

Использование электрического моделирования для анализа состояния магнитной цепи электрических машин с постоянными магнитами. (ч.1).

77-48211/478777

09, сентябрь 2012

Волченсков В. И.

УДК 621.31

Россия, МГТУ им. Н.Э. Баумана

volchens@yandex.ru

В работе проведено исследование магнитного поля в электрической машине с постоянными магнитами.

Анализ состояния сложной магнитной системы магнитоэлектрического генератора проведен с использованием методики моделирования систем с постоянными магнитами, разработанной при участии автора в Проблемной лаборатории постоянных магнитов МЭИ.

Для моделирования воздушного пространства использовалась электропроводящая бумага, постоянный магнит моделировался сеткой нелинейных электрических элементов.

Проведено сопоставление результатов, полученных на модели, и данных при исследовании реальной машины, что подтвердило правильность применяемой методики моделирования сложных магнитных полей.

При анализе магнитной цепи электрической машины возможны три разных подхода:

1. Аналитический метод расчета.

При аналитических расчетах магнитной цепи машин с постоянными магнитами возникают многочисленные трудности, связанные с определением геометрических проводимостей, учетом реакции якоря и действия намагничивающих сил вспомогательных (регулирующих) обмоток.

Конфигурация магнитной цепи машин, как правило, довольно сложная, и формулы геометрических проводимостей приходится выводить с учетом ряда допущений: упрощается геометрическая форма магнитных трубок, предполагается постоянство потенциала поверхностей, на которые опираются трубки. При составлении схем замещения магнитной цепи априори

предполагается постоянство индукции на ее участках и, в частности, в теле магнита; линейный закон распределения потенциалов вдоль поверхности магнита, считается обязательным.

Поле поперечной реакции якоря (при отсутствии полюсных наконечников) идет поперек магнита. В этих условиях рабочая точка смещается не по предельной петле гистерезиса, а переходит на внутренние петли вследствие поперечного намагничивания. Учет этого процесса аналитическим путем практически невозможен. В машинах с регулированием потока конфигурация поля якоря в области магнита становится еще более сложной.

2. Электрическое моделирование.

При таком подходе к анализу магнитной цепи электрической машины получаем более точную картину магнитного поля в воздушном пространстве машины и соответственно более точный учет проводимостей как в рабочем зазоре, так и всех трубок потоков рассеяния.

Моделирование магнита сеткой нелинейных двухполюсников позволяет учесть тонкую структуру магнитного поля не только в воздушном пространстве машины, но и в теле самого магнита. Регулируя параметры нелинейных двухполюсников, можно подобрать любую характеристику элементарной области магнитножесткого материала, соответствующую заданному режиму намагничивания. Точность моделирования магнитного поля определяется, главным образом, подобием геометрических границ поверхности магнитной цепи машины и ее модели, а также дискретностью разбиения области, занятой магнитом. Электрическая модель позволяет рассчитать не только потокораспределение в магнитной цепи, но и найти закон распределения индукции вдоль рабочего зазора.

3. Расчет магнитной системы на компьютере.

В соответствии с уравнениями, описывающими магнитные поля в отдельных областях магнитной системы, составляется система линейных и нелинейных уравнений, которая в зависимости от её сложности решается с применением соответствующих математических методов.

Принципиальными трудностями при таком подходе являются погрешности, определяемые выбранным шагом дискретизации рассчитываемой области (линейной и нелинейной), условиями «сшивания» на границах различных областей, процессом сходимости при расчете картины магнитного поля в нелинейных (и анизотропных) средах.

В любом из перечисленных методов исследования магнитной системы есть свои преимущества и недостатки.

В данной работе использован второй вариант при анализе состояния магнитной цепи электрической машины с постоянными магнитами. Рассмотрим его подробнее.

Для проверки основных принципов, положенных в основу предлагаемого метода моделирования машин с постоянными магнитами, была изготовлена и исследована модель экспериментального синхронного генератора мощностью 500 ВА с ротором типа «звездочка» (без полюсных наконечников). Параллельно была проведена серия испытаний этой машины, в которых определяли магнитный поток полюса и распределение индукции в рабочем зазоре машины, внешние характеристики при различной нагрузке. Данные опытов на реальной машине и на модели сравнивались. Результаты сравнения, подтверждающие правильность исходных предпосылок, приведены ниже.

Преимущества предлагаемого метода анализа сложной магнитной цепи следующие.

1. Высокая точность воспроизведения на модели конфигурации магнитной цепи исследуемого объекта.
2. Отсутствие погрешности дискретизации при расчете магнитного поля в воздушном пространстве системы.
3. Учет реального состояния постоянного магнита и реального распределения магнитного потенциала на его поверхности.

Вообще говоря, задача расчета магнитного поля машины является трехмерной, и состояние магнита определяется не только трубками потока в воздушном зазоре, но и потоками лобового рассеяния. С некоторой степенью приближения поле на всей длине машины можно рассматривать как плоскопараллельное и использовать для расчета двумерные модели. В частности, в данной работе использовалась электропроводная бумага, в которой вырезались контуры магнитной цепи; магнитножесткий материал замещался плоской нелинейной сеткой; проводимости трубок потоков лобового рассеяния замещались сосредоточенными сопротивлениями.

Вначале рассмотрим использование электрического моделирования для анализа работы магнитоэлектрического генератора в режиме холостого хода. При создании модели машины сделаны следующие предположения.

1. Магнитномягкий материал ненасыщен, и его магнитная проницаемость по крайней мере больше 100. Поэтому проводимость соответствующих участков модели принята бесконечно большой.

2. Магнитная текстура звездочки ротора идеальна, т. е. направление жестких свойств на всех участках совпадает с направлением средней линии потока возбуждения.

3. Ротор был намагничен в поле, трубки которого совпадали всюду с направлением текстуры; при этом напряженность поля при намагничивании была достаточна для выхода на предельную петлю гистерезиса.

В режиме холостого хода магнитное поле в воздушном пространстве магнитоэлектрического генератора (генератора с постоянными магнитами) потенциально и его можно описать уравнением в частных производных для скалярной функции магнитного потенциала φ_M

$$\frac{d^2 \varphi_M}{dx^2} + \frac{d^2 \varphi_M}{dy^2} = 0 \quad (1)$$

или для силовой функции ψ_M

$$\frac{d^2 \psi_M}{dx^2} + \frac{d^2 \psi_M}{dy^2} = 0 \quad (2)$$

На электрической модели электрическое поле в области, соответствующей воздушному пространству в генераторе (например, в рабочем воздушном зазоре) тоже потенциально и аналогично предыдущему случаю может быть описано уравнением Лапласа в частных производных как для потенциальной функции $\varphi_{\mathcal{E}}$

$$\frac{d^2 \varphi_{\mathcal{E}}}{dx^2} + \frac{d^2 \varphi_{\mathcal{E}}}{dy^2} = 0 \quad , \quad (3)$$

так и для силовой функции $\psi_{\mathcal{E}}$

$$\frac{d^2 \psi_{\mathcal{E}}}{dx^2} + \frac{d^2 \psi_{\mathcal{E}}}{dy^2} = 0 \quad . \quad (4)$$

Используя подобие приведенных уравнений, можно распределение функций φ_M и ψ_M магнитного поля оригинала моделировать распределением функций $\varphi_{\mathcal{E}}$ и $\psi_{\mathcal{E}}$ в электрическом поле модели.

Картину распределения скалярного электрического потенциала на электрической модели удобно исследовать с помощью высокоомного вольтметра. С его помощью определяется распределение эквипотенциалей $\varphi_{\mathcal{E}}(x, y) = const$ в рассматриваемой области поля. Их расположение можно зарисовать и получить точную картину

распределения электрического поля в модели, соответствующую картине магнитного поля в заданной области оригинала.

Линии постоянства силовой функции и эквипотенциали как на электрической модели, так и в оригинале ортогональны.

Поскольку запись уравнения Лапласа относительно скалярной функции потенциала и силовой функции как для магнитного поля оригинала, так и для электрического поля модели подобны, возможны два варианта их сопоставления.

1. Прямое моделирование – получаем при сопоставлении уравнений (1) и (3). При этом распределение скалярного потенциала на электрической модели $\varphi_э(x, y)$ повторяет распределение скалярного потенциала в магнитном поле оригинала $\varphi_м(x, y)$.

2. Обратное моделирование - получаем при сопоставлении уравнений (2) и (3). В этом случае линиям постоянства скалярного потенциала ($\varphi_э(x, y) = const$) на модели соответствуют линии постоянства силовой функции ($\psi_м(x, y) = const$) в магнитном поле оригинала.

В данной работе для построения электрической модели магнитной цепи магнитоэлектрического генератора использовано прямое моделирование.

На электрической модели строим картину распределения эквипотенциальных линий. Используя масштабные коэффициенты, принятые при создании электрической модели, получаем картину распределения эквипотенциальных линий $\varphi_м(x, y) = const$ в магнитном поле оригинала и их числовые значения. По полученной картине поля вычисляем значение магнитной индукции $B(x, y)$ в любой точке исследуемого пространства.

Модель постоянного магнита.

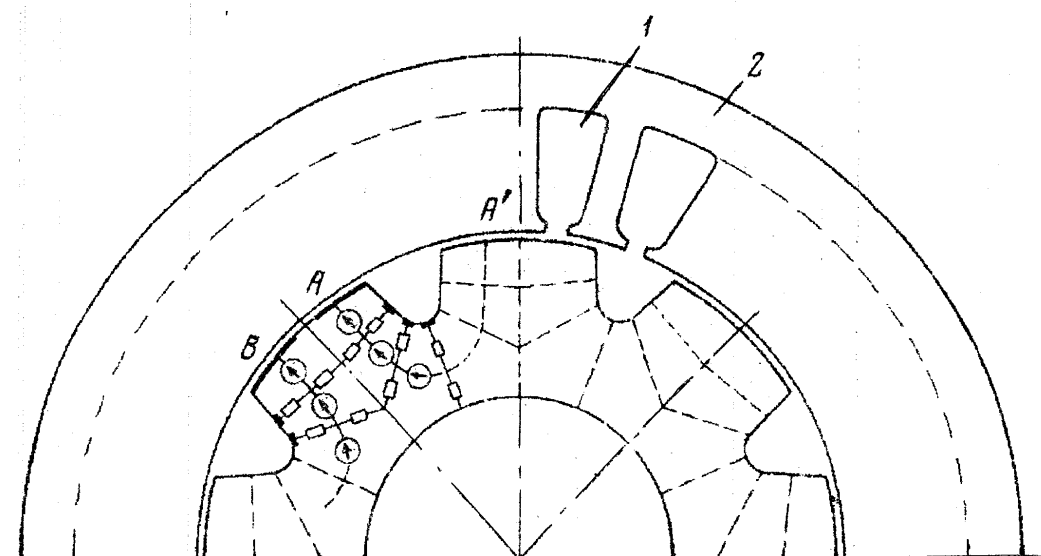
Возбуждение в синхронном магнитоэлектрическом генераторе создается постоянным магнитом, расположенным на роторе и намагниченным радиально.

Поле возбуждения, созданное постоянным магнитом, является потенциальным. Эквипотенциали магнитного поля оригинала совпадают с эквипотенциалами электрической модели; магнитной проницаемости среды соответствует электрическая проводимость модели.

Постоянный магнит – нелинейный анизотропный материал. В направлении оси легкого намагничивания его свойства описываются петлёй гистерезиса, а в направлении перпендикулярном основному зависимость $B(H)$ соответствует кривой первоначального намагничивания.

При электрическом моделировании создать сплошную среду с подобными электрическими свойствами не представляется возможным. Поэтому приходится применять дискретную аппроксимацию, разбивая область, занятую постоянным магнитом, на элементарные объёмы, в пределах которых считаем свойства среды постоянными.

Структура сетки (Рис. 1) соответствует разбиению магнита на области по криволинейным координатным линиям, совпадающим и перпендикулярным средней линии магнита.



1 – электропроводная бумага, 2 - фольга

Рисунок 1. Модель машины в режиме холостого хода

Дискретность разбиения определяется допустимой погрешностью линейной аппроксимации.

Рассмотрим подробнее такую элементарную ячейку (Рис. 2).

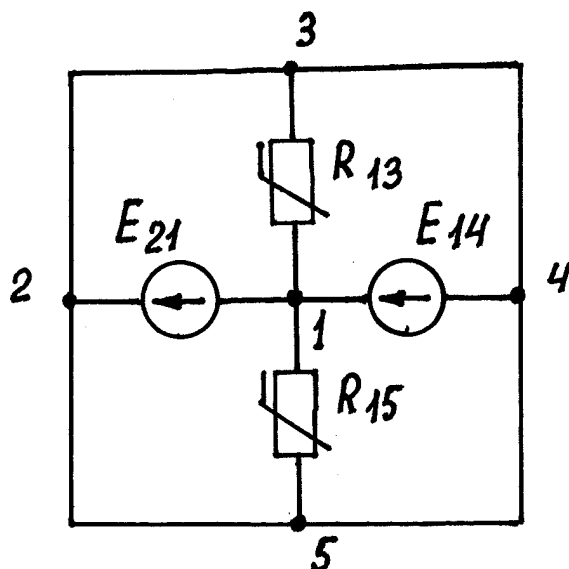


Рисунок 2. Электрическая модель элементарного объема постоянного магнита

Учет нелинейных анизотропных свойств постоянного магнита на модели осуществляем с помощью четырех нелинейных элементов.

а) E_{21} и E_{14} – нелинейные источники э.д.с., учитывающие свойства постоянного магнита в направлении оси легкого намагничивания. Зависимость $E(I)$ имеет вид, подобный спинке петли гистерезиса.

б) R_{13} и R_{15} - нелинейные пассивные элементы, учитывающие свойства постоянного магнита в направлении, перпендикулярном оси легкого намагничивания. Для них зависимость $U(I)$ имеет вид, подобный кривой первоначального намагничивания материала постоянного магнита в соответствующем направлении.

Электрические элементы E_{21} и E_{14} , R_{13} и R_{15} моделирующие свойства постоянного магнита и имеющие требуемые характеристики, выполнены с помощью диодно-резистивных элементов. Они осуществляют кусочно-линейную аппроксимацию требуемой характеристики и легко подстраиваются при уточнении положения рабочей точки на характеристике постоянного магнита.

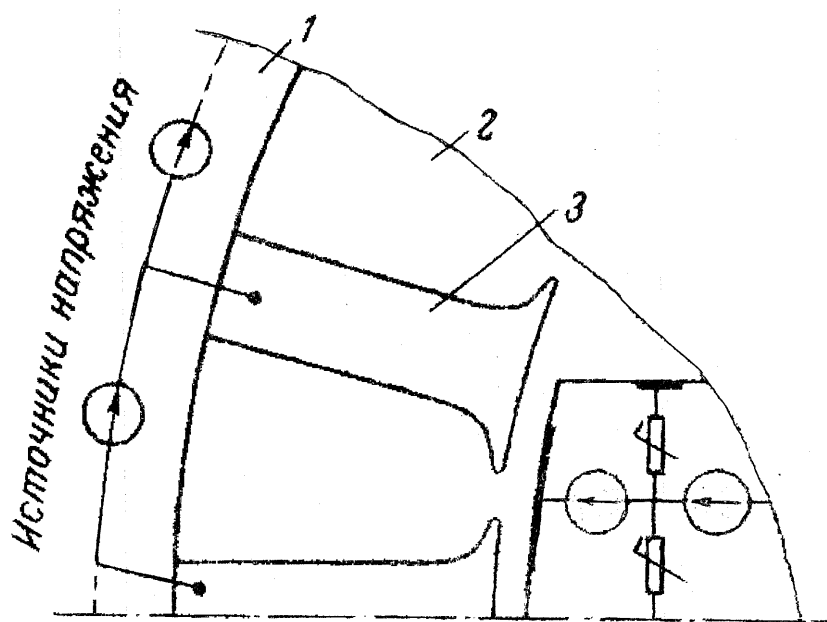
Рассмотренное построение нелинейной сетки соответствует прямому моделированию постоянного магнита.

Моделирование поля машины при нагрузке.

Магнитное поле токов якоря, являющееся вихревым, характеризуется векторным потенциалом.

Для двухмерного магнитного поля оригинала дифференциальное уравнение, записанное для векторного магнитного потенциала, аналогично дифференциальному уравнению для скалярного электрического потенциала записанному для двухмерного электрического поля токов в модели. Источники электрических токов должны находиться на электрической модели в области расположения обмоток. При этом возникает «обратное» подобие: линиям потока оригинала соответствуют эквипотенциали модели, магнитной проницаемости - удельное сопротивление моделирующей среды. Прямое совмещение моделей поля возбуждения и поля якоря невозможно.

Но возможен приближенный вариант решения задачи, особенно в тех случаях, когда наибольший интерес представляет поле в воздушном зазоре. Если зубцы якоря не насыщены, то разность магнитных потенциалов их верхних частей (выше края катушки в пазу) равна ампервиткам паза. По длине зубцов потенциал изменяется и становится равным нулю у дна паза. В первом приближении можно считать потенциал каждого зубца неизменным, задавая предельную разность потенциалов у дна паза (рис.3).



1 – непроводящая бумага, 2 – электропроводная бумага, 3 - фольга

Рисунок 3. Модель машины в режиме нагрузки

В этих случаях заведомо допускается искажение поля в самом пазу, но поле в воздушном зазоре машины, экранированное коронками зубцов, будет близко к истинному. Этот путь был избран при решении контрольной задачи.

При анализе магнитоэлектрического генератора с нестабилизированным постоянным магнитом, используются моделирующие его электрические элементы, параметры которых пропорциональны предельной петле гистерезиса.

Если анализируется режим работы магнитоэлектрического генератора с учетом работы постоянного магнита на кривых возврата, необходимо знать степень стабилизации постоянного магнита, на какой кривой возврата работает каждый элементарный объем магнита, для чего необходимо знать как произошла стабилизация магнита, т.е. надо знать и учитывать предысторию магнита. При этом задача существенно усложняется, т.к. уровень стабилизации постоянного магнита будет зависеть и от предельных нагрузочных режимов генератора.

Результаты исследования реальной машины.

По известным характеристикам материала постоянного магнита в продольном и поперечном направлениях в соответствии с выбранными коэффициентами моделирования и принятым разбиением ротора на элементарные объемы были настроены продольные и поперечные элементы нелинейной сетки.

Граничные узлы нелинейной сетки соединялись со специальными электродами на геометрических границах воздушной области. Коэффициент мощности нагрузки задавался определенной настройкой пространственного угла между осями поля ротора и поля статора. В соответствии с величиной тока нагрузки устанавливалась разность потенциалов между зубцами статора.

На модели были определены кривые изменения магнитной индукции вдоль рабочего зазора для ряда наиболее характерных режимов работы генератора. Измерение напряжений на модели проводились с помощью высокоомного вольтметра ($R_{вх}=10 \text{ МОм}$). Результаты измерений на модели сопоставлялись с результатами исследования реальной машины.

С помощью измерительной катушки, установленной на статоре, на осциллографе записывалась форма кривой поля в рабочем зазоре для всевозможных режимов работы машины. По показаниям вольтметра средних значений, подключенного к измерительной обмотке, определялось усредненное по площади измерительной катушки значение индукции. (Измерение частоты проводилось с помощью частотомера). Сравнение данных

модели и оригинала, приведенных в таблице, подтверждает правильность постановки экспериментов и доказывает правильность выполненного моделирования.

Таблица.

Сопоставление результатов моделирования и измерений на реальной машине

Характер нагрузки	Состояние магнита	B_{cp} (модель) Т	B_{cp} (оригинал) Т	Расхождение, %
Холостой ход	На предельной петле	0,325	0,332	2,1
Индуктивная нагрузка	На предельной петле	0,305	0,296	3
Индуктивная нагрузка	На кривой возврата	0,293	0,294	0,4

Примечание. B_{cp} – средняя значение индукции в воздушном зазоре на полюсном делении.

Выводы.

1. Показана возможность применения электрического моделирования для анализа сложных магнитных полей магнитоэлектрических машин.
2. Проведено исследование сложной магнитной системы магнитоэлектрического генератора при наличии в ней двух разнородных источников магнитного поля: поля возбуждения от постоянных магнитов и поля реакции обмотки якоря.
3. Рассмотрены ряд наиболее характерных режимов работы генератора при разных нагрузках.
4. Предложенная методика рассмотрена как при работе постоянного магнита на предельной петле гистерезиса (при нестабилизированном постоянном магните), так и на кривых возврата (при стабилизированном магните). Предложенная методика моделирования позволяет учесть предысторию магнита, т. е. последовательно все этапы технологической обработки.
5. Проведено сопоставление результатов моделирования с данными экспериментального исследования основных параметров магнитоэлектрического генератора.
6. Метод обладает значительной универсальностью: на моделях можно вести исследование новых более сложных систем, аналитический расчет которых еще не отработан.

Список литературы

1. Копылов И.П. Математическое моделирование электрических машин. М.: Высш. шк., 2002. 327 с.
2. Коген-Далин В.В., Шатуновский В.Л. Об электрическом моделировании систем с постоянными магнитами. Изв. АН СССР. Энергетика и транспорт. 1985. №6. С. 94-97.
3. Волченсков В.И. Анализ состояния магнитной цепи двигателя постоянного тока с помощью электрического моделирования// Наука и образование. МГТУ им. Н.Э. Баумана. Электрон. журн. 2011. №12. Режим доступа:
<http://technomag.edu.ru/doc/284291.html> (дата обращения 09.04.12).