

Анализ состояния магнитной цепи двигателя постоянного тока с помощью электрического моделирования

77-30569/284291

12, декабрь 2011

автор: Волченсков В. И.

УДК 621.31

МГТУ им. Н. Э. Баумана

volchens@mail.ru

В работе проведено исследование распределения магнитного поля в воздушном пространстве и магнитопроводе двигателя постоянного тока и распределения потенциала по коллектору двигателя при разных режимах его работы.

Работа выполнена с использованием электрического моделирования на электропроводящей бумаге с учетом возможного насыщения отдельных участков магнитопровода.

Электрическое моделирование в сплошных средах является достаточно трудоемким процессом [1]. Моделирование же с учетом насыщения магнитопровода, т.е. моделирование магнитного поля в нелинейной среде еще увеличивает трудоемкость исследования. В этом случае приходится использовать метод последовательных приближений, так как заранее не известна магнитная проницаемость отдельных участков магнитопровода.

В настоящее время электрическое моделирование в сплошных средах (на электропроводящей бумаге, в электролитической ванне) в связи с их большой трудоемкостью применяют редко.

Использование методов математического моделирования значительно облегчает расчет квазистатических, потенциальных и вихревых полей [2,3].

При решении полевой задачи расчеты ведутся дискретно, с некоторым шагом. Это позволяет получить хорошие результаты при сравнительно простой конфигурации и отсутствии насыщения магнитной цепи.

К тому же в большинстве случаев авторов интересуют интегральные характеристики исследуемого устройства и погрешность в 20...30% их вполне устраивает.

При уточненных расчетах магнитной цепи тяговых двигателей такое упрощение

задачи недопустимо, так как двигатели работают в резкопеременных режимах, когда индукция в полюсных наконечниках и в зубцах якоря достигает 2 Тл.

В случае сложной конфигурации магнитной цепи при наличии узких профилированных зазоров, сложной конфигурации отдельных участков магнитопровода, наличии разной степени насыщения в сужающихся участках магнитопровода задача существенно усложняется, что заставляет авторов принимать различные допущения и ограничения при выполнении расчетов. Эти ограничения слабо сказываются на интегральных характеристиках электромагнитного устройства таких, как полный магнитный поток главного полюса в двигателе постоянного тока, напряжение на его щетках и т. п. [4,5].

Если требуется исследовать более частные вопросы – такие как степень насыщения в зубцовой зоне ротора и в набегающей стороне башмака главного полюса двигателя постоянного тока, или напряжения, возникающие между пластинами коллектора при разных режимах работы двигателя – необходимо более тщательное исследование распределения магнитного поля вдоль поверхности ротора и особенно в рабочем зазоре двигателя.

В этом случае целесообразно использовать рассмотренный ниже метод анализа сложной магнитной цепи с помощью электрического моделирования в сплошной среде, например, на электропроводящей бумаге. Это дает возможность создать точную копию профиля полюсов и якоря с зубцами. Кроме того, на бумаге сравнительно просто осуществить моделирование изменения магнитной проницаемости отдельных участков цепи.

Использование нескольких сортов бумаги с разным удельным сопротивлением позволяет создавать модели магнитных систем, включающих насыщенные участки магнитопровода.

Преимущества предлагаемого метода анализ 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 насыщения магнитопровода.

Данную методику рассмотрим на примере анализа магнитной цепи тягового электродвигателя типа ДК-207А, работающего в номинальном режиме при токе возбуждения $i_{\text{ш}} = 2 \text{ А}$ и токе якоря $I_a = 192 \text{ А}$. Исследование двигателя проводилось на модели при коэффициенте геометрического подобия $K_l = l/l_{\text{мод}} = 0,25$. По точно

выполненному шаблону из электропроводящей бумаги вырезалось поле модели, соответствующее неферромагнитному пространству в двигателе (воздушный зазор, пазы ротора). Так как магнитопровод двигателя симметричен, то моделировалась четвертая часть полного поперечного сечения машины. При этом максимальный размер модели (между основаниями двух дополнительных полюсов) был равен 120 см; рабочий зазор машины (по оси главного полюса) на модели составлял 14 мм.

В первом приближении не учитывалось насыщение всех участков магнитной цепи машины, и магнитная проницаемость принималась равной бесконечности. Это положение справедливо при условии, что проницаемость магнитной системы машины на 2-3 порядка больше проницаемости воздуха. Поэтому на модели первого приближения, изображенной на рис. 1, все ферромагнитные участки выполнялись из бумаги с удельным сопротивлением $\rho = \infty$, т. е. из непроводящей подложки модели. Неферромагнитные области замещались бумагой с $\rho = 0,55 \text{ кОм}$.

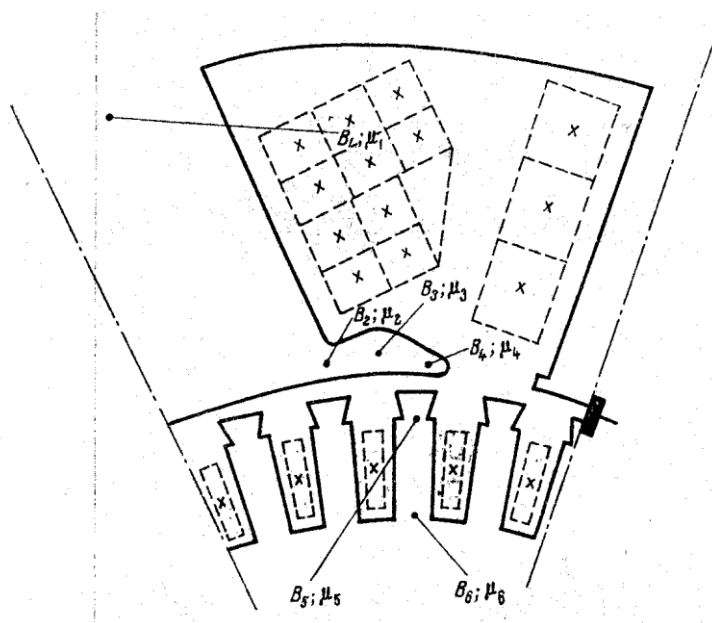


Рис. 1. Модель первого приближения

Коэффициент соотношения сред при моделировании принимался равным

$$K_{\mu} = \frac{\mu_0}{\rho} = 2,28 \cdot 10^{-9} \text{ гн/м} \cdot \text{ом}.$$

Намагничивающая сила катушек моделировалась дискретно точечными источниками тока. На рис. 1 показано разбиение областей расположения катушек на квадраты. В центре каждого из них (в соответствии с полярностью и количеством ампервитков) осуществлялся подвод тока. Расположение тоководов показано

крестиками. Количество квадратов выбиралось исходя из конфигурации магнитопровода, места расположения обмотки, конфигурации и возможного влияния данной обмотки на соответствующую область поля. Коэффициент соответствия между намагничивающей силой в натуре и током на модели равнялся

$$K_I = \frac{I\omega}{I_{MOD}} = 48 \cdot 10^6.$$

Ток каждой секции якорной обмотки моделировался одним токовводом, так как паз сильно экранирован выступающими якорными зубцами.

Таблица 1

Значения индукций [Тл] и магнитных проницаемостей на моделируемых участках

Параметры	Первое приближение		Второе приближение		Третье приближение	
	При построении модели	Полученный результат	При построении модели	Полученный результат	При построении модели	Полученный результат
B_1		1,58		0,767		1,15
B_2		7,0		0,945		2,5
B_3		3,68		0,58		1,22
B_4		3,38		0,7		1,57
B_5		6,7		0,66		1,95
B_6	∞	3,7		0,48		1,56
μ_1	∞	∞	∞	∞	∞	∞
μ_2	∞	1	2	∞	5	4
μ_3	∞	1,5	5	∞	∞	1000
μ_4	∞	2,4	10	∞	80	300
μ_5		2	2	∞	5	45
μ_6		3,5	5		80	300

Найденные значения магнитной индукции в различных сечениях магнитопровода (рис. 1 и табл. 1) указывают на необходимость создания модели следующего приближения, в котором магнитная проницаемость участков соответствовала бы высоким индукциям в

них.

По полученным значениям индукции первого приближения и характеристике $\mu(B)$ стали магнитопровода были найдены магнитные проницаемости во всех областях, имеющих заметное насыщение (рог главного полюса с набегающей стороны поля, основания и шейки зубцов ротора). В соответствии с новыми значениями μ , полученными из модели первого приближения, строилась модель второго приближения (рис. 2). На этом рисунке разной штриховкой обозначены области модели с разным сопротивлением бумаги.

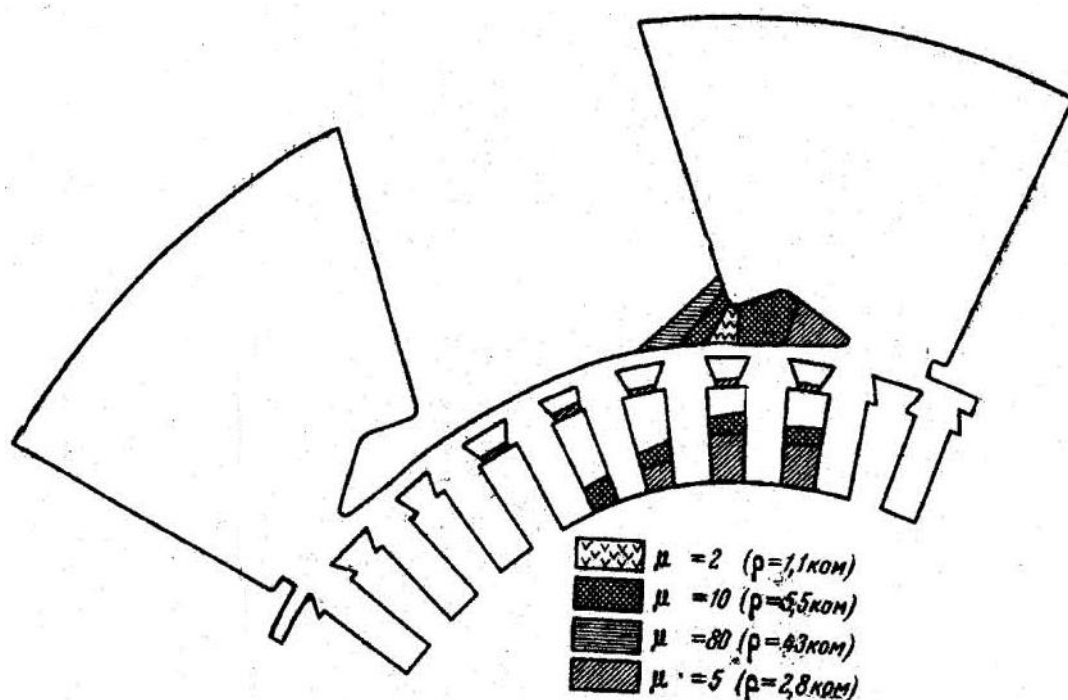


Рис. 2. Поле модели во втором приближении

На модели второго приближения снова определялась картина поля, рассчитывались потоки в отдельных трубках и индукции в тех же сечениях магнитопровода. Сравнивая вновь полученные магнитные проницаемости на участках и значения магнитных проницаемостей, для которых построена эта модель, видим, что магнитная проницаемость второй модели вновь не соответствует индукциям, полученным на ней (табл.1). Следовательно, модель второго приближения не вполне соответствует состоянию двигателя в данном режиме работы. Необходимо следующее приближение.

Допустимая погрешность решения обычно бывает известна. Уменьшение ее связано с ростом трудоемкости решения. (В среднем выполнение одного приближения занимает один день.).

Получение большой точности в ряде практических случаев не требуется. При

моделировании обычно задаются допустимым отклонением по потоку (или индукции), и когда получают индукцию, рассчитанную по картине поля, отличающуюся от индукции, для которой построена модель, на допустимую величину, то считают это приближение окончательным.

Для третьего приближения указанная разность характеризуется следующими данными:

ΔB_1	ΔB_2	ΔB_3	ΔB_4	ΔB_5	ΔB_6
0%	3,3%	0%	14,1%	19,2%	14,1%

Наибольшее отклонение индукции в пятой точке (рис.1) составляет 19,2%. Эта величина оказалась допустимой, принимая во внимание, что занимаемая этой бумагой область слишком мала и влияние ее на общую картину поля и на итоговые потенциальные характеристики незначительно. Последнее подтверждается окончательной интегральной проверкой. Погрешность, полученная по потенциальным кривым, не превышает 7%.

Для иллюстрации необходимости нескольких последовательных приближений при расчете на модели сравним величины потоков в полюсах, полученные в первом и третьем приближениях.

В соответствии с моделью первого приближения при ненасыщенном магнитопроводе поток через основание главного полюса равен

$$\Phi_0 = 5,72 \cdot 10^{-2} \text{ Вб},$$

а в последнем приближении с учетом насыщения

$$\Phi_0 = 3,54 \cdot 10^{-2} \text{ Вб}.$$

Отличие суммарного потока через главный полюс, полученное при первом приближении и при последнем, достигает 60%.

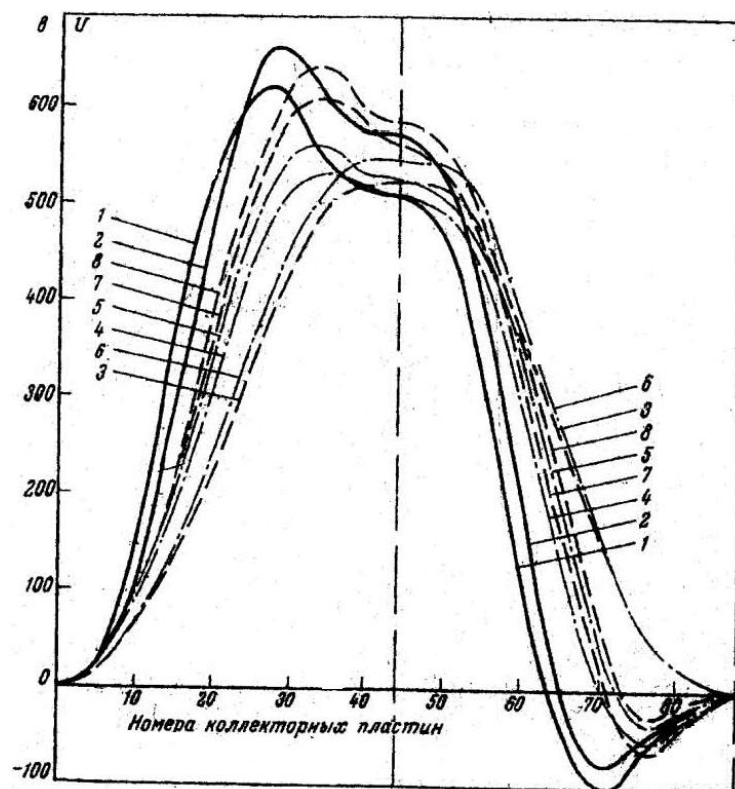


Рис. 3. Потенциальные кривые

По найденной в последнем приближении картине поля были построены графики изменения магнитной индукции в воздушном пространстве в непосредственной близости от поверхности ротора. По данным графикам обычным путем подсчитывались э.д.с., наводимые в проводниках обмотки якоря, и строились графики изменения напряжения на коллекторе машины (рис.3, кривая 4). Эти кривые дают возможность оценить полученную суммарную погрешность всего расчета на модели, так как напряжение между двумя соседними коллекторными щетками должно быть равно напряжению питающей сети (для двигателя типа ДК-207А $U = 550$ В). При расчете кривой 4 (рис.3) $U = 515$ В, т. е. погрешность составляет 6,4%.

Частичный контроль математической модели можно выполнить аналитическим расчетом исследуемого двигателя. Данные расчета по известному методу [6] согласуются с заводскими данными этого двигателя. При аналитическом расчете средняя индукция в воздушном зазоре под главным полюсом (для режима $I_{ш} = 1,9$ А и $I_a = 192$ А) получается равной

$$B_{\text{расч}} = 0,6 \text{ Тл},$$

а по результатам моделирования (для режима $I_{ш} = 1,9$ А и $I_a = 192$ А)

$$B_{\text{мод}} = 0,63 \text{ Тл}.$$

В среднем сечении главного полюса для тех же режимов

$$B_{\text{тррасч}} = 1,24 \text{ Тл},$$

$B_{\text{мод}} = 1,15 \text{ Тл.}$

Расхождение в этом случае объясняется тем, что на модели получены данные без учета потоков рассеяния с торцевых частей полюса.

По изложенной выше методике были выполнены расчеты на моделях для восьми наиболее характерных режимов работы двигателя. Расчетные данные приведены в табл.2, потенциальные кривые изображены на рис.3.

Таблица 2

Номера кривых на рис. 4	$i_{\text{ш}}, \text{ А}$	$I_{\text{а}}, \text{ А}$	Значение μ в шейке рога главного полюса	Номера кривых на рис. 4	$i_{\text{ш}}, \text{ А}$	$I_{\text{а}}, \text{ А}$	Значение μ в шейке рога главного полюса
1	0	192	200	5	2,0	384	4-6
2	0	384	6-8	6	3,2	0	170-200
3	2,0	0	1300	7	3,2	192	2
4	2,0	192	6-8	8	3,2	384	1,5

Анализ изображенных на рис.3 потенциальных кривых позволяет судить о влиянии величины нагрузки двигателя и ослабления поля на распределение потенциалов по коллектору, что в свою очередь дает возможность оценить вероятность возникновения опасных межсегментных напряжений. Результаты анализа потенциальных кривых (рис.3) и данных, приведенных в табл. 2, свидетельствует о следующем.

При ослабленном поле, когда двигатель имеет только последовательное возбуждение (кривые 1 и 2), с увеличением нагрузки происходит некоторое насыщение рога главного полюса с набегающей стороны поля и перераспределение потоков в менее насыщенные участки главного полюса, что вызывает качественное изменение распределения индукции по зазору машины. Сравнивая кривые 1 и 2, заметим, что при двухчасовом токе нагрузки потенциальная кривая более пологая, чем при часовом токе якоря. Этот эффект самовыравнивания поля при увеличении нагрузки в слабонасыщенной машине проявляется при наличии преобладающей последовательной обмотки возбуждения.

Если же машина находится в режиме работы с преобладающим параллельным возбуждением, то увеличение нагрузки приводит к большему искажению потенциальной кривой (рис. 3, кривые 4,5 и 7,8).

Наиболее опасным по характеру распределения потенциала оказался режим

максимального ослабления поля при часовом токе якоря (кривая 1) - в этом режиме межсегментные напряжения достигают 44 В.

Выводы: 1. Предлагаемый метод дает достаточно полную, наглядную и точную картину поля двигателя. Он позволяет легко исследовать влияние отдельных параметров электрической и магнитной цепей на топографию поля и рабочие характеристики двигателя.

2. Рассмотренная в статье модель позволяет с большой точностью определить потоки рассеяния в двигателе в любом режиме работы.

3. Общая методическая погрешность расчета на модели не превышает 5-7%.

4. К недостаткам метода следует отнести его громоздкость, связанную с моделированием участков магнитной цепи с насыщенной сталью. Вместо одной модели приходится производить несколько последовательных приближений до получения достаточной точности результатов. Практически, после расчета первого режима все остальные расчеты на модели требовали лишь двух приближений.

5. Метод достаточно универсален и может быть применен для исследования и расчета различных магнитных цепей в машинах и аппаратах, когда другие методы оказываются более громоздкими и, как правило, менее точными.

ЛИТЕРАТУРА

1. О.М. Белоцерковский. Численное моделирование в механике сплошных сред. – М.: Физматлит, 2008.- 282с.
2. И.П. Копылов. Математическое моделирование электрических машин. - М.: Высш. шк., 2001.-327с.
3. А.Г. Дарьин, А.В. Иванов-Смоленский. Расчет проводимостей зубцовых контуров методом конечных элементов. – Тр. ВНИИПТИЭМ.-1987. с.19-26.
4. А.И. Вольдек, В.В. Попов. Электрические машины. Введение в электромеханику. Машины постоянного тока и трансформаторы. Учебник для вузов. - СП: Питер, 2008.-320с.
5. Д.В. Элкснис. Магнитные системы крупных машин постоянного тока.- 05.09.01 - Харьков. 1994.
6. И.П. Копылов. Проектирование электрических машин. Изд. 3-е. - М.: Высш. шк., 2002.759с.

Analysis of the state of the magnetic circuit of the DC motor with an electric model

77-30569/284291

12, December 2011

author: Volchenskov V.I.

Bauman Moscow State Technical University

volchens@mail.ru

The method of using electrical simulation to analyze the magnetic field distribution in a DC motor. The main modes of operation of the engine, taking into account the saturation of individual sections of the magnetic circuit, which leads to a change in its output characteristics. The proposed method allows to solve the issues discussed both qualitatively and quantitatively. The simulation results are compared with experimental results.

1. O.M. Belotserkovskii, Numerical simulation in mechanics of continuous media, Moscow, Fizmatlit, 2008, 282 p.
2. I.P. Kopylov, Mathematical modelling of electrical machines, Moscow, Vyssh. shk., 2001, 327 p.
3. A.G. Dar'in, A.V. Ivanov-Smolenskii, Calculation of the conductance-teeth contours by the method of finite elements. - Works of VNIPTIEM, 1987, pp. 19-26.
4. A.I. Vol'dek, V.V. Popov, Electrical machines. Introduction to electrical engineering. Machines of a direct current and transformers, SPb., Piter, 2008, 320 p.
5. D.V. Elksnis, The magnetic system of large dc machines, Khar'kov, 1994.
6. I.P. Kopylov, Design of electric machines, Moscow, Vyssh. shk., 2002, 759 p.