

Об особенностях моделирования магнитной цепи синхронного генератора с постоянными магнитами.

77-48211/618824

09, сентябрь 2013

Волченсков В. И., Соболев В. А.

УДК 621.31

Россия, МГТУ им. Н.Э. Баумана

volchens@yandex.ru

vasobolev40@yandex.ru

Одним из этапов проектирования электромагнитных устройств является расчет их магнитной цепи. В зависимости от сложности задачи и требуемой точности результата используют разные методы расчета, начиная от простейших схем замещения магнитной цепи устройства до расчета картины распределения магнитного поля в системе на электрических моделях или с помощью прямого расчета на ЭВМ.

Расчеты магнитных полей в линейных средах достаточно хорошо отработаны [1, 2]. Задача усложняется при наличии в магнитной цепи нелинейных участков, определяемых, например, насыщением магнитопровода.

Большие трудности возникают при наличии областей с нелинейной анизотропной средой, например, при наличии в магнитной цепи постоянных магнитов.

Следующей ступенью усложнения задачи является расчет устройств с нелинейной анизотропной средой в присутствии катушек с током, то есть при наличии в магнитной системе одновременно вихревого магнитного поля, создаваемого катушками с током, и потенциального магнитного поля, создаваемого постоянным магнитом. К таким устройствам относятся, например, генераторы с постоянными магнитами.

Если при расчете магнитной цепи магнитоэлектрического генератора использовать схемы замещения, погрешность расчета оказывается большой, так как при этом используется ориентировочное представление о картине магнитного поля в устройстве. Проводимости трубок потоков рассеивания и в рабочем зазоре системы определяются по ориентировочным формулам с массой эмпирических коэффициентов. Распределение магнитных потоков влияет на рабочее состояние постоянного магнита. В итоге расчет даже интегральных характеристик магнитной цепи дает большие погрешности.

Другим способом расчета магнитной цепи магнитоэлектрических устройств является электрическое моделирование в сплошных средах, либо на сетках с сосредоточенными параметрами.

В работе [3] использовано электрическое моделирование электромагнитного устройства на электропроводящей бумаге. В этом случае отсутствуют погрешности дискретизации при расчете магнитных потоков рассеяния и главного потока. В этой работе рассмотрена методика расчета электромагнитного устройства при наличии в цепи только обмоток с током, то есть рассмотрено моделирование вихревого магнитного поля.

В работах [2,4] рассмотрено моделирование устройств, в которых в качестве источника магнитного поля используется постоянный магнит. В этом случае магнитное поле в устройстве потенциальное.

В работе [5] рассмотрен расчет электромагнитного устройства при наличии в нем одновременно катушек с током и постоянного магнита.

Сложность решаемой задачи состоит в том, что при моделировании вихревого магнитного поля катушек используется обратное моделирование, а при моделировании магнитного поля в области, занятой нелинейной анизотропной средой (область постоянного магнита) удобнее использовать прямое моделирование. Одновременное использование прямой и обращенной моделей вместе невозможно.

В работе [5] используется прямое моделирование. Но при этом принимается ряд принципиальных допущений, которые могут вносить в расчет существенные погрешности.

При строгом подходе к решению задачи допускается использование только обращенного моделирования. При этом возникают новые сложности, связанные с необходимостью создания обращенной модели постоянного магнита.

Информации об использовании обращенной модели для области, занятой постоянным магнитом в литературе нет.

В данной статье впервые разработана и использована обращенная модель постоянного магнита и решена задача строго подхода к расчету магнитного устройства при одновременном наличии в нем постоянного магнита и катушек с током.

Для решения этой задачи применялось электрическое моделирование с использованием электропроводящей бумаги. Расчет подобной задачи на ЭВМ представляет отдельную задачу и будет выполнен позже.

Решение полевых задач с помощью электрического моделирования в сплошных средах имеет ряд преимуществ и ряд недостатков. К важным преимуществам метода моделирования в сплошных средах следует отнести :

- возможность получения точной картины поля в рассматриваемой области при заданных граничных условиях;

- снимаются вопросы сходимости решения при расчете картины поля как в линейной (воздух), так и в нелинейной (магнитопровод, постоянный магнит) среде.

Основным недостатком метода электрического моделирования в сплошных средах и создании дискретных нелинейных сеток является трудоемкость изготовления модели.

Моделирование воздушного пространства.

На внутренней поверхности статора синхронного генератора находятся пазы, внутри которых расположена якорная обмотка. Магнитное поле, создаваемое этой обмоткой в области самой обмотки, является вихревым и описывается уравнением Пуассона.

Для двумерной задачи уравнение имеет вид

$$\frac{d^2 A_z}{dx^2} + \frac{d^2 A_z}{dy^2} = \mu_0 \cdot \delta_z \quad (1)$$

Здесь A_z - z -ая составляющая векторного потенциала магнитного поля ($A_x = 0; A_y = 0$);

x, y - оси координат;

δ_z - z -ая составляющая плотности тока в области, занятой обмоткой якоря;

μ_0 - магнитная проницаемость вакуума.

При создании электрической модели исследуемую область замещаем электропроводящей средой (электропроводящей бумагой) с удельным сопротивлением ρ .

Наличие обмотки в пазах учитываем на модели введением в область расположения обмотки сторонних токов с плотностью j_z в соответствии с уравнением Пуассона для электрического поля в проводящей среде с удельным сопротивлением ρ .

Уравнение Пуассона относительно скалярного электрического потенциала для двумерной задачи (для плоскопараллельного поля) имеет вид

$$\frac{d^2 \varphi}{dx_z^2} + \frac{d^2 \varphi}{dy_z^2} = \rho \cdot j_z \quad (2)$$

Здесь φ - величина скалярного электрического потенциала в рассматриваемой точке модели с координатами x_z и y_z ;

$j_{\text{э}}$ - плотность электрического тока в рассматриваемой точке модели;

ρ - удельное электрическое сопротивление среды в рассматриваемой области модели.

Сопоставление уравнений (1) и (2) позволяет создать электрическую модель магнитной системы, в которой распределение скалярного электрического потенциала и его численное значение $\varphi(x_{\text{э}}, y_{\text{э}})$ на модели будет строго соответствовать распределению z -ой составляющей векторного магнитного потенциала $A_z(x, y)$ в исследуемом оригинале, т.е. в пазу с якорной обмоткой синхронного генератора.

При создании электрической модели должны быть правильно заданы граничные условия, строго выдерживаться принятые критерии подобия.

Теория моделирования подобных полей разработана и приведена в [2].

При моделировании вихревых магнитных полей в области, занятой обмоткой с током, возможно использование только обращенного варианта моделирования (обращенной модели). В этом случае получаем строгое соответствие величины скалярного электрического потенциала $\varphi(x_{\text{э}}, y_{\text{э}})$ на модели численному значению векторного магнитного потенциала $A_z(x, y)$ в магнитном поле реального исследуемого устройства. По полученной картине поля вычисляем значение магнитной индукции $B(x, y)$ в любой точке исследуемого пространства.

Методика анализа электрического поля на модели не представляет особых принципиальных сложностей [3], хотя в зависимости от поставленной задачи ее использование может оказаться достаточно кропотливым и трудоемким.

Моделирование области, занятой постоянным магнитом.

При выполнении модели синхронного генератора приняты допущения:

1. Магнитномягкий материал магнитопровода ненасыщен ($\mu_R \gg 100$).
2. При выполнении модели постоянного магнита ротора принято, направление оси легкого намагничивания материала постоянного магнита совпадающим с направлением средней линии потока возбуждения.
3. Материал постоянного магнита намагничен до достижения предельной петли гистерезиса характеристики $B(H)$.

Постоянный магнит является нелинейным анизотропным материалом. В направлении оси легкого намагничивания свойства постоянного магнита описываются петлей гистерезиса. Его рабочая точка находится во втором квадранте характеристики $B(H)$

магнита. В направлении, перпендикулярном основному, зависимость $B(H)$ соответствует кривой первоначального намагничивания.

Получить в электрической среде область с удельными характеристиками $j_3(E_3)$, подобными характеристикам $B(H)$ магнита, не представляется возможным. Поэтому при создании модели постоянного магнита приходится распределенную сплошную область представлять дискретно, разбивать ее на элементарные объемы и каждый такой элементарный объем моделировать сеткой из сосредоточенных элементов с характеристиками, подобными заменяемому элементарному объему постоянного магнита. Эта сетка должна учитывать как нелинейность, так и анизотропию среды в области, занятой постоянным магнитом.

В направлении оси легкого намагничивания свойства среды должны соответствовать петле гистерезиса $B(H)$ постоянного магнита во втором квадранте, а в направлении, перпендикулярном оси легкого намагничивания, должны соответствовать кривой первоначального намагничивания $B(H)$ материала постоянного магнита в первом квадранте.

Дискретность выбранной нелинейной сетки влияет на точность конечного результата расчета исследуемой системы.

При решении задачи анализа состояния магнитной цепи синхронного генератора было принято допущение, что постоянный магнит работает на предельной петле гистерезиса характеристики $B(H)$. Возможен учет предыстории магнита, работа отдельных его объемов на частных циклах петли гистерезиса, но это значительно усложнит задачу и в объеме данной работы не рассматривается.

Магнитное поле в области постоянного магнита можно считать потенциальным и анализировать его с помощью как прямой, так и обращенной моделей.

Анализ магнитной системы синхронного генератора с помощью прямой модели рассмотрен в [5]. При этом принимались ряд допущений при рассмотрении зоны, занятой обмоткой статора синхронного генератора.

В данной работе применен более строгий подход при совместном моделировании на одной модели потенциального магнитного поля постоянного магнита и вихревого магнитного поля, создаваемого обмоткой статора.

Это возможно только при использовании обращенной модели.

При этом возникает вопрос, как создать обращенную электрическую модель учитывающую свойства среды в области, занятой постоянным магнитом.

Рассмотрим особенности построения такой обращенной электрической модели.

Построение обращенной модели постоянного магнита.

Для построения совмещенной модели вихревого магнитного поля, создаваемого якорной обмоткой синхронного генератора, и потенциального поля, создаваемого постоянным магнитом, строим обращенную электрическую модель.

Рассмотрим порядок построения обращенной модели области, занятой постоянным магнитом.

Разбиваем эту область на элементарные объемы и строим схему замещения каждого объема. Эта схема замещения должна учитывать нелинейные свойства и анизотропию материала постоянного магнита.

Для сравнения на рис. 1 и рис. 2 представлены схемы замещения элементарных объемов постоянного магнита принимаемые при прямом моделировании (рис.1) и при обратном моделировании (рис. 2).

При прямом моделировании элементарный объем представляем четырьмя элементами (рис.1), из которых 1-ый и 3-ий элементы имеют характеристики $I(U_{\varepsilon})$ прямо пропорциональные характеристике $B(H)$ материала магнита в направлении оси легкого намагничивания (петля гистерезиса, 2-ой квадрант).

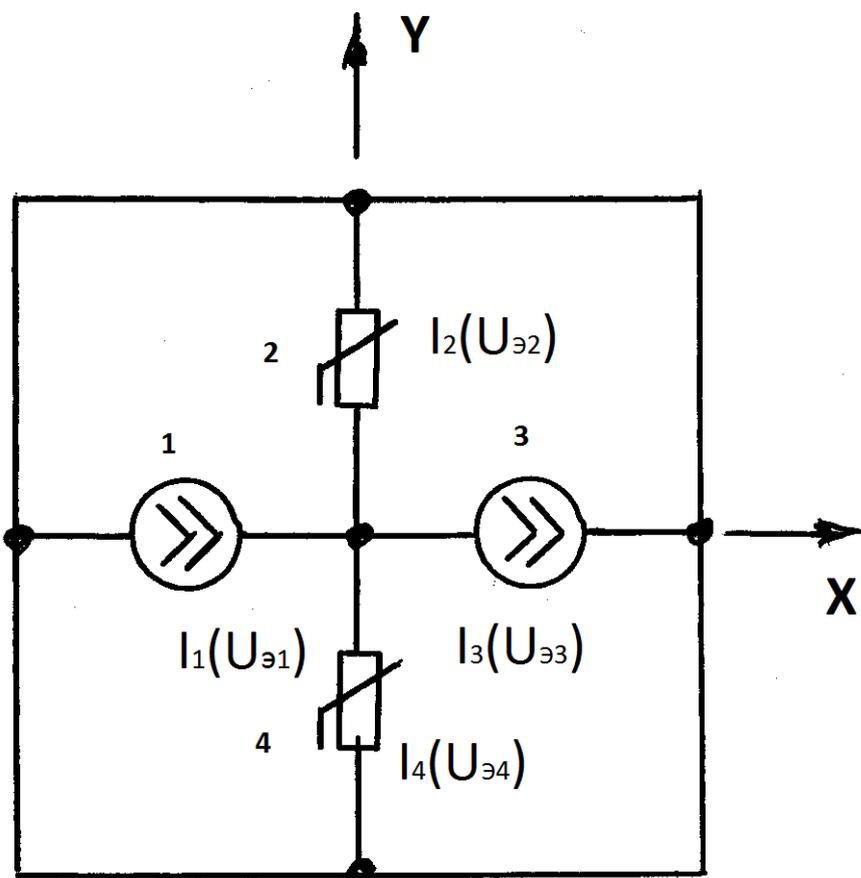


Рис.1

Элементы 2-ой и 4-ый в схеме замещения элементарного объема должны иметь характеристики $I(U_{\odot})$, пропорциональные кривой первоначального намагничивания постоянного магнита $B(H)$ в направлении, перпендикулярном оси легкого намагничивания.

При обращенном моделировании элементарный объем постоянного магнита замещается схемой, представленной на рис. 2.

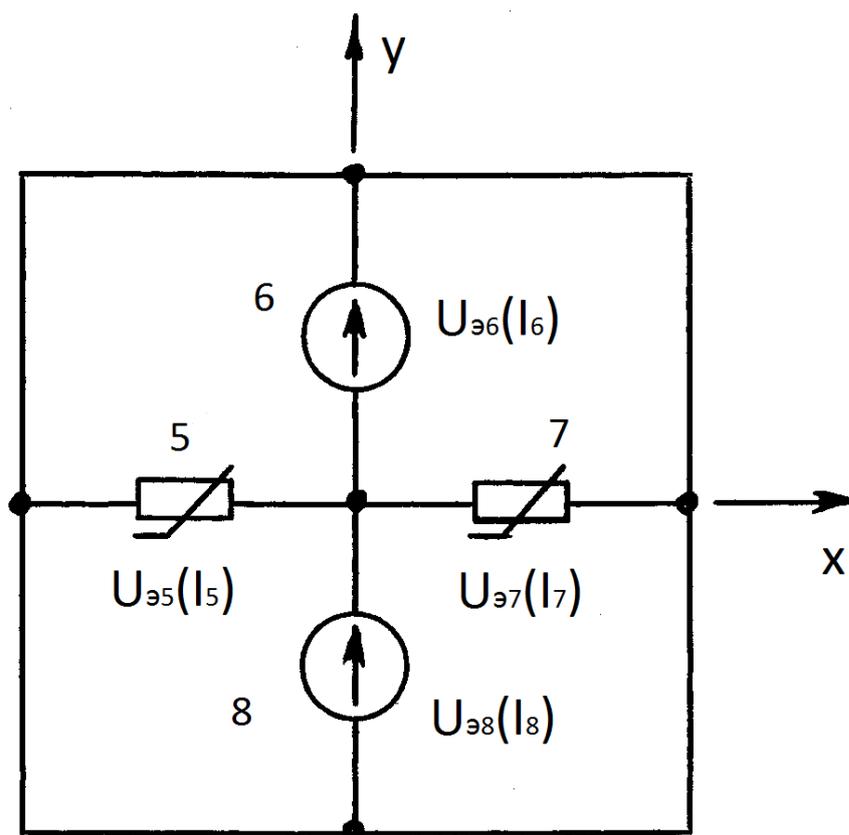


Рис.2

После некоторых перестроений получили, что элементарный объем постоянного магнита также замещается сеткой, состоящей из 4-х элементов.

Характеристики $U_{\odot}(I)$ 5-ого и 7-ого элементов пропорциональны обращенной характеристике $H(B)$ материала постоянного магнита в направлении, перпендикулярном оси легкого намагничивания (1-ый квадрант).

Характеристики $U_{\vartheta}(I)$ 6-ого и 8-ого элементов пропорциональны обращенной характеристике $H(B)$ материала постоянного магнита в направлении оси легкого намагничивания (2-ой квадрант петли гистерезиса).

На рис. 3 представлена обращенная модель симметричной части синхронного генератора.

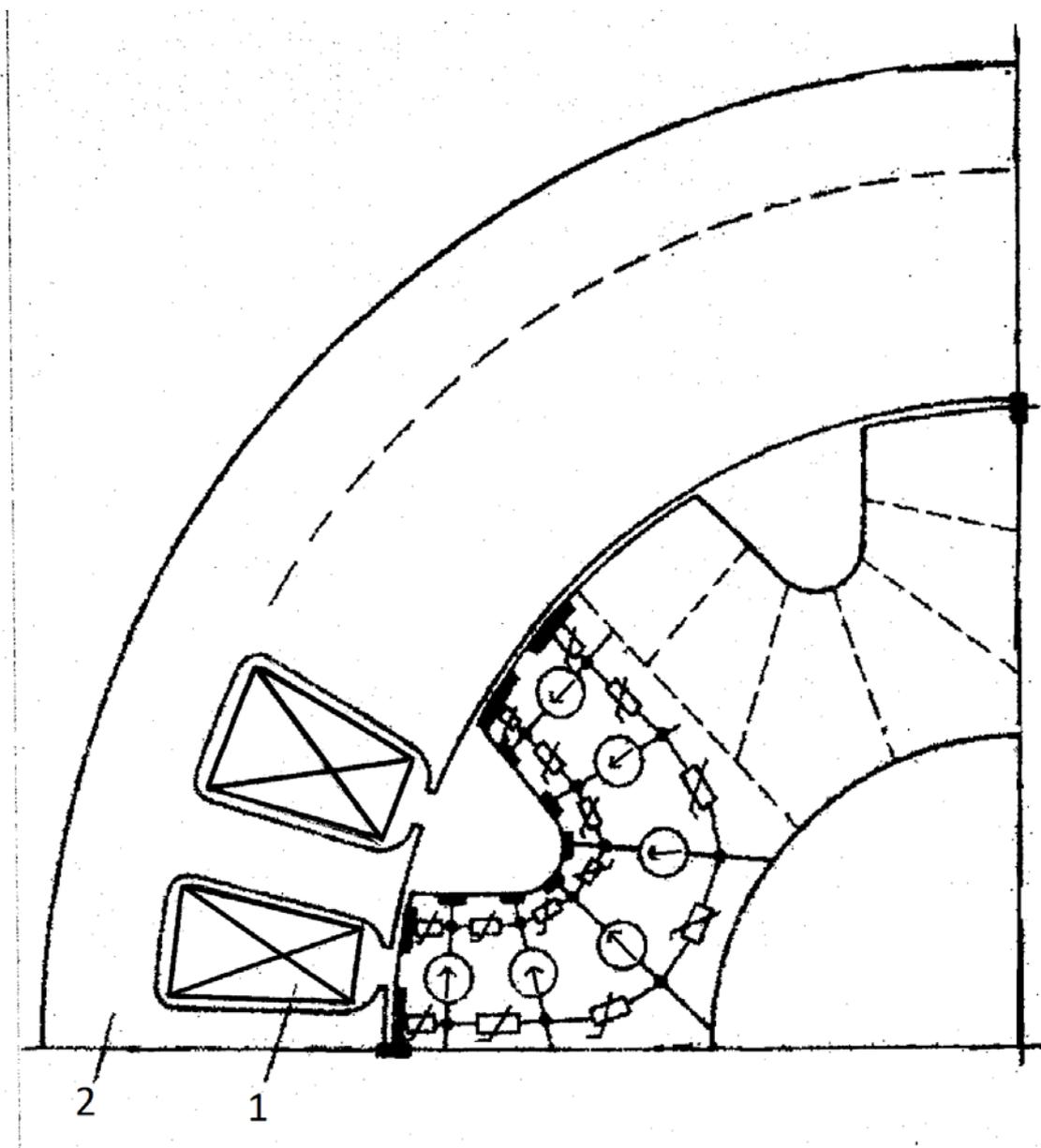


Рис. 3

Для проверки правильности используемой методики моделирования проведено сравнение результатов расчета магнитной цепи синхронного генератора с помощью электрического моделирования с результатами обмера соответствующей реальной машины. Сравнение проводилось по характеру изменения магнитной индукции в рабочем воздушном зазоре синхронного генератора и по величине магнитного потока,

создаваемого одним полюсом звездочки постоянного магнита ротора. Сравнение проводилось для нескольких характерных режимов работы генератора.

Максимальная разница при сопоставлении значений магнитного потока, создаваемого постоянным магнитом, по результатам, полученным на модели и на реальной машине, не превышает 7%, что можно считать хорошим результатом при анализе магнитной цепи с постоянными магнитами.

Выводы.

1. Рассмотрена методика моделирования вихревого магнитного поля в области, занятой обмоткой с током.

2. Рассмотрена методика прямого моделирования магнитного поля в нелинейной анизотропной среде.

3. Рассмотрена методика обращенного моделирования магнитного поля в нелинейной анизотропной среде.

4. Рассмотрена методика моделирования сложного магнитного поля при наличии в электромагнитном устройстве одновременно вихревого магнитного поля в линейной среде и потенциального магнитного поля в нелинейной анизотропной среде.

5. Выполнено экспериментальное исследование магнитной цепи синхронного генератора для ряда основных режимов его работы (при разной нагрузке $I = \text{var}$).

6. Проведено сопоставление результатов анализа магнитной цепи синхронного генератора на модели и результатов обмера реального синхронного генератора для ряда режимов его работы. Расхождение результатов сопоставления по интегральным характеристикам не превышает 7%. Экспериментальная проверка подтвердила правильность предложенной методики электрического моделирования на примере анализа работы синхронного магнитоэлектрического генератора.

Список литературы:

1. И.П. Копылов. Математическое моделирование электрических машин. – М.: Высш. шк., 2002. – 327 с.
2. В.В. Коген-Далин, Л.В. Шатуновский. Об электрическом моделировании систем с постоянными магнитами. Изв. АН СССР, Энергетика и транспорт, 1985, № 6.
3. Волченсков В.И. Анализ состояния магнитной цепи двигателя постоянного тока с помощью электрического моделирования // Наука и образование. МГТУ им.

Баумана. Электрон. журн. 2011. №12. Режим доступа:

<http://technomag.bmstu.ru/doc/284291.html>.

4. Волченсков В.И., Шатуновский В.Л. Расчет систем с постоянными магнитами при наличии насыщенных участков магнитопровода. «Электронная техника», серия VII, «Ферритовая техника», № 5, 1981, с. 24-26.
5. Волченсков В.И. Использование электрического моделирования для анализа состояния магнитной цепи электрических машин с постоянными магнитами // Наука и образование. МГТУ им. Баумана. Электрон. журн. 2012. № 9. Режим доступа: <http://technomag.bmstu.ru/doc/284291.html>.