

УДК 621.316.718

А.Е.Антонов, докт.техн.наук, И.С.Петухов, канд.техн.наук (Ин-т электродинамики НАН Украины, Киев)

Сравнительный анализ систем возбуждения электромеханических преобразователей

При помощи математического моделирования проведен сравнительный анализ систем возбуждения магнитного и электромагнитного типов для электротехнических преобразователей энергии. Определены условия равенства создаваемых магнитных потоков.

За допомогою математичного моделювання проведено порівняльний аналіз систем збудження магнітного та електромагнітного типів для електромеханічних перетворювачів енергії. Визначено умови рівності магнітних потоків, що створюються.

Введение. При оценке и сопоставлении характеристик электромеханических преобразователей различных типов периодически возникает вопрос сопоставления магнитного и электромагнитного принципов возбуждения магнитного потока электромеханических преобразователей (ЭМП). Во многих случаях такое сравнение проводится по возможности получения требуемого значения электромагнитного момента, который в заданных габаритах преобразователя при прочих равных условиях определяется величиной магнитного потока возбуждения. С появлением высококоэрцитивных постоянных магнитов на основе интерметаллических соединений редкоземельных металлов и постоянным снижением удельной стоимости их магнитной энергии, необходимость такого сравнительного анализа становится весьма актуальной. В настоящее время получили широкое распространение доступные по цене и возможности приобретения постоянные магниты типа NdFeB со значением коэрцитивной силы по индукции 800...950 кА/м при величине остаточной индукции до 1,3 Тл. Для сравнения возможностей магнита с характеристиками такого уровня и обмотки с током рассмотрим фрагмент магнитной системы, в разрез магнитопровода которой вставлен постоянный магнит, обладающий коэрцитивной силой H_c , поверх которого расположена обмотка с эквивалентной плотностью тока j . При этом будем полагать, что линейные размеры обмотки и магнита в направлении, совпадающем с направлением магнитного потока Φ , одинаковы (рис. 1).

Обозначив продольный размер магнита через

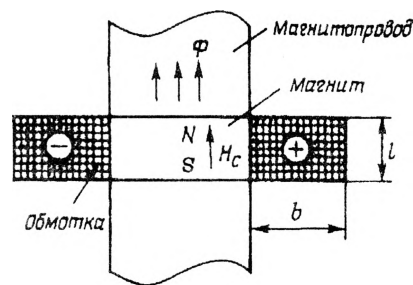


Рис. 1

l и толщину обмотки — b , запишем условие равенства создаваемых ими магнитодвижущих сил

$$H_c \cdot l = j \cdot b \cdot l, \tag{1}$$

откуда определим требуемую величину b , приняв значения коэрцитивной силы 800 А/мм (800 кА/м) и эквивалентной плотности тока 5 А/мм². В результате получим

$$b = 800 / 5 = 160 \text{ (мм)}.$$

Таким образом, при соблюдении условия равенства продольного размера магнита и обмотки l для создания обмоткой такой же величины МДС, которую создает магнит, требуется толщина намотки 160 мм. Причем эта величина не зависит ни от поперечного сечения магнитопровода, ни от требуемой величины магнитодвижущей силы при выбранных значениях H_c и j . Уже этот результат указывает на габаритные преимущества системы воз-

буждения магнитного типа, особенно при малых поперечных сечениях магнитопровода.

Моделирование систем возбуждения ЭМП с беспазовым статором. Для проведения сравнительного анализа рассмотрим два варианта структуры системы возбуждения магнитного потока ротора, наиболее часто применяемой нами для микромоторов с беспазовым статором. Такая структура предполагает наличие источника постоянного магнитного поля на роторе с диаметральной ориентацией результирующей оси потока, внутренний и внешний магнитопроводы (ярма). В первом случае поток возбуждения будем создавать постоянным магнитом, имеющем форму полого цилиндра с диаметральной ориентацией оси намагничивания (рис. 2, а), а во втором — обмоткой с током (рис. 2, б), которая занимает тот же объем, что и постоянный магнит (точками и "плюсами" показано направление тока в активных частях обмотки). Габаритные размеры и параметры магнитопроводящей арматуры в обоих случаях также принимаем идентичными.

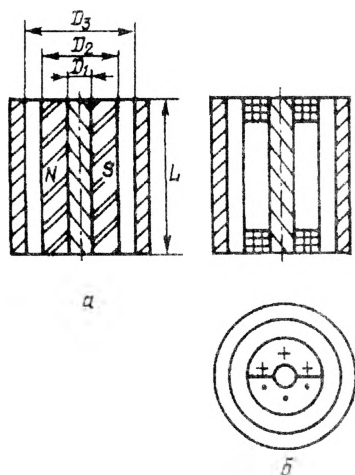


Рис. 2

Моделирование магнитного поля проведено для одного из типоразмеров магнита из композиции $NdFeB$, выпускаемого в настоящее время серийно, и имеющего следующие размеры и характеристики: $D_1 = 6$ мм; $D_2 = 14,6$ мм; $l = 40$ мм; $B_r = 1,2$ Тл; $H_c = 800$ кА/м. Внутренняя полость магнита или обмотки (область вала электрической машины) полагалась заполненной электротехнической сталью марки 2013. Величина воздушного зазора магнитной системы ($D_3 = 22$ мм) выбрана оптимальной с точки зрения достижения максимальной эффективности электромагнитной системы в соответствии с рекомендациями [1]. Для моделирования применялся пакет программ *GE2D* [2], в котором реализован метод конечных элементов, использующий треугольные элементы первого порядка. С помощью пакета *GE2D* производился расчет средних значений радиальных составляющих индукции в зазоре, поскольку величину момента вращения определяют именно эти составля-

ющие магнитного поля. При моделировании системы возбуждения с постоянным магнитом в расчетную модель введены указанные выше параметры высококоэрцитивного магнита, а также характеристика намагничивания электротехнической стали марки 2013. Отметим, что использование для всех ферромагнитных областей расчетной модели электротехнической стали с одними и теми же свойствами преследовало единственную цель — уменьшение числа факторов, которые могут влиять на результаты сравнительного анализа.

Картины магнитного поля в поперечном сечении рассматриваемых магнитных систем электро-механического преобразователя имеют вид, показанный на рис. 3 (а — для систем возбуждения с постоянным магнитом и б — для системы с обмоткой возбуждения). Хотя в модели учитывалась нелинейность характеристики намагничивания стали, сечение внешнего магнитопровода было подобрано таким образом, чтобы степень его насыщения не изменяла качественную картину распределения магнитного поля в воздушном зазоре. Из рис. 3 видно, что внутренний магнитопровод (область вала) в случае с постоянным магнитом нагружен магнитным потоком значительно слабее, чем в случае с обмоткой. Это объясняется диаметральной ориентацией оси легкого намагничивания постоянного магнита во всем его объеме, что обуславливает лишь частичное прохождение магнитного потока магнита через внутренний магнитопровод. Это также свидетельствует не в пользу применения обмотки возбуждения, поскольку во избежание насыщения внутреннего магнитопровода необходимо обеспечивать достаточное его сечение. Хотя следует отметить, что при реально достижимых электромагнитных нагрузках насыщение внутреннего магнитопровода возможно только в случае конструкции с полным валом.

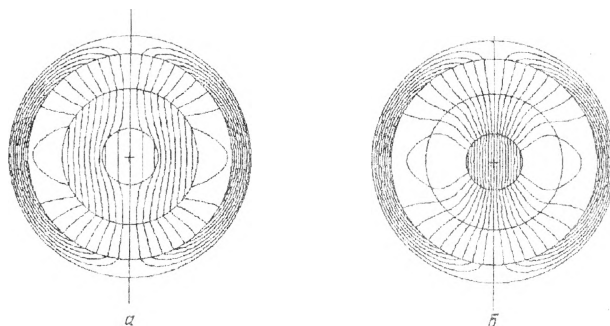


Рис. 3

На рис. 4 показаны графики распределения радиальных составляющих магнитной индукции вдоль средней линии воздушного зазора в системе с постоянным магнитом и с обмоткой возбуждения при значениях эквивалентной плотности тока 5, 20, 80, 160 А/мм². Графики зависимостей, показанные на рис. 3, позволяют сделать следующие выводы:

— законы распределения радиальных состав-

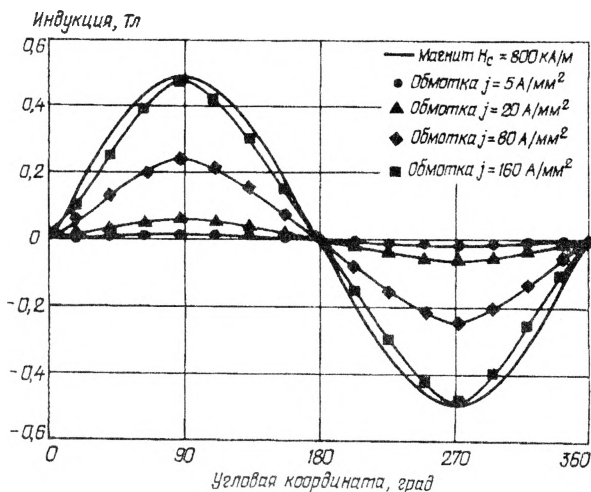


Рис. 4

ляющих индукции в системах с постоянным магнитом и с обмоткой идентичны;

— при рекомендуемой плотности тока в обмотке 5 А/мм^2 амплитудное значение индукции в сопоставимых точках составляет 4% от уровня индукции, создаваемой постоянным магнитом;

— совпадение амплитудных значений индукции наступает при плотности тока более 160 А/мм^2 .

Таким образом, при соблюдении условия допустимого нагрева обмотки ($j = 5 \text{ А/мм}^2$) величины магнитной индукции в системе возбуждения с постоянным магнитом оказались выше величин индукции, создаваемых обмоткой, в соответствующих точках в 25 раз. Однако необходимо учесть, что при равенстве габаритов рассматриваемых систем возбуждения длина активной части обмотки оказывается меньше активной длины магнита на величину суммарной длины лобовых частей (рис. 2), т.е. на величину $D_2 - D_1$. При этих условиях величина потока, создаваемого постоянным магнитом Φ_M , оказывается больше величины потока обмотки $\Phi_{об}$ в $25L/[L - (D_2 - D_1)]$ раза. Например, при осевой длине магнитной системы $L = 40 \text{ мм}$ в соответствии с принятыми величинами D_1 и D_2 активная длина обмотки возбуждения составит $31,4 \text{ мм}$, что меньше осевой длины магнита в 1,27 раза. Поэтому величина потока, создаваемого обмоткой, должна быть увеличена, по крайней мере, в $\Phi_M/\Phi_{об} = 31,8$ раза. Поднять величину потока возбуждения обмотки до уровня потока постоянного магнита невозможно путем простого увеличения плотности тока ввиду недопустимого перегрева обмотки. Эксперимент показал, что при увеличении плотности тока в обмотке до 20 А/мм^2 без дополнительного отвода тепла через 3...4 сек наступает разогрев обмотки, приводящий к обугливанию эмалевой изоляции провода типа ПЭТВ.

Чтобы определить условие равенства величин магнитных потоков, создаваемых обеими системами возбуждения, воспользуемся теоремами подобия магнитных систем [3], из которых следует, что для увеличения магнитного потока, создаваемого

электромагнитом при сохранении плотности тока и интенсивности теплоотдачи, линейные размеры обмотки должны быть увеличены в $(\Phi_M/\Phi_{об})^{1/4} = (31,8)^{1/4} = 2,37$ раза. По мере приближения длины магнита к величине его внешнего диаметра, что является оптимальным для микро-моторов с точки зрения достижения максимума развиваемого момента на единицу затрачиваемой электроэнергии, отношение магнитных потоков $\Phi_M/\Phi_{об}$, как показывают расчеты, увеличивается до значения порядка 60,8. Соответственно, кратность увеличения эквивалентных геометрических размеров обмотки n также будет возрастать. При выполнении условия $L = D_2$ и принятом диаметре магнитной системы кратность n составит $(\Phi_M/\Phi_{об})^{1/4} = (60,8)^{1/4} \approx 2,79$. Таким образом, геометрические размеры эквивалентной обмотки для оптимально построенной магнитной системы возбуждения ротора микро-мотора при внешнем диаметре магнита $14,6 \text{ мм}$ составят $D_1^{экр} = 16,8 \text{ мм}$; $D_2^{экр} = L^{экр} = 40,8 \text{ мм}$.

Сравнивая стоимость эквивалентных по величине потока возбуждения систем, приходим к следующим выводам: масса исходного постоянного магнита с размерами $L = D_2 = 14,6 \text{ мм}$ составляет $15,3 \text{ г}$. При удельной рыночной цене магнита типа N30H $0,5 \text{ грн/г}$ стоимость магнита составит $7,6 \text{ грн}$ с учетом НДС. Масса эквивалентной обмотки при сохранении величины магнитного потока составляет 192 г . При рыночной цене медного эмалевого провода 52 грн/кг стоимость эквивалентной обмотки составляет около 10 грн с учетом НДС. Стоимость магнитопроводящей арматуры, выполненной методом порошковой металлургии, в системе с эквивалентной обмоткой также выше, чем в системе с постоянным магнитом (с учетом стоимости материала и трудозатрат, соответственно, 3 и 5 грн).

Полученные в настоящем исследовании результаты могут быть обобщены благодаря упомянутым теоремам подобия магнитных систем. Учитывая, что картины поля в геометрически подобных системах с постоянными магнитами идентичны, а магнитный поток при кратности n возрастает в степени n^2 , то, принимая полученные в настоящем исследовании величины индукции за исходные, можно легко рассчитать поток для любого геометрически подобного магнита аналогичной конфигурации и определить геометрию эквивалентной электромагнитной системы возбуждения.

Выводы. Выигрыш от применения постоянных магнитов для создания системы возбуждения микро-мотора состоит не только в существенно меньших (в 2,79 раза) габаритах, но и в меньшей на 40% стоимости. Кроме того, исключаются затраты электроэнергии на создание потока возбуждения, снижается общее тепловыделение микро-мотора, повышается его надежность и долговеч-

ность. Это позволяет говорить о безусловном преимуществе системы возбуждения с постоянным магнитом над электромагнитной системой возбуждения.

1. Антонов А.Е., Киреев В.Г. К вопросу проектирования магнитных систем беспазовых магнитоэлектрических двига-

телей // Праці Інституту електродинаміки НАН України. Енергоефективність: Зб.наук.пр. — 2001. — С. 79—84.

2. Антонов А.Е., Петухов И.С. Идентификация магнитного поля ротора двухкоординатной электрической машины // Техн. електродинаміка. — 1999. — № 1. — С. 64—68.

3. Постоянные магниты. Справочник / Под ред. Ю.М.Пятиня. — М.: Энергия. 1980. — С. 108.

Надійшла 10.05.2007

УДК 621.316.718

К.П.Акиннин, канд.техн.наук (Ин-т электродинамики НАН Украины, Киев)

Расчет систем регулирования частоты вращения двигателей с импульсными первичными датчиками

Рассмотрены особенности построения импульсных систем автоматического регулирования частоты вращения двигателя. Разработаны рекомендации для настройки таких систем. Выполнены примеры расчета систем регулирования.

Розглянуто особливості побудови імпульсних систем автоматичного регулювання частоти обертання двигуна. Розроблено рекомендації для налагодження таких систем. Виконано приклади розрахунків систем регулювання.

Рассмотрим особенности построения систем автоматического регулирования (САР) частоты вращения электрического двигателя с импульсным первичным датчиком. Будем полагать, что минимальное количество импульсов датчика за один оборот вала двигателя равно шести. Это число соответствует шести интервалам повторяемости работы системы управления трехфазным инвертором, который приводит во вращение бесконтактный магнитоэлектрический двигатель с одной парой полюсов [1, 2].

Один из путей построения САР частоты вращения двигателя при преобразовании последовательности импульсов датчика в непрерывный сигнал может быть связан с использованием фильтров низкой частоты. Такие фильтры должны обеспечивать САР структурную и параметрическую устойчивость, приемлемое качество регулирования при допустимом уровне пульсаций отфильтрованного управляющего сигнала во всем диапазоне изменения частоты вращения. К числу таких фильтров, выполняющих функции корректирующих устройств, можно отнести, например, апериодическое звено первого порядка или интегрирующее звено (в дальнейшем А- и И- регуляторы).

Пусть задана частота вращения ротора ω , которой соответствует период следования импульсов

датчика

$$T_N = 2\pi / (N \cdot \omega), \quad (1)$$

где N — количество импульсов датчика за один оборот. Некоторый формирователь импульсов в момент переключения датчика обеспечивает формирование импульсов любой формы. Ограничимся рассмотрением импульсов прямоугольной формы, описываемой двумя параметрами — длительностью и амплитудой. Площадь такого импульса будем полагать неизменной во всем диапазоне изменения частоты вращения. В простейшем случае должны быть фиксированы и длительность, и амплитуда.

Для анализа особенностей рассматриваемых САР воспользуемся математической моделью, описывающей двигатель постоянного тока,

$$d\omega/dt = (M - M_C) / J, \quad dI/dt = (U - E - R \cdot I) / L, \quad (2)$$

где $E = k_E \cdot \omega$; $M = k_E \cdot I$; J — момент инерции, приведенный к валу двигателя; M , M_C — момент вращения двигателя и момент нагрузки соответственно; U — напряжение источника питания; E , I — ЭДС и ток двигателя; R , L — активное сопротивление и