1. Электрический генератор

В высокоскоростных турбомашинах существует многолетний опыт использования высокоскоростных синхронных генераторов с возбуждением от постоянных магнитов. В нашем случае, при частоте вращения ротора порядка 150 000 об/мин. ротор генератора должен состоять из двухполюсного цилиндрического постоянного магнита с установленным горячим натягом бандажом. Установка бандажа на магнит необходима для предотвращения разрушения магнита, состоящего из хрупкого материала, от воздействия высоких центробежных сил, воздействующих как на сам магнит, так и на бандаж.

* 1. Выбор постоянного магнита

Важной задачей для инженера-конструктора электрического генератора является выбор активных материалов ротора, поскольку это в последствии приведет к воздействиям на конструкцию генератора. В качестве материалов для магнита могут являться Al-Ni-Co-Fe, ХК сплавы, Nd-Fe-B, SmCo.

Al-Ni-Co-Fe является сплавом для изготовления постоянных магнитов методом литья. Отличается пределом прочности на растяжение порядка 30-40 МПа и стабильностью при температурах до 550 градусов Цельсия, но обладает достаточно низким энергетическим произведением BHmax (60-70 кДж/м3) относительно уровней современных магнитов, а также круто падающую кривую размагничивания. [1].

ХК сплав так же является материалом для изготовления постоянных магнитов. Возьмем для конкретного примера материал 25Х15КА. Сплав имеет 686 МПа [2], рабочую температуру 400-450 градусов Цельсия, а также аналогично низкое энергетическое произведение BHmax (32-36 кДж/м3) и круто падающую кривую размагничивания [3].

Nb-Fe-B – наиболее распространенный и легкодоступный на текущий момент вариант материала для постоянного магнита для высокоскоростных турбомашин. Неодимовые магниты имеют энергетическое произведение BHmax не менее 150 кДж/м3 [4], пределы прочности на растяжение порядка 70-130 МПа [5], низкую коррозионную, радиационную стойкость и рабочую температуру (до 180 градусов Цельсия) [6][7]. Кривая размагничивания у этого материала выглядит как монотонно убывающая линейная функция.

Редкоземельные постоянные магниты на основе сплава SmCo. Он обладает практически таким же высоким энергетическим произведением, что и неодимовые магниты и похожий вид кривой размагничивания, но имеет высокую температурную стабильность (до 250 градусов Цельсия), значение температурного коэффициента индукции (Br) составляет -0,035%/°C в отличии от -0,11%/°C для магнитов на основе Nd-Fe-B, а также обладает высокой радиационной стойкостью, что делает магниты незаменимыми в авиационной и ракетной технике [8]. Предел прочности на растяжение составляет 35-40 МПа. [9]

Хоть разрабатываемый воздушный турбогенератор является экспериментальным образцом для испытаний на газодинамическом стенде, но основное применение машин такого типа является работа в составе органического цикла Ренкина, в котором определяющими параметрами для выбора магнита могут служить: высокое энергетическое произведение, возможность работы магнита при температурах на сотни градусов выше чем температура окружающей среды, а также высокая коррозионная стойкость. На основании этого, наиболее подходящим вариантом материала для постоянного магнита ротора становится магнит на основе редкоземельного сплава SmCo.

* 1. Прочность системы магнит-бандаж

Как уже было отмечено ранее магнит на основе редкоземельного сплава SmCo имеет предел прочности на растяжение порядка 35-40 МПа. Эта величина очень мала для простого использования постоянного магнита в качестве элемента ротора. Для предотвращения разрушения ротора при высоких частотах вращения и, как следствие, высоких центробежных усилиях на магнит горячим натягом устанавливают бандаж из прочной стали. В нашем случае будем использовать прецизионную пружинную сталь 36НХТЮ.

Для того, чтобы понимать не только качественно, но и количественно, как изменяются диаметры роторной системы в зависимости от выбираемой при проектировании частоты вращения ротора турбогенератора и диаметра постоянного магнита, на базе ряда расчетов посредством методики, изложенной в [10] построены графики, иллюстрирующие зависимость изменения толщины бандажа от диаметра магнита и частоты вращения ротора.

В процессе расчетов было принято здесь и далее, что материал магнита SmCo5 и напряжение в центре магнита на номинальном режиме работы составляют 0 МПа. Поскольку для высокооборотистых турбомашин толщины бандажей на малые диаметры магнита, порядка 5 мм, получаются не реализуемыми по технологическим соображениям из-за слишком малой толщины бандажа, примем, что минимальный размер толщины бандажа составляет 1 мм, а также для возможности сравнения нескольких вариантов пар частота вращения – диаметр постоянного магнита примем номинальный коэффициент запаса прочности, которого будем придерживаться, равного двум.

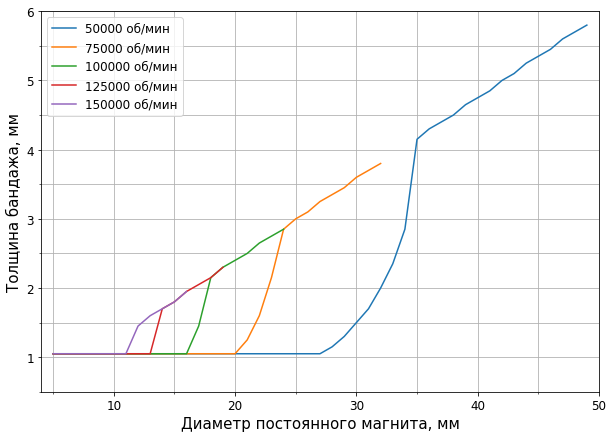


Рисунок Зависимость толщины бандажа от диаметра постоянного магнита при различных частотах вращения ротора

Для заданной частоты вращения ротора 150 000 об/мин в таблице 1 сведены результаты расчета на прочность и посадки.

Таблица 1

|  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- |
| Диаметр постоянного магнита | Диаметр бандажа | Толщина бандажа | Запас прочности | Натяг статический |
| мм | мм | мм | - | мкм |
| 6 | 8 | 1 | 7 | 1,48 |
| 7 | 9 | 1 | 5,3 | 2,45 |
| 8 | 10 | 1 | 4,2 | 3,83 |
| 9 | 11 | 1 | 3,3 | 5,74 |
| 10 | 12 | 1 | 2,6 | 8,30 |
| 11 | 13 | 1 | 2,1 | 11,65 |
| 12 | 15 | 1,5 | 1,85 | 13,29 |
| 13 | 16 | 1,5 | 1,6 | 17,25 |
| 14 | 17,5 | 1,75 | 1,38 | 20,50 |
| 15 | 18,5 | 1,75 | 1,2 | 25,96 |
| 16 | 20,5 | 2,25 | 1,04 | 29,35 |

* 1. Магнитная индукция в воздушном зазоре.

При проектном расчете электрических машин, в том числе и электрических генераторов с возбуждением от постоянных магнитов для высокоскоростных турбоагрегатов, приходится задаваться большим количеством переменных [11]. В их числе находятся магнитная индукция в воздушном зазоре. Произвести выбор этих переменных, не обладая опытом проектирования электрических машин, затруднительно, более того, для высокоскоростных машин (40-300 тыс. об/мин) практически полностью отсутствует достаточное количество статистических данных.

Для того, чтобы упростить процесс задания магнитной индукции, а также для исключения этого параметра из уравнения главных размеров генератора выведем зависимость магнитной индукции от диаметра постоянного магнита.

Сделаем предположение, что магнитная индукция вдоль радиуса зазора распространяется прямолинейно по закону:

(1)

Где: Bm – магнитная индукция у магнита;

B(x) – магнитная индукция в зазоре;

dm – диаметр магнита;   
x – координата в зазоре.

Тогда преобразуем 1 в вид:

(2)

Соответственно магнитная напряженность в этом случае:

(3)

Где: μ – относительная магнитная проницаемость воздуха;

μ0 – магнитная проницаемость в вакууме.

Магнитная движущаяся сила для зазора может быть рассчитана следующим образом:

(4)

Где: δ –длинна зазора.

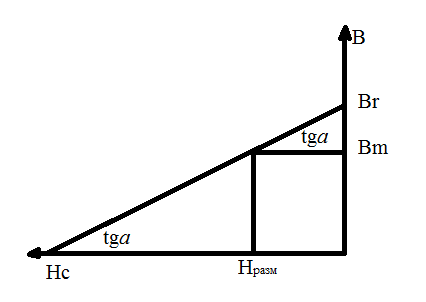
Поскольку размагничивание происходит с двух полюсов магнита, то размагничивающая магнитная движущая сила Fразм=2·F, а размагничивающая магнитная напряженность Hразм =Fразм / dm.

Рисунок Петля гистерезиса в втором квадранте

Магниты на основе SmCo имеют прямую линию в петле гистерезиса в втором квадранте (Рис.2). Тогда, в соответствии с рисунком следует:

(5)

Где: Br – остаточная намагниченность магнита;

Hc – коэрцитивная сила.

(6)

(7)

Тогда исходя из предположения о линейности функции распространения магнитной индукции по радиусу:

(8)

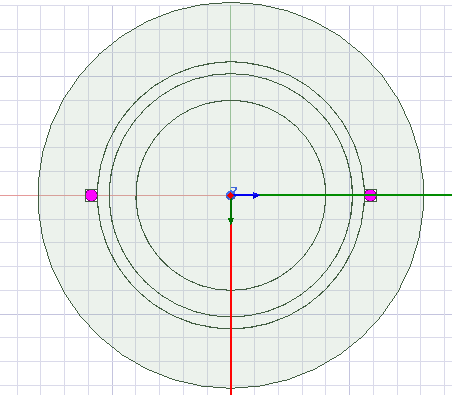
Для верификации полученного вывода использовалось моделирование методом конечных элементов в Altair Flux. Рассчитывалась упрощенная схема магнитопровода статора, представленная на рисунке 3. Модель состояла из магнита, бандажа, воздушного зазора и магнитопровода из стали 2421. Результаты верификации представлены на рисунке 4.

Рисунок Расчетная схема для верификации формулы магнитной индукции

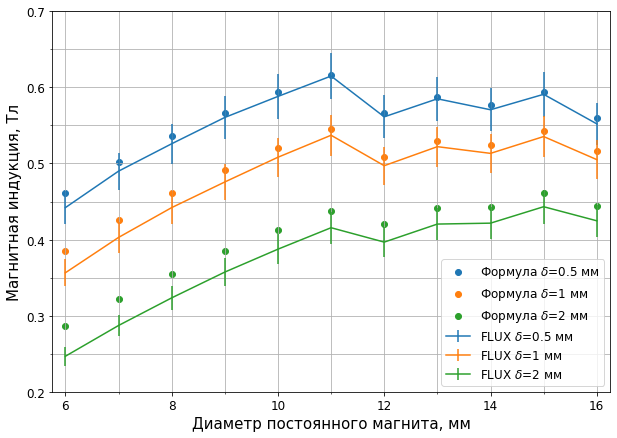


Рисунок График сравнения полученных магнитных индукций по формуле и расчетом методом FEM

На рисунке 4 относительно расчета во FLUX построена 5% зона отклонения от текущей величины. Как можно заметить, полученная модель хорошо описывает распределение магнитной индукции по радиусу.

Убедившись в применимости формулы (8) для магнитной индукции в зазоре, построим зависимость магнитной индукции от диаметра постоянного магнита и частоты вращения ротора, учитывая результаты расчета на прочность. В качестве воздушного зазора зададим величину в 1 мм на сторону и учтем толщину бандажа. Полученные результаты с дискретным шагом   
0.1 мм представлены на рисунке 5.

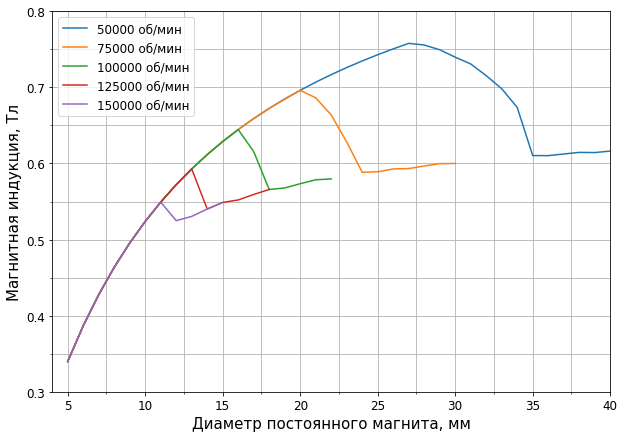


Рисунок Магнитная индукция в зазоре от диаметра постоянного магнита при различных частотах вращения (0,1мм)

Поскольку размеры изделий не в прецизионно точных механизмах принято несколько округлять или принимать в соответствии с таблицами предпочтительных чисел, то результаты, соответствующие рисунку 5 более сильно соотносятся с практической стороной вопроса. Если рассмотреть более теоретический вариант и уменьшить дискретный шаг до 10-4 мм, то график, аналогичный рисунку 5 будет выглядеть иначе. Этот результат представлен на рисунке 6.

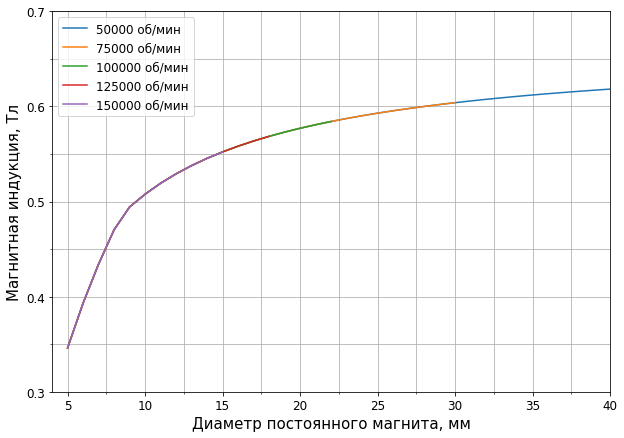


Рисунок Магнитная индукция в зазоре от диаметра постоянного магнита при различных частотах вращения (10-4 мм)

На основании рисунков 5 и 6 примем диаметр постоянного магнита равным 13 мм, поскольку там потенциально находится максимум магнитной индукции. В дальнейшем проверим наше решение на оптимальность.

* 1. Выбор материала статора

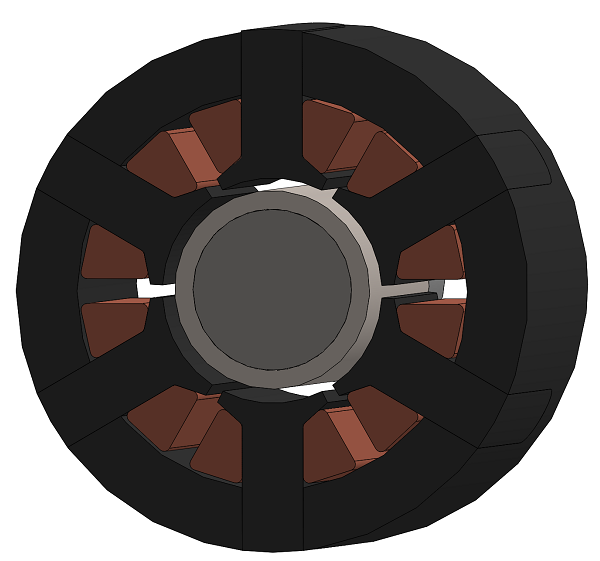
Одна из самых лучших, распространенных и доступных электротехнических сталей для статора электрогенератора является сталь 2421. Электротехнические стали являются хрупкими, изготовление статоров производится по сложной технологии электроэрозионной резкой. Также статора высокоскоростных машин имеют малые размеры, что усложняет укладку обмотки в пазы статора.

Для того, чтобы упростить задачу изготовления и укладки обмотки, а также по возможности снизить потери в стали и массу статора попробуем применить в качестве материала статора – Somaloy. Somaloy – материал использующийся для создания магнитомягких изделий практически любой формы за счет штамповки и спекания порошкообразного материала. Также этот материал допускается механическая обработка и резка материала. Это свойство может упростить изготовление статора типа зубец-катушка. Примем в качестве материала – типовой Somaloy из которых изготавливаются заготовки диаметром 80 мм и высотой 40 мм. Поскольку эти типовые заготовки штампуются в массовом масштабе, то ожидается более низкая цена на них, чем на отдельные типы этого материала. Более полное название, взятое из проспекта компании изготовителя - Somaloy Prototyping Material.

Для проведения дальнейших расчетов и анализа их результатов примем, что проектируется генератор с напряжением шины постоянного тока 620В для организации в будущем инверторного блока с возможностью создания нулевого вывода (380/220В). Обмотка – звезда. Напряжение линейное и фазное генератора составляет 460/265В соответственно. Номинальный ток нагрузки – 1,6А.

1.4.1 Somaloy, конструкция зубец - катушка

Для этих данных сделаем проектный расчет генератора и проведем моделирование методом конечных элементов в Altair Flux. В результате расчета было определено, что длинна постоянного магнита составляет 13 мм, диаметр бандажа 16 мм, диаметр внутренней расточки статора 18 мм, число пазов на полюс и фазу равно единице, коэффициент укорочения составляет 1/3. Количество витков в модели Flux равно 82. Толщина зуба 7 мм. Провод при принятой плотности тока в 12 А/мм2 имеет диаметр 0,5 мм. Длинна витка составила 102 мм в первом приближении. Активное сопротивление всей обмотки машины составляет 4,345 Ом, сопротивление одной катушки 0,72 Ом.

Фильтр в цепи постоянного тока имел емкость 5,6 мкФ, а начальное напряжение 630В.

В результате создания 3D модели   
(рис. 7) масса магнитопровода из Somaloy составила 0.460 кг, внешний диаметр составил 50 мм.

Рисунок Разрез статора модели зубец - катушка

Напряжение холостого хода, полученное при моделировании во Flux после выпрямителя с нагрузкой 10000 Ом составило 715,7 В.

Магнитная индукция в зубе, толщиной 7 мм составила 0,75 Тл. Магнитная индукция в ярме толщиной 7 мм составила 0,5 Тл.

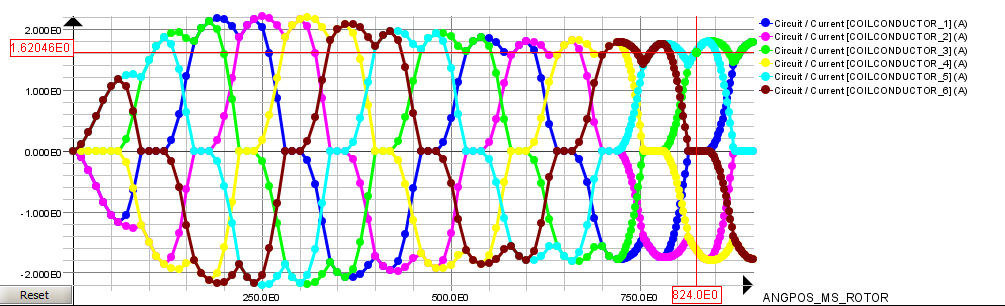
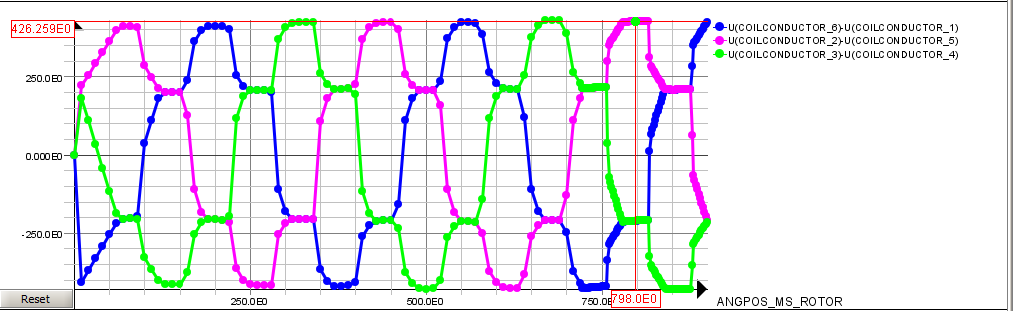
Потери в стали, посчитанные по методу Бертотти [12], совпадают с результатом вычисления по приведенной в брошюре формуле и составили 67 Вт. Потери в меди составили 12.2 Вт. Суммарные потери в статоре 79,2 Вт. Удельные потери 171,8 Вт/кг. Коэффициент полезного действия на номинальной нагрузке составил 0,92. Формы тока в каждой катушке и фазные напряжения генератора приведены на рисунках 8 и 9 соответственно.

Рисунок Форма фазных напряжений генератора

Рисунок Форма тока в каждой катушке статора

Для того, чтобы оценить различие в эффективности предложенного решения необходимо провести расчет классической конструкции статора на этом же материале по аналогичному выше алгоритму.

1.4.2 Somaloy, классическая конструкция

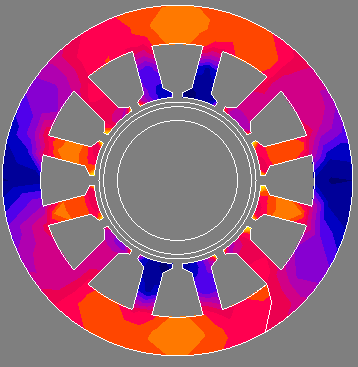
Для той же роторной системы был спроектирован новый статор с числом пазов на полюс и фазу равному двум. Как показывает исследование [13] коэффициент укорочения 5/6 для генератора такого типа позволяет снизить индуктивность катушки и увеличить жесткость внешней характеристики генератора, поэтому в нашей модели примем коэффициент укорочения обмотки 5/6. Количество витков в пазу равно 38. Толщина зуба 2.2 мм. Провод при принятой плотности тока в 12 А/мм2 имеет диаметр 0,5 мм. Длинна витка составляет 238.2 мм в первом приближении. Активное сопротивление всей обмотки машины составляет 4,46 Ом. Сечение статора с q =2 представлено на рисунке 10.

Рисунок Сечение классического статора с q=2

Масса магнитопровода из Somaloy, моделированного в 3D составила 0,179 кг, объем магнитопровода 24,53 см3. Внешний диаметр 38 мм.

Магнитная индукция в зубе, толщиной 2,2 мм составила 1,07 Тл. Магнитная индукция в ярме толщиной 4,2 мм составила 1,11 Тл.

Потери, посчитанные по приведенной производителем формуле и составили 45,6 Вт. Потери в меди составили 11.55 Вт. Суммарные потери в статоре 57,15 Вт. Удельные потери 254,74 Вт/кг. Коэффициент полезного действия на номинальной нагрузке составил 0,946.

Как видно по представленным результатам, коэффициент полезного действия в двух конфигурациях статоров различается в 2.6%. Для оценки целесообразности использования материала Somaloy в этой задаче произведем еще один аналогичный расчет для материала статора из стали 2421 в классическом исполнении.

1.4.3 Сталь 2421, классическая конструкция

Для полной повторяемости расчета в предыдущей модели заменим материал статора на 2421 и изменим колличество проводов в пазу на 36. Таким образом длинна витка составляет 225,64 мм в первом приближении. Активное сопротивление всей обмотки машины составляет 4,22 Ом.

В результате смены материала статора, масса магнитопровода составила 0,19 кг. Магнитная индукция в зубе, толщиной 2.2 мм составила 1,08 Тл. Магнитная индукция в ярме толщиной 4.2 мм составила 1,12 Тл. Потери в стали, посчитанные по методу Бертотти, составили 28 Вт. Потери в меди составили 10.93 Вт. Суммарные потери в статоре 38,93 Вт. Удельные потери 147,4 Вт/кг. Коэффициент полезного действия на номинальной нагрузке составил 0,9625.

Как видно из результатов расчетов, использование типового материала Somaloy для турбомашины с частотой вращения в 150 000 об/мин не рационально относительно классической конструкции из стали 2421, поскольку в типовом материале наблюдаются высокие потери от перемагничивания статора на такой частоте. В дальнейшем будем использовать материал магнитопровода статора – сталь 2421 и классическую конфигурацию статора. Проектный расчет генератора представлен в приложении А.

1.5 Результаты расчета генератора

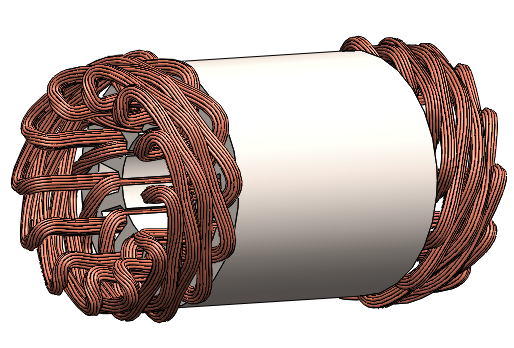
Используя полученные ранее результаты и принятые величины получим более точную массу статора вместе с медной обмоткой, а также графики фазного напряжения генератора и его внешнюю характеристику.

Рисунок Модель статора с обмоткой

Построенная 3D модель магнитопровода статора приведена на рисунке 11. В модели прорисована вся обмотка в виде петель, но такой подход все же позволяет достаточно точно оценить массу обмотки. Масса составила 0.27 кг и длинна витка равняется 236.6 мм.

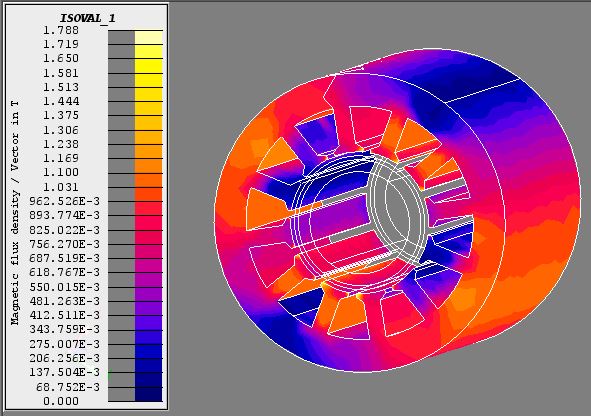
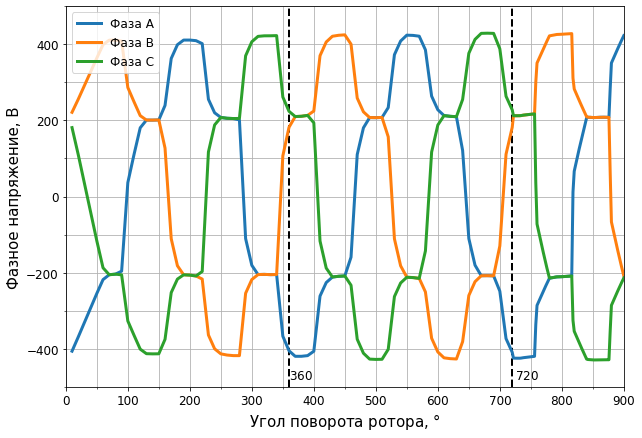
На рисунке 12 показано распределение магнитной индукции по объему статора, а также на рисунке 13 показано фазное напряжение генератора за время 2.5 оборотов.

Рисунок Распределение магнитной индукции по объему статора

Рисунок Фазное напряжение генератора

Расчеты методом конечных элементов в Altair Flux можно проводить последовательно друг за другом в автоматическом режиме. Это обстоятельство позволяет без усилий получить внешнюю характеристику электрической машины. Было произведено четыре расчета для построения внешней характеристики:

1. Напряжение холостого хода, полученное при измерения после выпрямителя с нагрузкой 1000000 Ом составило 739 В;

б) Напряжение на нагрузке 667 Ом составило 631В. Ток нагрузки 0,95А. Таким образом мощность составила 597 ВА;

в) Напряжение на нагрузке 384.6 Ом составило 620 В. Ток нагрузки 1,61А. Таким образом мощность составила 1000 ВА;

г) Напряжение на нагрузке 200 Ом составило 594 В. Ток нагрузки 2,97А. Таким образом мощность составила 1760 ВА.

Для будущего моделирования динамических процессов турбогенератора из произведенного расчета в Flux были получены характеристики, необходимые для задания синхронного генератора с возбуждением от постоянных магнитов в среде Matlab Simulink, а именно индуктивность в фазе равная 0.81 мГн и магнитный поток 24.9 мВб.

Основываясь на полученных данных посредством моделирования во Flux построилась внешняя характеристика посредством Matlab Simulink для оценки применимости модели синхронного генератора в Simulink в динамических процессах турбогенератора.

Внешние характеристики и графики мощности представлены на   
рисунке 14.

Как видно из рисунка 14, зависимости напряжения и мощности от тока нагрузки совпадают из чего можно сделать заключение, что базовую модель синхронной машины с постоянными магнитами можно применить для моделирования динамического процесса.

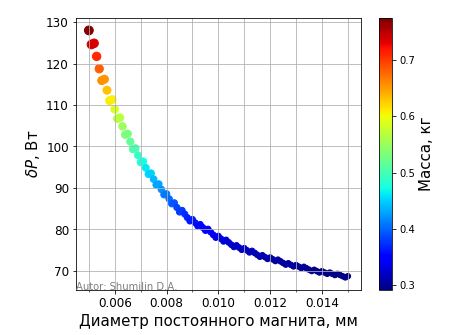
Рисунок Внешние характеристики и графики мощности

1.6 Диаметр постоянного магнита

Выбор диаметра магнита является сложной задачей. С одной стороны, увеличение диаметра магнита ведет к увеличению магнитной индукции в зазоре, что приводит к уменьшению размеров статора. С другой стороны, это может привести к увеличению потерь в стали, поэтому в этой задаче необходимо понимать существует ли на проектируемых параметрах оптимум и если да, то где он.

Для этих целей была написана программа выполняющая проектный расчет генератора. В этой программе сделано допущение об отсутствии рассеивания магнитного потока, в результате чего магнитная индукция в элементах ярма выше на 25% чем в рассчитанной модели методом конечных элементов, но все так же репрезентативна и может применяться для оценки влияния различных параметров как на потери, так и на другие целевые метрики.

Будем рассматривать потери в стали статора, потери в меди и вентиляционные потери ротора. Поскольку частота вращения огромна, наибольшие потери будут от трения ротора о воздух, поэтому наиболее верный подход – рассмотреть два варианта, с учетом потерь вентиляционных потерь и без. На рисунках 15 и 16 показаны проведенные расчеты.



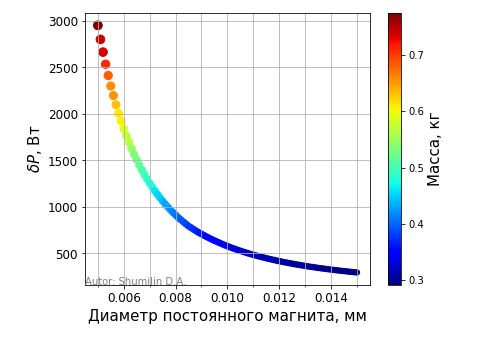


Рисунок Потери в стали и меди генератора в зависимости от диаметра постоянного магнита

Рисунок Суммарные потери генератора в зависимости от диаметра постоянного магнита

Как видно из рисунков 15 и 16 для данной конфигурации и частоты вращения точки оптимума нет. Максимально возможный диаметр по прочности составляет 15 мм с запасом прочности по бандажу в 1,2.

Список литературы

1. <http://ferrite.ru/products/magnets/alnico/>
2. <http://docs.cntd.ru/document/gost-24897-81>
3. <http://s-magnet.ru/постоянные-магниты-производитель/деформируемые-магниты/>
4. <http://s-magnet.ru/постоянные-магниты-производитель/спеченые-порошковые-магниты-из-редк/>
5. <http://docs.cntd.ru/document/1200066645>
6. <http://tdmagneton.ru/redkozemelnyie-nefebr>
7. **Тютнев А.П., Сергеев В.В., Семёнов В.Т., Станолевич Г.П.** К

вопросу о радиационной стойкости постоянных магнитов на основе редкоземельных элементов. Вопросы электромеханики. Труды ВНИИЭМ. Изд.: [Научно-производственная корпорация "Космические системы мониторинга, информационно-управляющие и электромеханические комплексы" имени А.Г. Иосифьяна](https://www.elibrary.ru/publisher_titles.asp?publishid=1131)

1. <http://tdmagneton.ru/redkozemelnyie-smco>
2. <http://ferrite.ru/products/magnets/smco/>
3. **Биргер И.А., Шорр Б.Ф., Иосилевич Г.Б.** Расчет на прочность деталей машин : Справочник. -4- е изд., перераб. и доп. -М.: Машиностроение, 1993. -640 с.
4. **Сугробов А.М., Русаков А.М.** Проектирование электрических машин автономных объектов: учебное пособие для вузов. М.: Издательский дом МЭИ, 2012.
5. **F. Fiorillo and A. Novikov**, "An improved approach to power losses in magnetic laminations under nonsinusoidal induction waveform," in IEEE Transactions on Magnetics, vol. 26, no. 5, pp. 2904-2910, Sept. 1990
6. **Аспиранты со статьей**