

А.Е.Антонов, докт.техн.наук, **В.Г.Киреев**, канд.техн.наук (Институт электродинамики НАН Украины, Киев)

О ДВУХ ТИПАХ СИСТЕМ ВОЗБУЖДЕНИЯ БЕСПАЗОВЫХ МАГНИТОЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ДВИГАТЕЛЕЙ

Представлены результаты сравнительного анализа систем возбуждения коллекторного и традиционного типов для магнитоэлектрических преобразователей энергии с беспазовым статором. Анализ проведен при одинаковых габаритах магнитных систем и массах магнитотвердого материала. Исследование трехмерных полевых моделей систем показало, что хотя в воздушном зазоре коллекторных систем могут быть достигнуты более высокие значения индукции, это не всегда приводит к росту электромагнитного момента. Определены препятствующие этому факторы.

Наведено результати порівняльного аналізу систем збудження колекторного та традиційного типів для магнітоелектричних перетворювачів енергії з беспазовим статором. Аналіз проведено при однакових габаритах магнітних систем і масах магнітотвердого матеріалу. Дослідження тривимірних польових моделей показало, що хоч у повітряному зазорі колекторних систем можуть бути досягнуті більш високі значення індукції, це не завжди призводить до зростання електромагнітного моменту. Визначено фактори, які тому перешкоджають.

Введение. В 60-х годах прошлого столетия в специальных изданиях по электрическим машинам появились публикации о создании и испытании магнитных систем коллекторного типа [2]. Техническая сущность таких систем состоит в суммировании и концентрации магнитного потока нескольких постоянных магнитов ферромагнитным полюсным наконечником – концентратором, расположенным таким образом, чтобы направлять результирующий поток в требуемом направлении. Благодаря тому, что поперечное сечение концентратора выбирают меньшим, чем суммарное поперечное сечение магнитов, а магнитная проницаемость концентратора намного выше проницаемости магнитов, и достигается увеличение плотности магнитного потока. При уменьшении сечения концентратора плотность магнитного потока в нем будет возрастать до тех пор, пока не сравняется с индукцией насыщения материала концентратора, которая, как правило, превышает остаточную индукцию магнитов B_r . Необходимо заметить, что увеличение индукции на полюсной поверхности концентратора не приводит к увеличению магнитного потока, величина которого зависит только от свойств магнитотвердого материала и его объема. Магнитные системы коллекторного типа предлагалось использовать для возбуждения магнитного потока в электрических машинах магнитоэлектрического типа с пазовым статором, в которых воздушный зазор был минимизирован, и его величина составляла 0,05...0,2 мм. Такое ограничение было обусловлено относительно низким значением коэрцитивной силы существовавших тогда постоянных магнитов, рабочая точка которых при работе в составе систем с большими воздушными зазорами располагалась в нижней части кривой размагничивания [5]. С появлением высококоэрцитивных магнитов типа RCO_5 и $NdFeB$ интерес проектировщиков электрических машин к коллекторным магнитным системам возник снова [3,4]. Для оценки целесообразности применения коллекторных магнитных систем в электромеханических преобразователях магнитоэлектрического типа с беспазовым статором авторы провели исследование и сравнительный анализ систем коллекторного и традиционного типов в сочетании с токовой обмоткой, располагаемой в воздушном зазоре.

Методика исследования и параметры моделей. Сравнение двух типов магнитных систем проводилось по средней величине магнитной индукции в зазоре, по абсолютной и удельной величине развиваемого электромагнитного момента, а также по величине осевого момента инерции. Для этого были построены трехмерные модели магнитоэлектрических систем с радиальной ориентацией потоков возбуждения, в воздушные зазоры которых введены трехфазные обмотки с током. Использование трехмерных моделей при исследовании магнитоэлектрических систем с ограниченной осевой длиной дает более достоверные результаты, поскольку позволяет учесть потоки рассеяния в торцевых зонах, что принципиально не позволяют сделать двухмерные модели. В расчетные модели исследуемых сис-

тем были введены не величины магнитной проницаемости, а параметры реальной кривой намагничивания применяемой стали. Это необходимо для того, чтобы расчетные величины плотности магнитного потока в магнитопроводах были получены с учетом степени их насыщения.

В качестве базы для сравнения была принята модель коллекторной магнитной системы (рис. 1, а), а в качестве сравниваемых – два варианта магнитных систем традиционной компоновки:

№ 1 – система, у которой с базовым вариантом совпадают внешние габариты, полюсное деление, длина воздушного зазора и объем магнитного материала (рис. 1, б);

№ 2 – система, оптимизированная в соответствии с рекомендациями [1], у которой с базовым вариантом совпадают внешние габариты и объем магнитного материала (рис. 1, в).

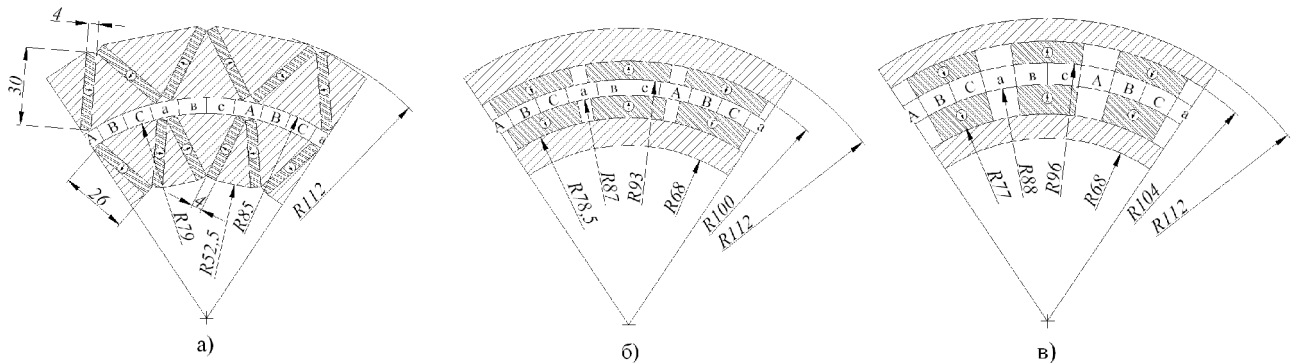


Рис. 1

Моделирование всех магнитоэлектрических систем было проведено при следующих условиях:

- внешний диаметр системы – 240 мм;
- число полюсов – 16;
- осяевая длина магнитных систем l_m варьировалась в пределах 10...200 мм;
- плотность тока, осредненная по объему, занимаемому активной частью обмотки, – 3 А/мм² (соответствует плотности тока в обмотке 8 А/мм² при коэффициенте заполнения $k=0,375$ с учетом технологического зазора между обмоткой и ротором);
- характеристики магнитного материала: $B_r = 1,256$ Тл; $\mu = 1,03\mu_0$;
- кривая намагничивания материала магнитопроводов соответствует характеристике электротехнической стали марки 1512.

Расчет величины магнитной индукции и электромагнитного момента, развиваемого при взаимодействии магнитной системы с обмоткой, был произведен с помощью пакета программ Femlab.

Результаты исследования. На рис. 2 представлены зависимости изменения средних значений индукции для всей области, занимаемой активными частями двух фаз обмотки, расположенными симметрично относительно полюсов магнитной системы, при изменении ее продольной длины:

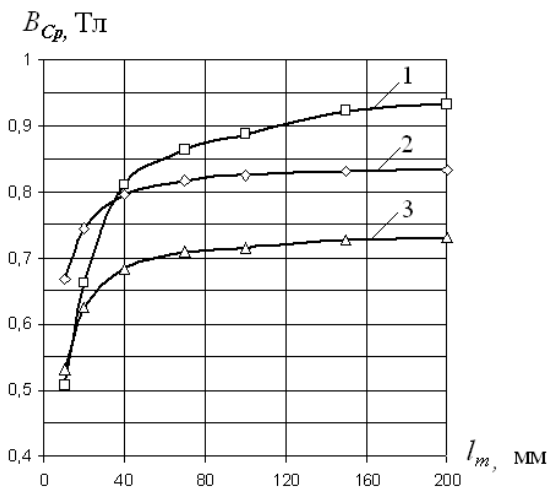


Рис. 2

1 – базовая коллекторная система; 2 – традиционная система № 1; 3 – оптимизированная традиционная система № 2.

На рис. 3 показаны зависимости изменения развиваемых электромагнитных моментов для тех же магнитных систем при величинах индукции в зазоре, соответствующих рис. 2.

Из приведенных зависимостей следует, что при равных объемах магнитных материалов с идентичными свойствами и при равных габаритах магнитная система коллекторного типа имеет преимущество перед традиционными магнитными системами по величине магнитной индукции в зазоре. Это преимущество начинает проявляться при отношении осяевой длины к внешнему диаметру магнитной системы $l_m/D_H > 0,15$ – для

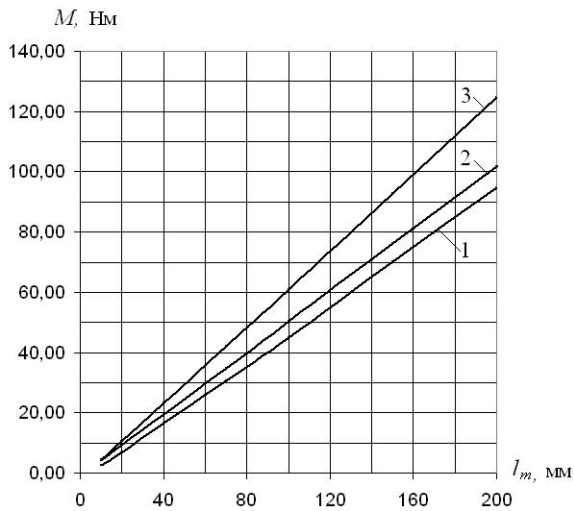


Рис. 3

магнитная система коллекторного типа проигрывает традиционным системам независимо от отношения l_m/D_H . Преимущество традиционных систем по величине момента связано с тем, что развиваемый электромагнитный момент зависит не только от величины индукции в зазоре, но также от объема зазора и его положения относительно оси вращения. При использовании традиционной компоновки системы с секторообразной формой магнитов воздушный зазор располагается ближе к периферии машины. В коллекторной же системе магниты и концентраторы располагаются под углом друг другу, занимают больший объем и автоматически перемещают воздушный зазор ближе к продольной оси симметрии. Поэтому и объем зазора, и плечо приложения электромагнитных сил в коллекторной системе принципиально меньше, чем в традиционной. Эти факторы в сочетании с выбранным оптимальным отношением длины магнита и зазора и обеспечили преимущество магнитной системы традиционной компоновки при меньшем значении индукции в зазоре. Следует заметить, что меньшее значение индукции в зазоре предполагает и меньшее сечение магнитопроводов (рис. 1, в), что положительно сказывается на массогабаритных и инерционных характеристиках двигателя.

Приведенные на рис. 2 и рис. 3 результаты были получены при одинаковой средней плотности тока в объеме зазора 3 А/мм^2 . Моделирование тех же магнитоэлектрических систем при варьировании плотности тока в пределах $1,5 \dots 10 \text{ А/мм}^2$ показало степень влияния поля, создаваемого обмоткой, на величину индукции в зазоре.

На рис. 4 показаны зависимости $B_{cp}(j)$ для коллекторной (1) и традиционной (2) систем при $l_m=100 \text{ мм}$. Степень этого влияния в системе коллекторного типа больше, что объясняется наличием магнитомягких концентраторов, расположенных по обе стороны зазора, которые создают благоприятные условия для проведения потока обмотки в направлении, встречном потоку магнитов.

Системы традиционного типа имеют также преимущества по величине развиваемого момента, отнесенного к объему активной части преобразователя M/V_a и по величине электромеханической постоянной времени, которая пропорциональна осевому моменту инерции ротора. Последнее обстоятельство существенно для снижения времени разгона ротора и повышения быстродействия двигателя при его использовании в составе следящих систем. Поскольку момент инерции линейно зависит от продольной длины ротора, в качестве сравниваемого параметра приведем удельную величину момента инерции сравниваемых систем ($\text{кг} \cdot \text{м}^2/\text{м}$). Полученные параметры сравниваемых магнитоэлектрических систем при длине активной части преобразователя 100 мм сведены в таблицу.

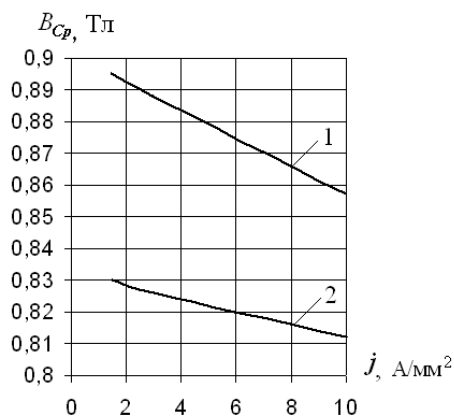


Рис. 4

неоптимизированной магнитной системы и при $l_m/D_H > 0,06$ для оптимизированной. Отставание величины индукции в коллекторной системе по отношению к традиционной при уменьшении отношения l_m/D_H связано с большей скоростью роста доли потоков рассеяния в ее торцевой зоне. Это обусловлено наличием магнитомягких концентраторов с большой площадью торцевых поверхностей, создающих благоприятные условия для проведения магнитных потоков между соседними концентраторами. Вообще же, тенденция увеличения индукции при росте отношения l_m/D_H характерна для всех исследуемых систем и связана она с уменьшением доли потока рассеяния в торцевых зонах по отношению к потоку в воздушном зазоре.

Однако по величине развиваемого момента

| Наименование магнитной системы | Средняя индукция, [Тл] | Коэффициент крутизны момента, [Нм/А] | Развиваемый удельный момент, [Нм/м ³] | Момент инерции единицы длины ротора, [кг·м] |
|--------------------------------|--------------------------|--|--|---|
| МС коллекторн. типа | 0,888 | 15,00 | 25·10 ³ | 1,65 |
| Неоптимизированная МС №1 | 0,826 | 16,82 | 33,64·10 ³ | 1,35 |
| Оптимизированная МС №2 | 0,716 | 20,29 | 40,58·10 ³ | 1,1 |

Выводы.

Магнитные системы коллекторного типа позволяют на 12...20 % повысить среднюю величину индукции в зазоре по сравнению с системами традиционного типа при равных объемах магнитного материала и равных внешних габаритах.

Преимущество системы коллекторного типа по величине индукции нивелируется, когда ее осевая длина становится намного меньше диаметра.

Ввиду конструктивных особенностей систем коллекторного типа объем зазора и плечо приложения электромагнитных сил в них оказались меньшими, чем в традиционных системах. Это обуславливает преимущество магнитных систем традиционной компоновки перед коллекторными по величине развиваемого момента, несмотря на меньшие значения индукции в зазоре.

Системы традиционного типа имеют преимущество перед коллекторными системами по величине развиваемого момента, отнесенного к объему активной части двигателя и величине электро-механической постоянной времени.

Таким образом, применение систем возбуждения коллекторного типа целесообразно лишь в случае отсутствия габаритных ограничений и ограничений момента инерции ротора, когда необходимо обеспечить повышенные значения индукции при увеличенном объеме зазора невзирая на массогабаритные, динамические и стоимостные показатели электромеханического преобразователя.

1. Антонов А.Е., Куреев В.Г. Построение оптимальных беспазовых магнитоэлектрических двигателей // Техн. электродинамика. – 2003. – №4. – С. 38–40.

2. Балагуров В.А., Галтеев Ф.Ф., Ларионов А.Н. Электрические машины с постоянными магнитами. – М.-Л.: Энергия, 1964. – С. 59–60.

3. Ледовский А.Н. Электрические машины с высококоэрцитивными постоянными магнитами. – М.: Энергоатомиздат. 1985. – С. 76–77.

4. Столов Л.И., Афанасьев А.Ю. Моментные двигатели постоянного тока. – М.: Энергоатомиздат. 1989. – 27 с.

5. Постоянные магниты: Справочник / Под ред. Ю.М.Пятина. – М.: Энергия, 1980. – 487 с.

Надійшла 16.03.2010