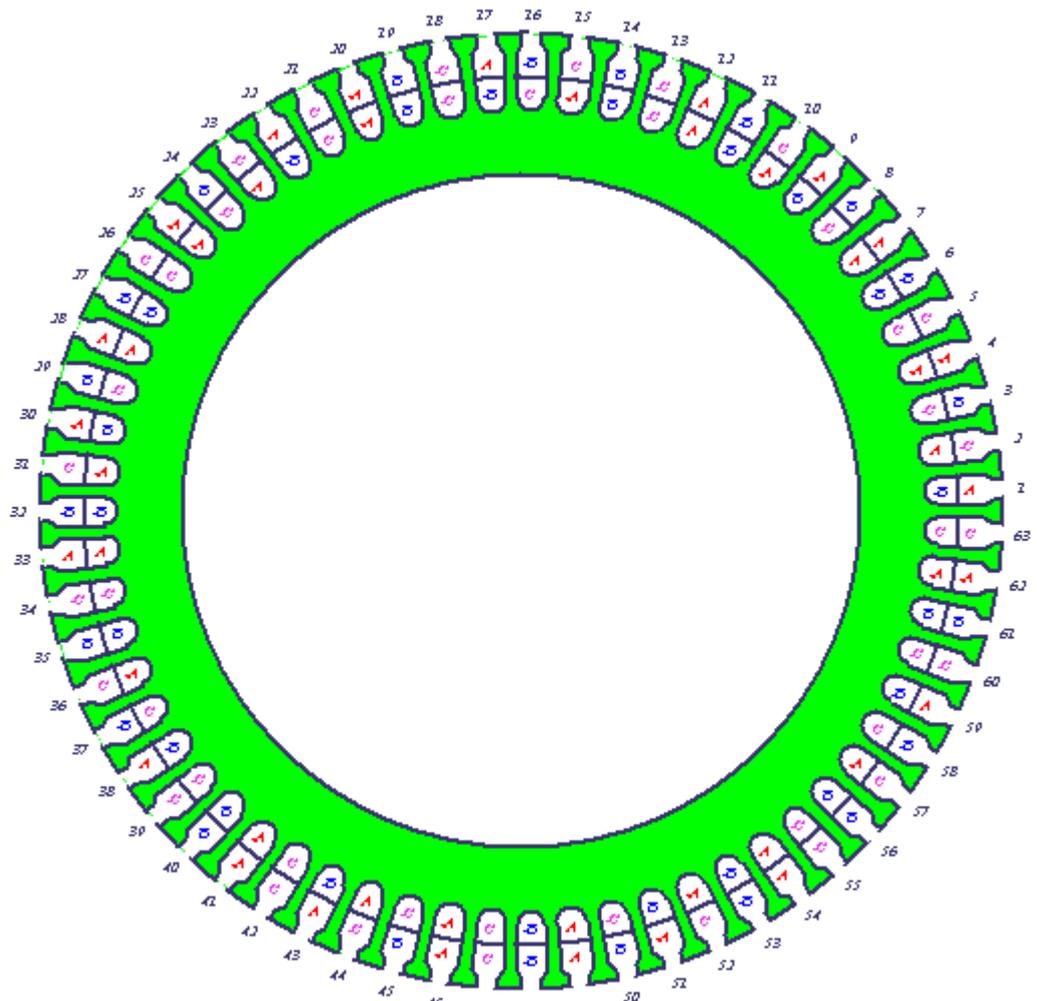


Рис. 8 Обмотка

					130302.2018.223 ПЗ ВКР	45
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		

Следующим шагом является задание номинальных параметров работы исследуемого агрегата.

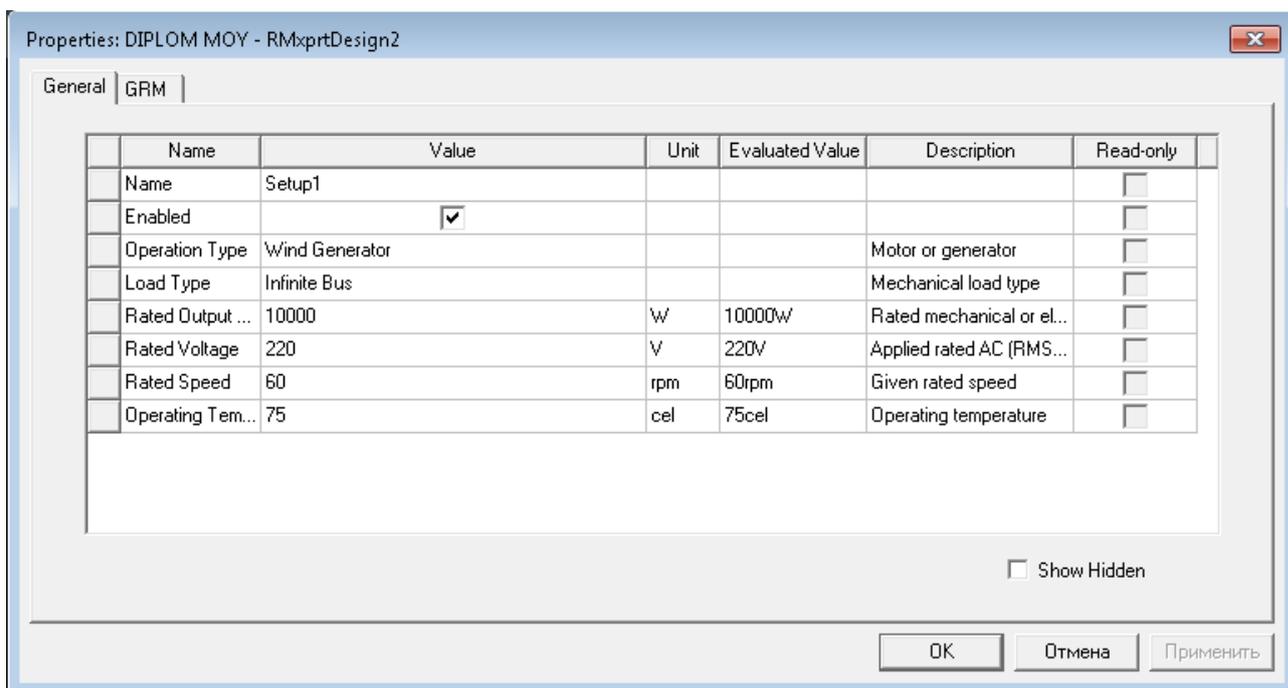


Рис. 9 Окно с номинальными параметрами

После определения номинальных режимов работы и задания геометрических параметров запускается программа, которая потом выстраивает кривые работы машины. Так же данная программа оформляет лист, на котором представлены все необходимые для анализа параметры работы исследуемого генератора. Данные и кривые представлены на рисунках.

					130302.2018.223 ПЗ ВКР	46
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		

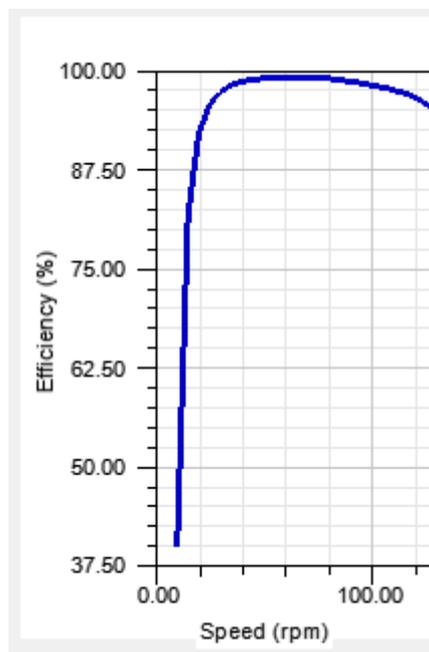


Рис. 10 Зависимость КПД от скорости вращения

График зависимости КПД от скорости вращения ограничен 150 об/мин, так как последующие обороты выше машина развивать не может и не будет, так как она может уйти в "разнос". Тем самым может устанавливаться либо тормозные механизмы, которые будут механически воздействовать на вал ветрогенератора и тем самым уменьшать его скорость до номинальной, либо электромагниты, которые будут так же ограничивать скорость вращения вала.

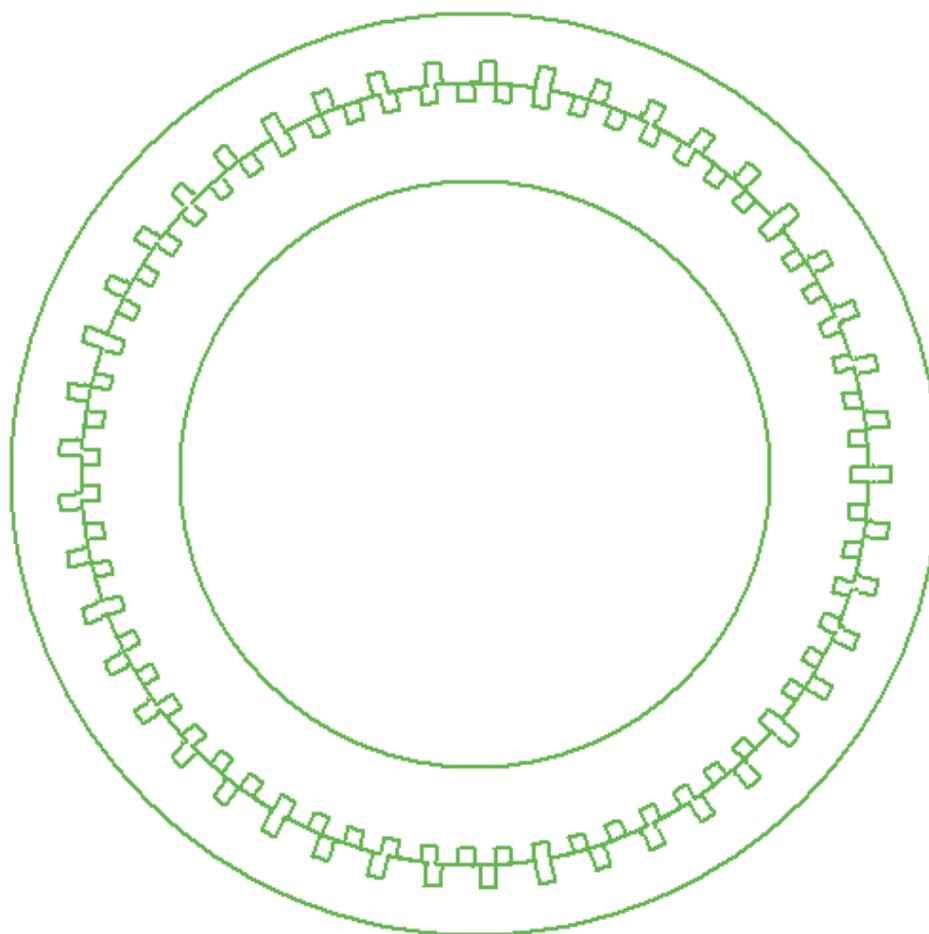
Copper Loss (W):	85.4543
Stator Copper Loss (W):	5.95878
Rotor Copper Loss (W):	79.4955
Iron-Core Loss (W):	0
Stator-Tooth Core Loss (W):	0
Stator-Yoke Core Loss (W):	0
Stator Surface Excess Loss (W):	0
Rotor Surface Excess Loss (W):	0
Stator-Tooth Pulsating Loss (W):	0
Rotor-Tooth Pulsating Loss (W):	0
Mechanical Loss (W):	0
Friction Loss (W):	0
Windage Loss (W):	0
Total Loss (kW):	0.0854543
Mechanical Input Power (kW):	9.78537
Electrical Output Power (kW):	9.69992
Efficiency (%):	99.1267
Shaft Torque (N.m):	1689.83
Rotor Speed (rpm):	55.2977
Stator Power Factor:	0.97

					130302.2018.223 ПЗ ВКР	47
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		

TRANSIENT FEA INPUT DATA	
For Stator Winding:	
Number of Turns:	63
Parallel Branches:	1
Terminal Resistance (ohm):	0.000138681
End Leakage Inductance (H):	6.9385e-005
For Field Winding:	
Number of Turns:	750
Parallel Branches:	1
Terminal Resistance (ohm):	0.034392
End Leakage Inductance (H):	0.014992
2D Equivalent Value:	
Equivalent Model Depth (mm):	116
Equivalent Stator Stacking Factor:	0.95
Equivalent Rotor Stacking Factor:	0.95
Estimated Rotor Inertia (kg m ²):	89.0206

Рис.11 Таблицы с данными, требуемыми для оптимизации работы генератора

На Рис.12 представлен чертеж машины, исследуемой в данной дипломной работе.



					130302.2018.223 ПЗ ВКР	48
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		

Рис. 12 Внешний вид машины

Создание модели при помощи инструмента Maxwell2D

В качестве исходных данных принимается информация, полученная из RМхprt. Программа выстраивает всю геометрию только уже в 2D плоскости. Для большей информативности и возможности регулирования была построена схема замещения обмотки статора, представленная на Рис. 11.

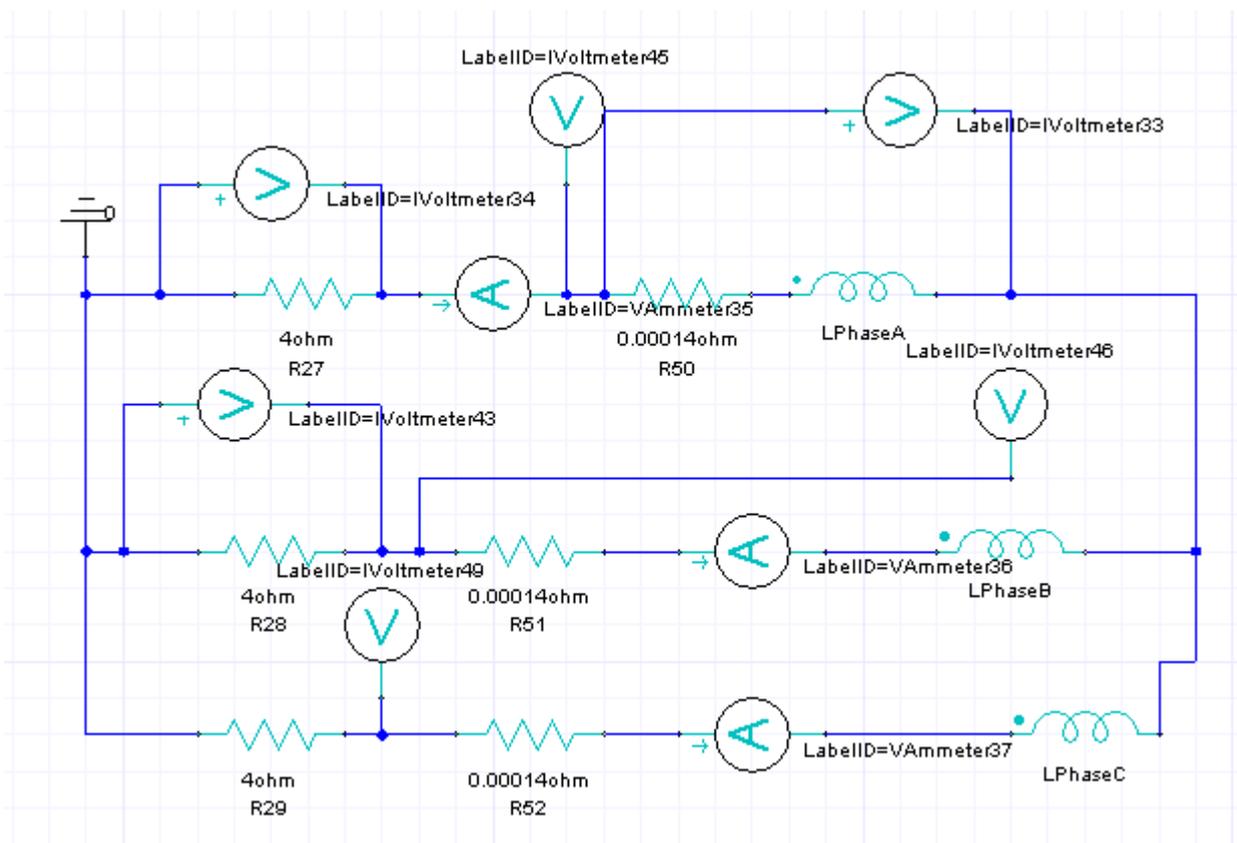


Рис. 13 Схема

					130302.2018.223 ПЗ ВКР	49
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		

Внешний вид машины, выполненной при помощи данного инструмента, показан на рисунке.

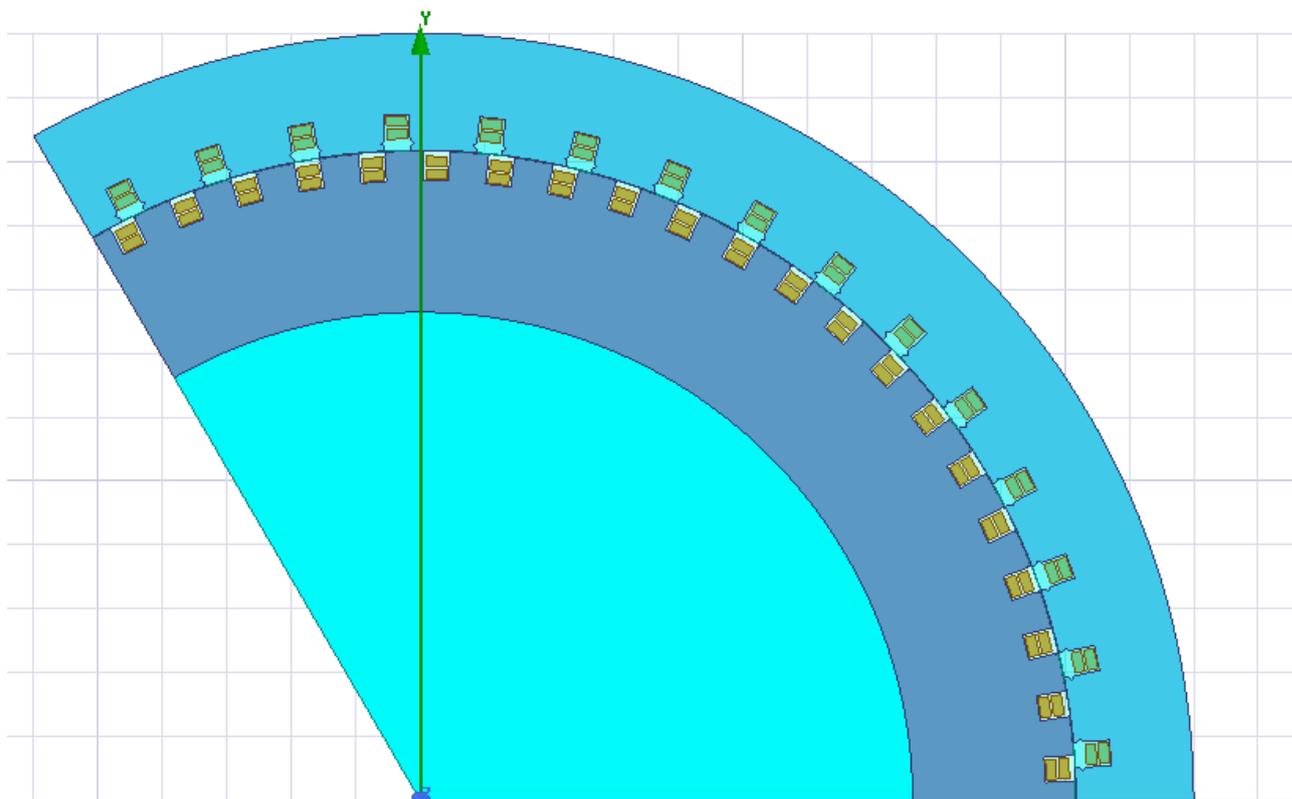


Рис. 14

Следующим шагом является корректировка исследуемого генератора, а именно: перевод работы обмоток фаз статора (PhaseA, PhaseB, PhaseC) в режим External (внешнее подключение) и присоединение данной схемы к нашей машине.

В схеме были уточнены сопротивления на фазах статора, а так же введено сопротивление якоря и при помощи вольтметров, подключенных к схеме были получены данные о напряжении.

					130302.2018.223 ПЗ ВКР	50
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		

Используя различные переменные, были построены графики кривых, которые характеризуют режим работы исследуемого агрегата. Графики представлены на рисунках.

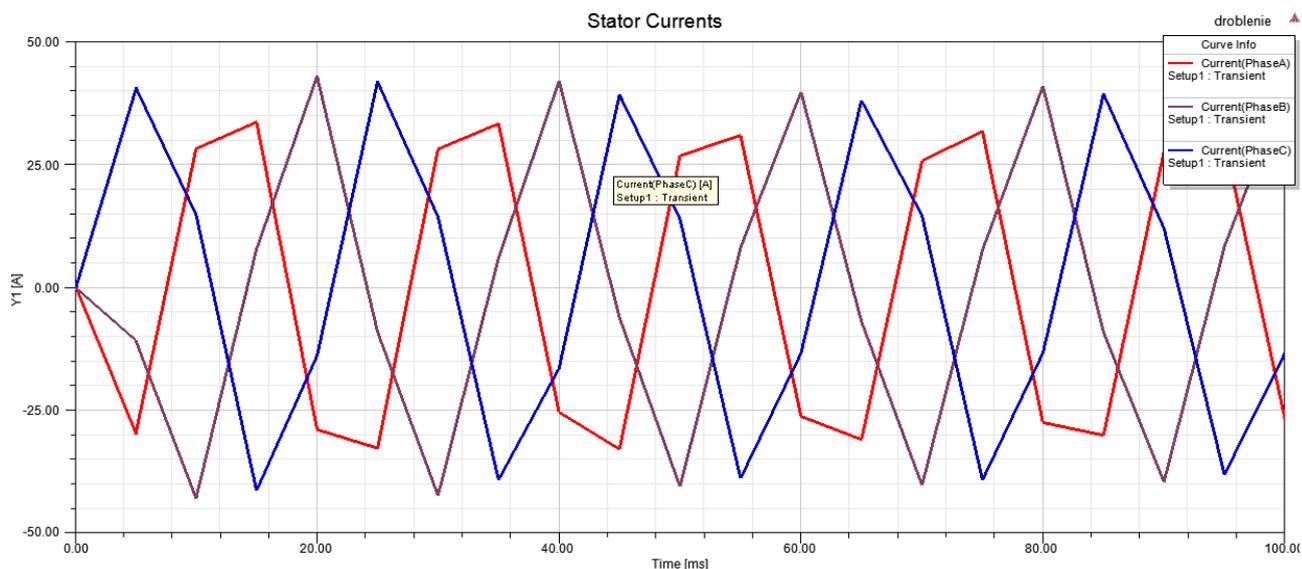


Рис. 15 График зависимостей токов в фазах статора от времени

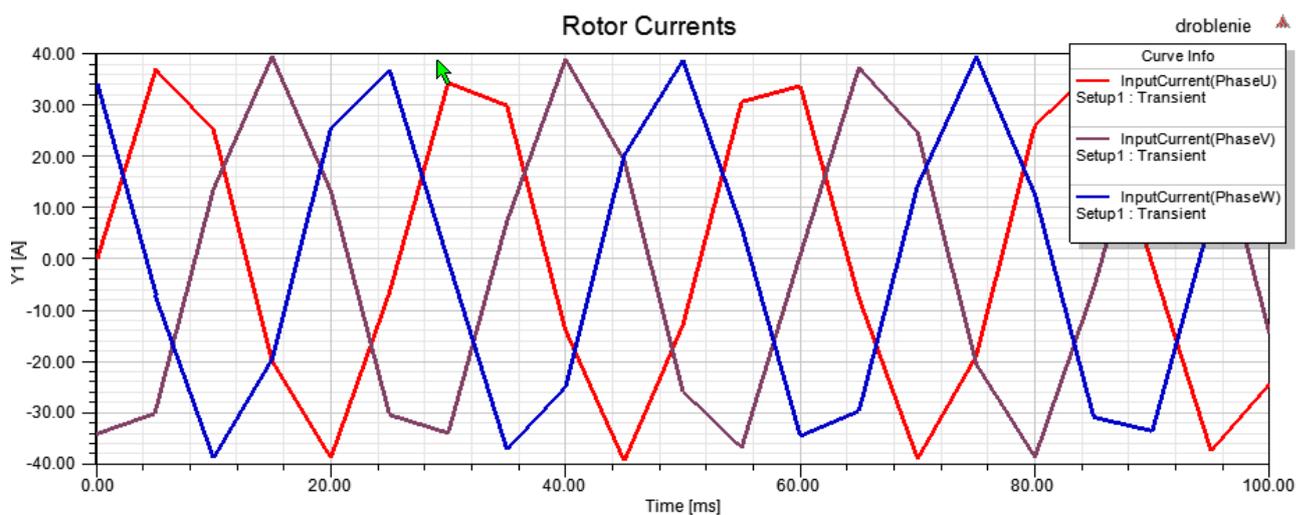


Рис.16 График зависимостей токов в фазах ротора от времени

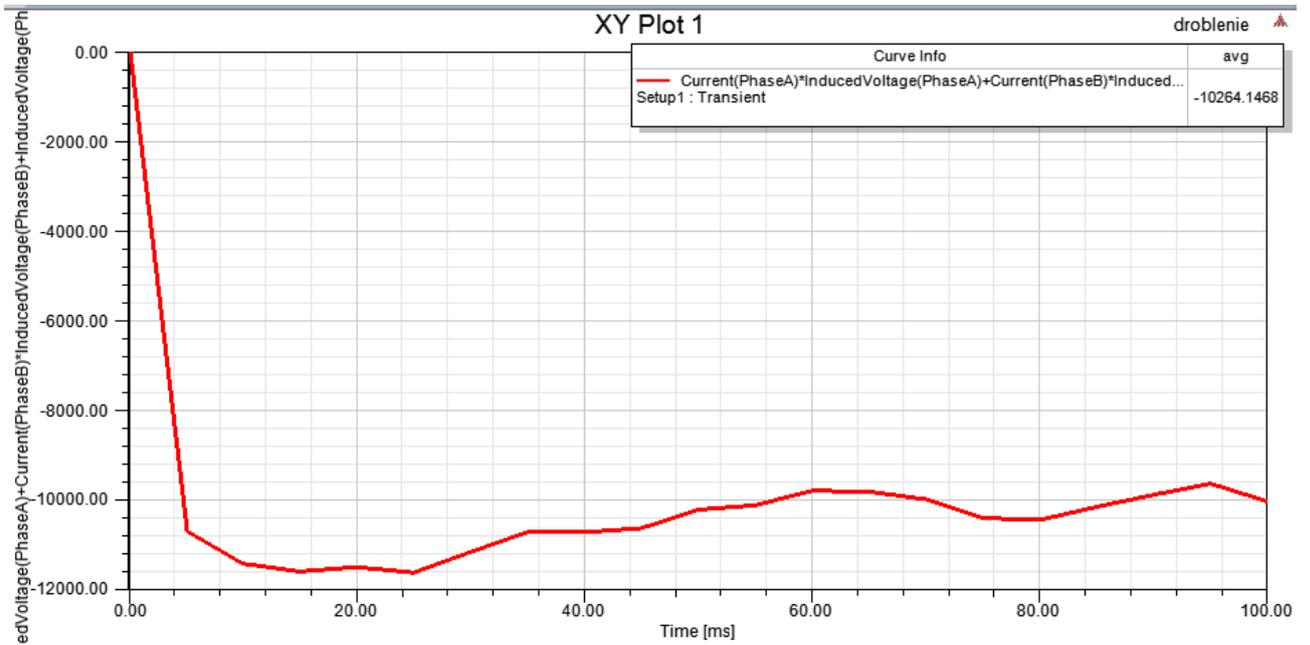


Рис.17 График зависимости мощности от времени

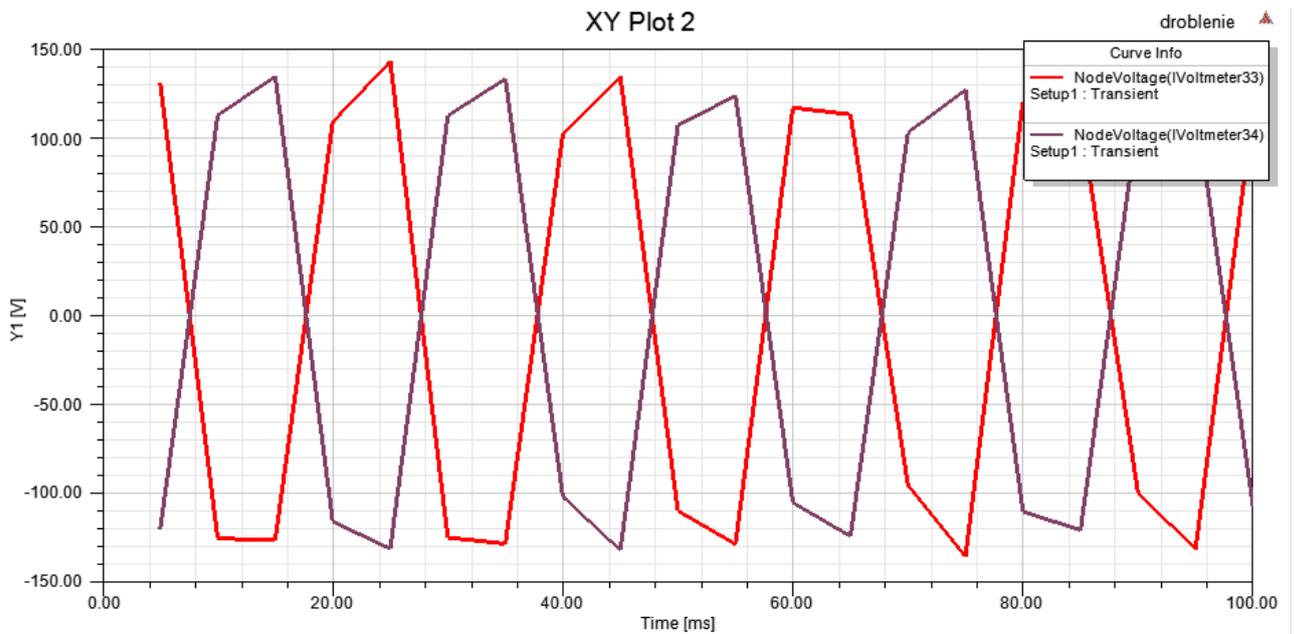


Рис. 18 График зависимости напряжений от времени

					130302.2018.223 ПЗ ВКР	52
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		

Для задания время остановки и шага используется специальная вкладка Solve Setup в инструменте Analysis. Вид данного окна представлен на Рис.19 (в нашем случае был выбран шаг 0,005 с и время остановки 0,1 с.

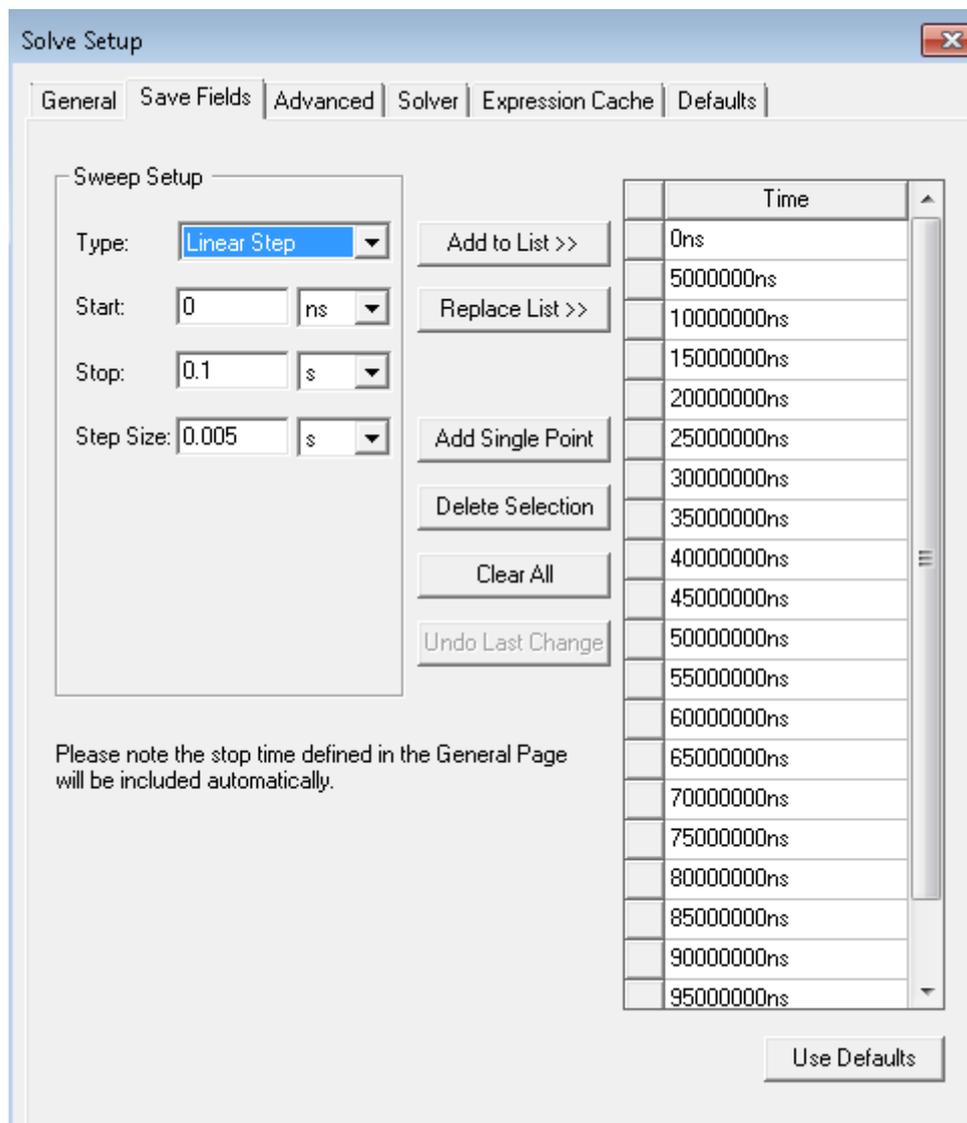


Рис. 19

					130302.2018.223 ПЗ ВКР	53
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		

Для визуального отражения распространения линий магнитной индукции и для отражения численного значения данной величины нужно сделать следующее: выделить геометрию, в которой нам интересна магнитная индукция (в нашем случае это статор и ротор и их обмотки) и при помощи инструмента Field Overlays можно наглядно увидеть, как распределяется магнитная индукция в исследуемом генераторе. Это представлено на Рис. 20

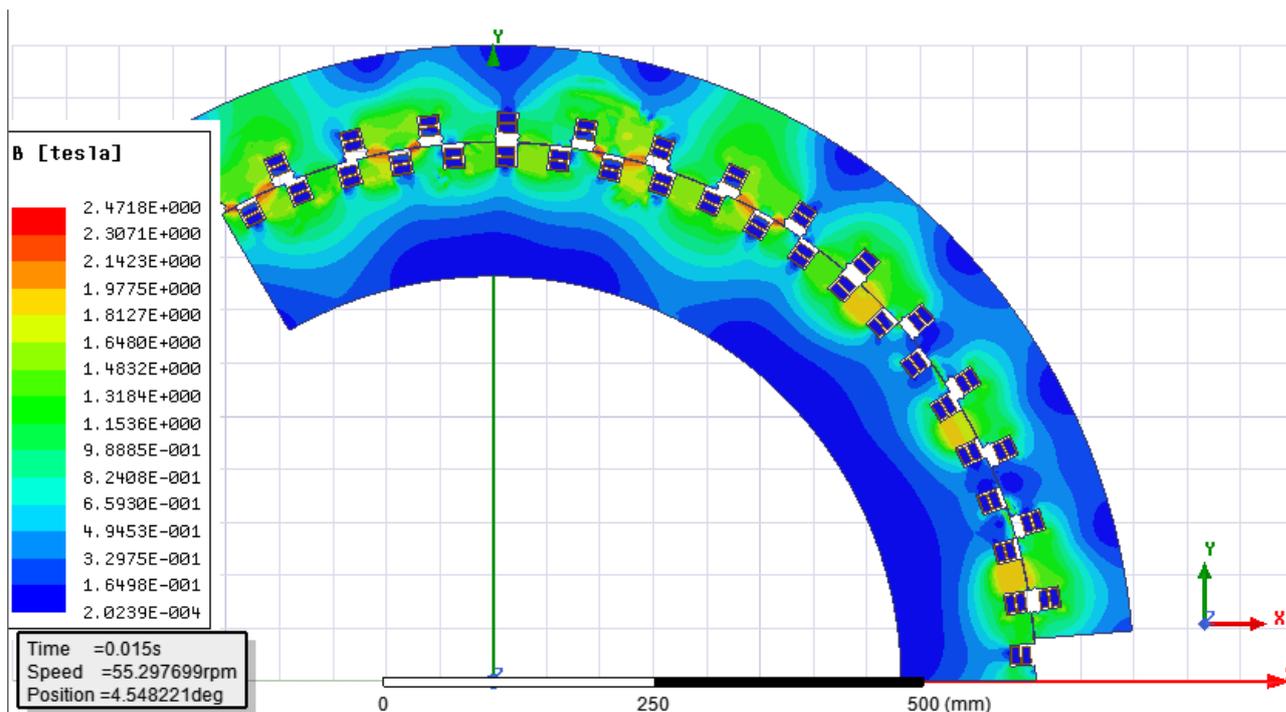


Рис. 20 Визуальное отражение распространения линий магнитной индукции

Создание модели при помощи инструмента Maxwell3D на основании модели, созданной в RMXprt

Для большего визуального представления исследуемого генератора используем заключительный инструмент программы Maxwell Ansys - Maxwell3D.

Он выстраивается так же на основании чертежа, построенного с помощью RМхprt. 3D Design представлен на Рис.21 .

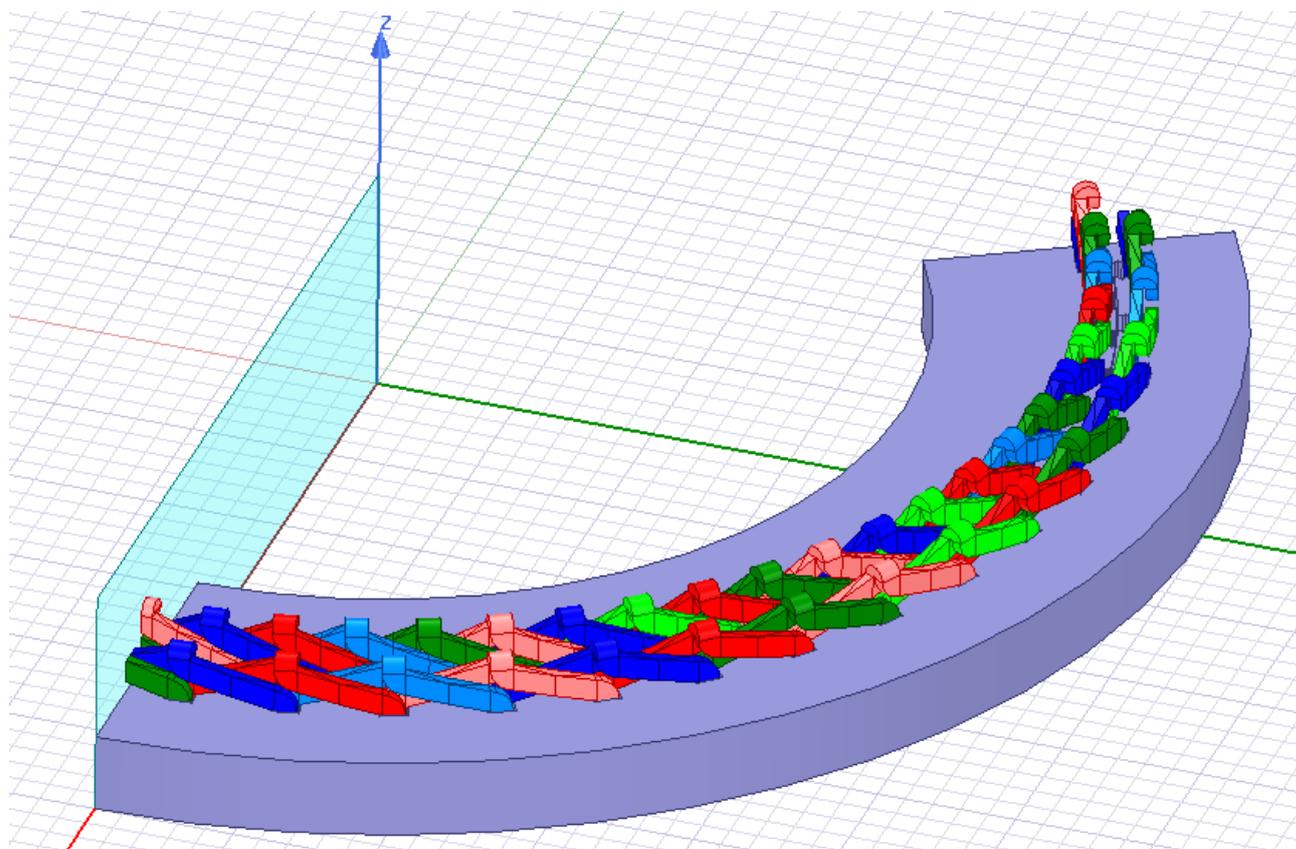


Рис. 21 Внешний вид в Maxwell3D

Для визуального представления - как закладывается обмотка в пазах данная программа выстраивает полуоткрытую модель. Тем самым позволяет наблюдать поочередность и последовательность закладки обмотки в пазах.

					130302.2018.223 ПЗ ВКР	55
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		

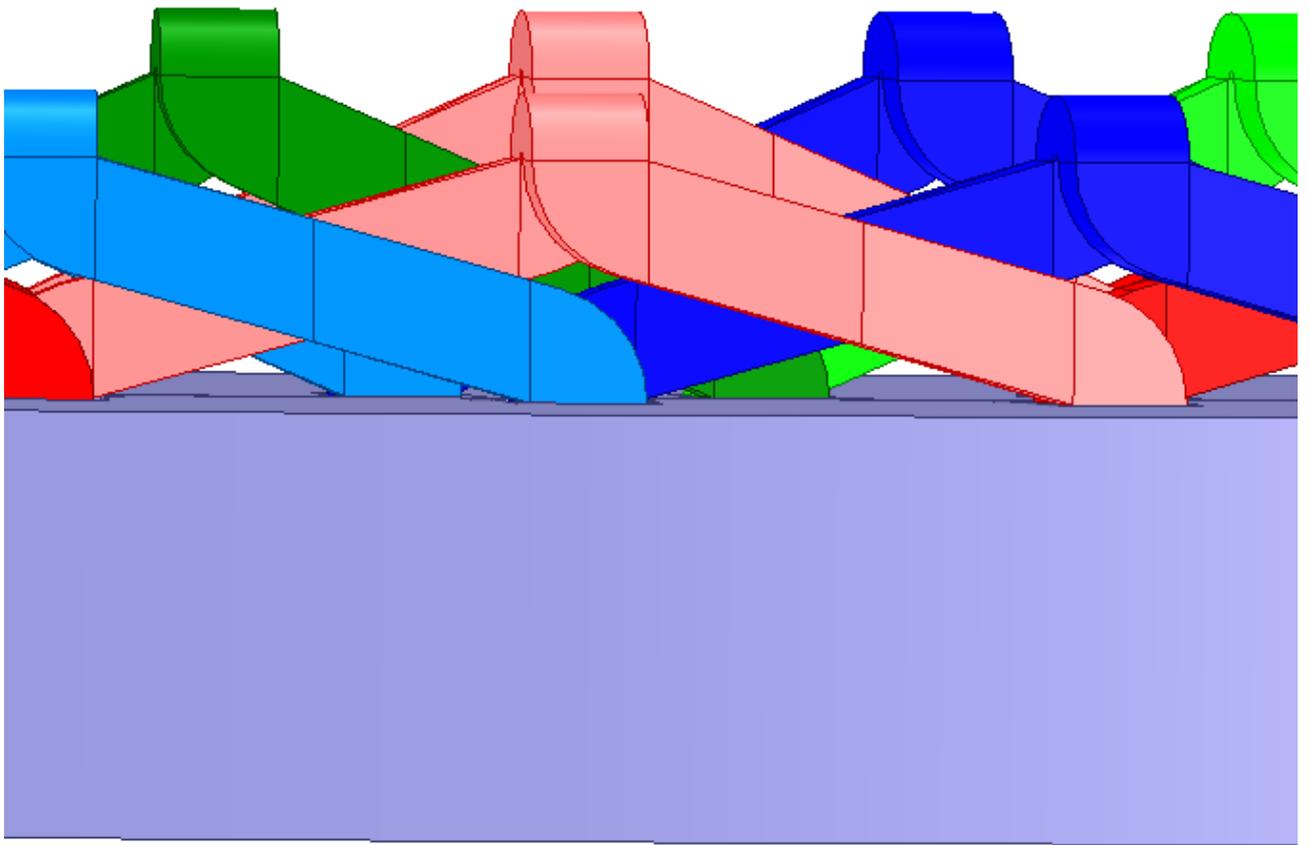


Рис.22

					130302.2018.223 ПЗ ВКР	56
<i>Изм.</i>	<i>Лист</i>	<i>№ докум.</i>	<i>Подпись</i>	<i>Дата</i>		

Заключение

Так как на сегодняшний день Россия использует для добычи электричества в основном исчерпаемые ресурсы и их количество в скором времени не позволит обеспечивать нужным для нашей цивилизации объемом электроэнергии, то вопрос поиска альтернативных источников встает очень остро.

Ветроэнергетика - одна из самых перспективных альтернативных отраслей выработки электрической энергии.

Однако, и ветроэнергетика не обделена минусами. Один из самых главных - это невозможность "выдавать на выходе" стабильно параметризованную электрическую энергию (220 В и 50 Гц). В своей дипломной работе я нашел теоретическое решение данной проблемы в виде асинхронизированного синхронного генератора. Так же была доказана возможность практической работы исследуемой модели.

В качестве альтернатив исследуемому варианту были представлены:

- использование генератора с постоянными магнитами, который требовал наличие выпрямителей и инверторов. Данный вариант является неприемлемым из-за колоссальных материальных затрат, которые появляются с увеличением мощности установки.
- использование асинхронного генератора. Минусом является влияние на энергетическую сеть реактивной мощности, в которой асинхронный генератор нуждается для возбуждения. Отсюда идут либо большие штрафы от энергетических компаний из-за маленького $\cos\phi$, либо большие затраты на конденсаторные батареи.
- использование специальных синхронных генераторов. Данный метод так же является материально затратным по сравнению с вариантом использования АСГ в качестве ВЭУ, так как необходима покупка дорогостоящих постоянных магнитов. Наряду с этим в данном варианте отсутствует возможность регулирования магнитного потока.
- использование синхронных генераторов с электромагнитным возбуждением. Недостатком является высокая стоимость, ; большое

					130302.2018.223 ПЗ ВКР	57
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		

количество элементов в цепи, отсюда получается низкий КПД всей установки; наличие скользящего контакта; жесткая зависимость частоты ЭДС от скорости вращения, что не позволяет использовать данный вид ВЭУ для прямого включения в сеть в зонах с нестабильным ветровым потоком без применения ПЧ.

Тем самым был выявлен оптимальный вариант в качестве силовой установки для ВЭУ - асинхронизированный синхронный генератор. Был проведен расчет всех параметрических данных испытуемого образца. Используя программу Maxwell Ansys было получено подтверждение работоспособности данного генератора, что было доказано графиками и таблицами данных. Конструкция данного генератора была представлена на рисунках выше.

					130302.2018.223 ПЗ ВКР	58
<i>Изм.</i>	<i>Лист</i>	<i>№ докум.</i>	<i>Подпись</i>	<i>Дата</i>		

Библиографический список

1. Безруких П.П. Использование энергии ветра. Техника, экономика, экология. Колос, Гелеос. 2008, 196 с.
2. Патент РФ 2253038 МКП F03D3/00. Ветродвижитель./Автор: Чебоксаров В.В. (RU), Патентообладатель: Дальневосточный государственный технический университет (RU).// Информационно-поисковая система Федеральной службы по интеллектуальной собственности, патентам и товарным знакам
http://www1.fips.ru/wps/wcm/connect/content_ru/ru/inform_resources/inform_retrieval_system/ . Опубликовано 17.05.2005.
3. Патент РФ 2263816 МКП F03D/06 . Ветроэнергетическая установка./ Авторы: Вергейчик Е.Н. (RU), Чудиков Н.Н. (RU), Стоянов И.С. (RU). Патентообладатель: Пятигорская государственная фармацевтическая академия (RU).// Информационно-поисковая система Федеральной службы по интеллектуальной собственности, патентам и товарным знакам
http://www1.fips.ru/wps/wcm/connect/content_ru/ru/inform_resources/inform_retrieval_system/ . Опубликовано 10.11.2005.
4. Патент РФ 2287083 МПК F03D3/00. Ветроэнергетическая установка для генерирования электроэнергии за счет энергии ветра./ Авторы: Канпара Сиро (JP), Утияма Хисаказу (JP). Патентообладатель: Санпауэр Ко., ЛТД. (JP). Информационно-поисковая система Федеральной службы по интеллектуальной собственности, патентам и товарным знакам
http://www1.fips.ru/wps/wcm/connect/content_ru/ru/inform_resources/inform_retrieval_system/ . Опубликовано 10.11.2006.
- 5.Белей В.Ф.,Никишин А.Ю. Современные ветроэнергетические установки большой мощности: ряд рекомендаций по их использованию. Труды

					130302.2018.223 ПЗ ВКР	59
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		

симпозиума «Эльмаш-2006» МА «Интерэлектромаш», октябрь 2006, Т.1, 31-37 с.

6. Ботвинник М.М. Асинхронизированная синхронная машина. Москва-Ленинград. Госэнергоиздат,1960,70 с.

7. Патент на полезную модель 66635 МПК H02P9/00. Асинхронизированный синхронный генератор./ Автор: Ганджа С.А. (RU). Патентообладатель : ООО НПП «Ветроэнергетические установки»./ Информационно-поисковая система Федеральной службы по интеллектуальной собственности, патентам и товарным знакам

http://www1.fips.ru/wps/wcm/connect/content_ru/ru/inform_resources/inform_retrieval_system/ . Опубликовано 10.09.2007.

8. S.A. Gandzha, Modelling of Permanent Magnet Direct Current Motor with Electromagnetic Reduction, S.A. Gandzha, Collection of papers of Software Users Sixth Conference CAD_FEMGmbH (20–21 April 2006), Moscow, 2006, pp. 358–360.

9. Gandzha S.A., Erlisheva A.V. [Starter-generator for autonomous source of energy supply] Starter-generator dly avtonomnih istochnikov pitaniy. Vestnik uzhno-uralskogo gosudarstvennogo universiteta. Seria “Energetika” , 2005, Vipusk 6. no 9, pp.84-86. (In Russian).

10. Gandzha, S. A. [The application of synchronous induction generator for windmill] Primenenie acinhronisirovanih sinhronih generatorov dly vetroenergeticheskikh ustanovok. ELMASH-2009. Electroenergetika I electrotehnika. Problemi i perspektivi. Trudi simposiuma. Moskwa, 2009, tom1, str 168-170. (In Russian).

11. Gandzha, S. A. Optimal design of brushless axial gap electric machines for low power windmills / S. A. Gandzha, R. L. Halstead // Design World (engineering solution for product manufactures). – 2012. – № 1. – www.designworldonline.com.

					130302.2018.223 ПЗ ВКР	60
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		

12. Gandzha S.A., Erlisheva A.V. [Starter-generator for autonomous source of energy supply] Starter-generator dly avtonomnih istochnikov pitaniy. Vestnik uzhno-uralskogo gosudarstvennogo universiteta. Seria "Energetika" , 2005, Vipusk 6. no 9, pp.84-86. (In Russian).
13. Gandzha S.A., Kiessh I.E. Application brushless machines with combine excitation for a small and medium power windmills. Procedia Engineering 129:191-194, December 2015.
14. Gandzha S.A., Kiessh I.E. Variable speed power. Procedia Engineering 129:731-735, December 2015.
15. Gandzha S.A., Sogrin A.I., Kiessh I.E. The Comparative Analysis of Permanent Magnet Electric Machines with Integer and Fractional Number of Slots per Pole and Phase. Procedia Engineering 129:408-414, December 2015.
16. Ганджа С.А. Генератор для автономных источников питания, Вестник Южно-Уральского государственного университета. Серия: Энергетика, 2005
17. Никитенко Г.В., Коноплев Е.В., Доведеркин И.В. Синхронный генератор для ветроэнергетической установки. 2005
18. Ганджа С.А, Аминов Д.С., Ниматов Р.Р. Применение асинхронизированных синхронных генераторов для автономных и сетевых ветроэнергетических установок, Международный научный журнал, 2010.
19. Бубенчикова Т.В., Молодых В.О., Руденок А.И., Данилов Д.И., Шевченко Д.Ю. Выбор электрогенераторов для ВЭУ, Международный научный журнал, 2016.
20. Зигангирова Ю. В., Пашали Д. Ю., Айгузина В. В. Математическое моделирование внешнего магнитного поля низкоскоростных управляемых электромеханических преобразователей ветроэнергетических установок. 2016
21. Кривцов В. С. Неисчерпаемая энергия. Кн. 1. Ветроэнергетика / В. С. Кривцов, А. М. Олейников, А. И. Яковлев. – Харьков : Нац. аэрокосм. ун-т (ХАИ); Севастополь: Севастоп. нац. техн. ун-т, 2004. – 519 с.

					130302.2018.223 ПЗ ВКР	61
<i>Изм.</i>	<i>Лист</i>	<i>№ докум.</i>	<i>Подпись</i>	<i>Дата</i>		

22. Григораш О.В. Возобновляемые источники электроэнергии / О.В. Григораш, Ю. П. Степура, Р. А. Сулейманов и др. Краснодар, 2012, с. 272.
23. Chen Z. Wind energy-the world's fastest growing energy source / Z. Chen, F. Blaabjerg // IEEE Power Electronics Society Newsletter. – 2006. – Т. 18. – № 3. – С. 17-19.
24. Hansen A. D. Wind turbine concept market penetration over 10 years (1995–2004) / A. D. Hansen, L. H. Hansen // Wind energy. – 2007. – Т. 10. – № 1. – С. 81-97.
25. Erlich I., Winter W., Dittrich A. Advanced grid requirements for the integration of wind turbines into the German transmission system // 2006 IEEE Power Engineering Society General Meeting. – IEEE, 2006. – С. 7.
26. Global wind energy council (GWEC) global wind 2015 report, available at: http://www.gwec.net/wp-content/uploads/vip/GWEC-Global-Wind-2015-Report_April-2016_22_04.pdf, accessed September 2016.
27. Фатеев Е.М. Ветро двигатели и ветроустановки – М.: Сельхозиздат, 1957. – 536 с.
28. Сидельников Б.В. Современное состояние и сравнительный анализ конструктивных схем ветрогенераторов /Б. В. Сидельников // Вестник Щецинского технического университета, Польша, 2001.
29. Hall D. Renewable Energy. Power for a Sustainable Future. / D. Hall // Oxford Unit. Press, 1996. – 478 p.
30. Шевченко В.В. Проблемы, перспективы и основные направления развития экологически чистых источников электроэнергии в Украине / В.В. Шевченко, И.Я. Лизан // Качество технологий и образования. Сборник научных трудов. – Вып. 1. – Х.: УИПА, 2011. – С. 77–87.
31. Лукутин Б.В. Энергоэффективные управляемые генераторы для ветроэлектростанций / Б.В. Лукутин, Е. Б. Шандарова, А. И. Муравлев // Известия вузов. Сер. Электромеханика. – 2008. – № 6. – С. 63–66.
32. Шевченко В. В. Анализ возможности использования разных типов генераторов для ветроэнергетических установок с учетом диапазона мощности

					130302.2018.223 ПЗ ВКР	62
<i>Изм.</i>	<i>Лист</i>	<i>№ докум.</i>	<i>Подпись</i>	<i>Дата</i>		

- / В. В. Шевченко, Я. Р. Кулиш // ISSN 2079-3944. Вестник НТУ “ХПИ”. 2013. № 65 (1038) – Харьков : Нац. Тех. Ун-т (ХПИ), – 2013. – С. 107–117.
33. Miller N. W. Frequency responsive wind plant controls: Impacts on grid performance / N. W. Miller, K. Clark, M. Shao // 2011 IEEE Power and Energy Society General Meeting. – IEEE, 2011. – С. 1-8.
34. Boyle G. . Renewable Energy. — Oxford University Press, 2004. — 464 с.
35. Гуляев И.В. Системы векторного управления электроприводом на основе асинхронизированного вентильного двигателя/ И.В. Гуляев, Г.М. Тутаев// Монография. Саранск: изд-во Мордов. ун-та. - 2010. - 200с.
36. Dr John Fletcher and Jin Yang "Introduction to Doubly-Fed Induction Generator for Wind Power Applications", - электронный ресурс.
37. Дунаев А.А., Наний В.В. Место двигателя с катящимся ротором в общей эволюции электромеханических преобразователей // Энергосберегающие технологии и оборудование. № 5/8 (53) – 2011. С. 11-14.
38. 2. Афанасьев Ю.В., Пашали Д.Ю., Юшкова О.А., Айгузина В.В. Математическая модель внешнего магнитного поля тихоходного двигателя с катящимся ротором // Электротехнические комплексы и системы: межвузовский научный сборник / Уфимск. гос. авиац. техн. ун-т. – Уфа, УГАТУ, 2014. – 211 с.
39. 3. Пашали Д.Ю., Айгузина В.В., Зигангирова Ю.В., Юшкова О.А., Пашали В.М. Расчет внешнего магнитного поля электродвигателя с катящимся ротором // Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2016611564, опубл. 04.02.2016.
40. Ботвинник М. М., Шакарян Ю. Г. Управляемая машина переменного тока. М.:«Наука», 1969.
41. Зархи М. И. и др. Промышленные испытания асинхронизированного генератора мощностью 50 МВА // Электричество. 1973. №4. С. 582–54.
42. Никитин Н. Э. и др. Асинхронизированный синхронный электропривод цемент- ной мельницы // Электричество. 1978. № 3. С. 87–89.

					130302.2018.223 ПЗ ВКР	63
<i>Изм.</i>	<i>Лист</i>	<i>№ докум.</i>	<i>Подпись</i>	<i>Дата</i>		

43. Ботвинник М. М., Шакарян Ю. Г. Об управляемых машинах переменного тока // Промышленность Армении. 1976. № 8. С. 23–27; № 9. С. 18–21. (РЖЭ. 1977, 1И233).
44. Итоги науки и техники. Электрические машины и трансформаторы. Т. 2. ВИНТИ, 1979.
45. Козлитин Л. С. Управление автономной ветроэлектрической установкой с асинхронизированным синхронным генератором. URL:<http://www.festu.ru/ru/structure/library/library/vologdin/v2000-II/40.htm>.
46. Шакарян Ю. Г., Бобылев А. В. Новое энергетическое оборудование XXI века. URL:<http://www.rao-ees.elektra.ru/ru/news/gazeta/151-2004/show.cgi?novo.htm>.
47. Шакарян Ю. Г. Асинхронизированные синхронные машины. Варианты автономного генератора по схеме машины двойного питания с различными типами преобразователей частоты. URL:<http://www.elecab.ru/obzor1-1.htm>.

					130302.2018.223 ПЗ ВКР	
<i>Изм.</i>	<i>Лист</i>	<i>№ докум.</i>	<i>Подпись</i>	<i>Дата</i>		64