

В. В. Гребеников, М. В. Прыймак

## Исследование влияния конфигурации магнитной системы на моментные характеристики электродвигателей с постоянными магнитами

*Рассматриваются результаты расчета магнитного поля и моментов для трех моделей электродвигателей с постоянными магнитами. Показано, что конфигурация магнитной системы существенным образом влияет на моментные характеристики электродвигателя.*

### Введение

Развитие новых типов электрических машин с постоянными магнитами (ПМ) и электронной коммутацией тесно связано с достижениями в микро- и энергоэлектронике, информатике и материаловедении вместе с новыми знаниями о современных тенденциях развития машин. За последние годы электродвигатели с ПМ заняли прочное положение в производственных программах ведущих зарубежных электромашиностроительных компаний («Сименс», «Дженерал Электрик», «Фанук» и др.). В большинстве каталогов готовой продукции этих компаний электродвигатели с редкоземельными постоянными магнитами находятся на первом месте.

Это связано с созданием современных ПМ на основе соединения Nd-Fe-B, которые могут обеспечить высокие значения остаточной магнитной индукции (до  $B_r = 1,44$  Тл) и имеют температурную стабильность при температурах до  $150^\circ\text{C}$ . Современные редкоземельные ПМ способны обеспечить максимальную индукцию в воздушном зазоре без концентрации потока на уровне  $0,6\text{--}0,8$  Тл. Один из перспективных путей повышения отношения номинального момента к массе двигателя – это техническое решение на основе принципа концентрации магнитного поля, при котором индукция в воздушном зазоре может превышать остаточную индукцию ПМ [1].

С другой стороны, успехи в области силовой и микропроцессорной техники создали благоприятные условия для разработки и производства электромеханических преобразователей энергии нового поколения на базе электродвигателей с ПМ. Такие преимущества позволяют применять их в различных устройствах широкого диапазона единичной мощности, в том числе, в безредукторных электроприводах непосредственного действия (Direct Electric Drive) с повышенной надежностью. Электропривод на базе таких двигателей может не только успешно конкурировать с уже известными техническими решениями, но и найти новые области применения в качестве элементной базы мехатроники и робототехники, в транспортных системах, в устройствах сложной бытовой техники, в сервоприводах, приводах насосов и вентиляторов, в приводах электромобилей и морской техники [2–4].

Целью данной статьи является исследование влияния

конфигурации магнитной системы на моментные характеристики электродвигателей с постоянными магнитами.

### Основной результат

В качестве иллюстрации влияния конфигурации магнитной системы на моментные характеристики электродвигателей с ПМ приведем результаты моделирования трех моделей.

На рис. 1 приведены три модели электродвигателей с ПМ. При этом в **Модели 1** (рис. 1, а) статор по размерам идентичен со статором асинхронного двигателя 4А112МА8, имеющим внешний диаметр статора  $D_a = 191$  мм с числом пазов, равным 48, и внутренний диаметр –  $D_i = 132$  мм. Ротор в **Модели 1** выполнен в виде 8-ми полюсной магнитной системы с тангенциально расположенными высокоэнергетическими постоянными магнитами, намагниченными в направлении, перпендикулярном к плоскостям постоянных магнитов. Размер ПМ для этой модели –  $10^*48^*100$  мм. Величина минимального воздушного зазора равна  $\delta_0 = 1$  мм. В роторе магниты располагаются по радиусу и примыкают торцами к ферромагнитным концентраторам, выполненным из конструкционной стали СТ20. Для наилучшей концентрации магнитного потока ребра соседних магнитов у вала ротора должны соприкасаться. Такая конструкция особенно рациональна при использовании высококоэрцитивных магнитов на основе редкоземельных материалов типа NdFeB. Важной особенностью конструкции с тангенциальным намагничиванием является возможность получения с ее помощью рабочих индукций в зазоре  $B_\delta$ , иногда даже превышающих остаточную магнитную индукцию  $B_r$  постоянных магнитов. Это связано с тем, что, благодаря непрерывности линий магнитного поля поток, входящий в сектор через боковые торцы двух смежных магнитов, приблизительно равен потоку, выходящему из сектора через его границу, площадь которой может быть существенно меньше удвоенной площади бокового торца магнита. Однако, сложность изготовления такой конструкции ротора приводит к необходимости выполнить ротор с ПМ, ребра которого не соприкасаются у вала ротора, что приводит к некоторому недоиспользованию потенциала ротора.

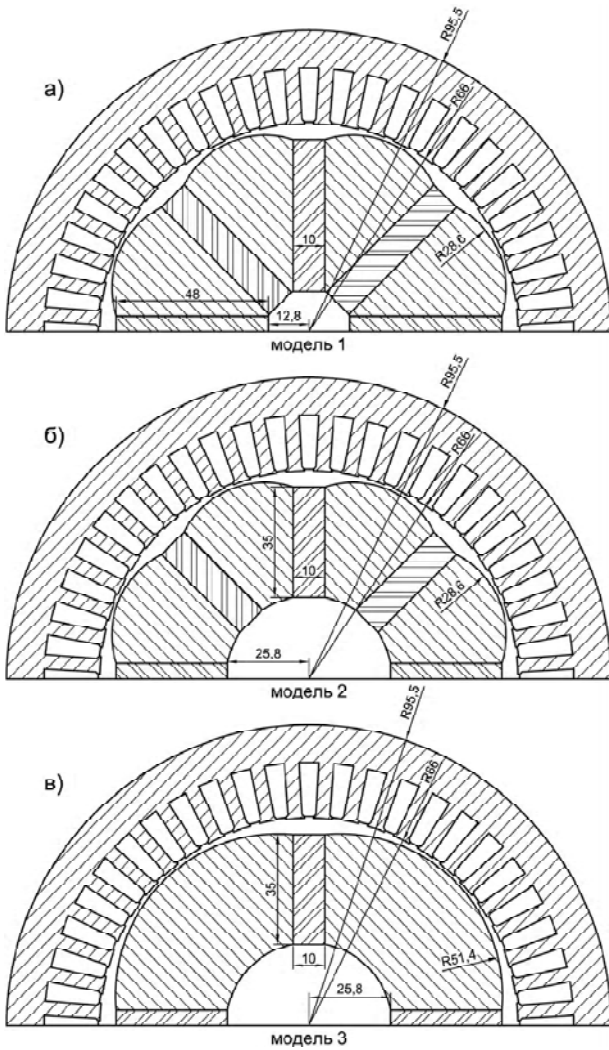


Рис. 1. Размеры магнитопроводов для трех моделей электродвигателей с ПМ

На рис. 1, б показана **Модель 2**, в которой статор имеет такой же внешний и внутренний диаметр, как в **Модели 1**. Ротор в **Модели 2** так же выполнен в виде 8-ми полюсной магнитной системы, однако, для упрощения технологии его изготовления содержит ПМ меньших размеров – 10\*35\*100 мм.

В настоящее время высокоэнергетические ПМ имеют достаточно высокую стоимость. Поэтому в **Модели 3** (рис 1, в) исследовалась конфигурация магнитной системы, в которой статор имеет такие же размеры, как в **Моделях 1** и **2**, а ротор выполнен в виде 4-х полюсной магнитной системы с четырьмя ПМ размерами – 10\*35\*100 мм.

Таким образом, в работе исследуются три модели электродвигателей с ПМ: **Модель 1** имеет конфигурацию статора, идентичную асинхронному двигателю 4А112МА8, в **Модели 2** ротор выполнен с ПМ меньших размеров для упрощения технологии изготовления ротора, а в **Модели 3** ротор выполнен 4-х полюсным для удешевления изготовления электродвигателя. Обмотка статора в **Модели 3** для обеспечения работоспособности двигателя должна наматываться соответствующим образом.

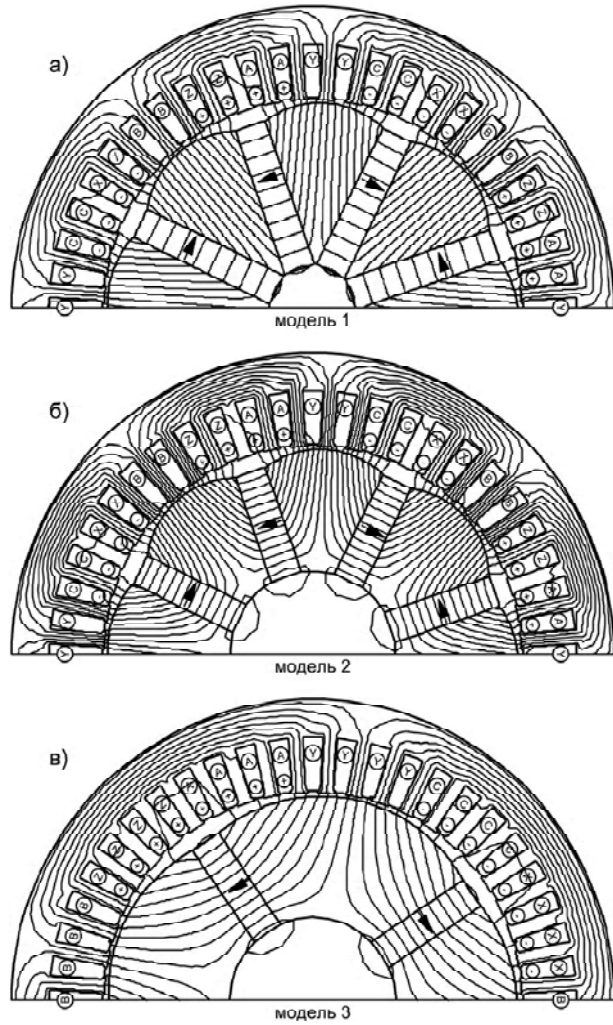


Рис. 2. Картина распределения магнитного поля в поперечном сечении активной части электродвигателей по оси d

На рис. 2 представлено распределение магнитного поля в поперечном сечении исследуемых моделей. Моделирование магнитостатики осуществлялось в программном комплексе ELCUT 5.6 при следующих исходных данных:

- магнитопровод статора – сталь СТ2211 (с учетом нелинейности кривой намагничивания стали);
- ферромагнитные концентраторы – конструкционная сталь СТ20 (с учетом нелинейности кривой намагничивания стали);
- ПМ на основе NdFeB – коэрцитивная сила магнита  $H_c = 1000 \text{ кА/м}$ , остаточная индукция  $Br = 1,32 \text{ Тл}$ , магнитная проницаемость магнитов принята равной  $\mu_{ПМ} = 1,03$  (направление магнитного поля ПМ показано стрелками);
- вал ротора выполнен из немагнитного материала с магнитной проницаемостью  $\mu_0 = 1$ ;
- обмотки статора включены следующим образом: А(+), В(0), С(-).

По результатам моделирования распределения магнитного поля для трех моделей электродвигателей с ПМ можно сказать следующее: средняя индукция в воздушном зазоре для **Модели 1** (рис. 2, а) со-

ставляет  $B_{1n} = 1,3$  Тл, для **Модели 2** –  $B_{2n} = 1,2$  Тл, для **Модели 3** –  $B_{3n} = 0,8$  Тл. Спинка статора для всех трех моделей не насыщается, так как величина воздушного зазора равна  $\delta_0 = 1$  мм, существенных потоков рассеивания не наблюдается. Для полноты картины потоков рассеивания магнитного поля лучше применять трехмерное моделирование, а не двухмерное. На рис. 2 для всех трех моделей показано распределение магнитного поля при ориентации ротора по оси  $d$ . В этом положении поле, создаваемое ПМ в полюсах ротора, направлено согласовано с полем, создаваемым включенными фазами статора. Для осуществления коммутации фаз двигателя оснащаются тремя бесконтактными датчиками положения (Холла либо оптоэлектрическими).

На рис. 3 приведены зависимости крутящего момента от положения ротора  $M = f(\theta)$  для трех моделей электродвигателей с ПМ при включении фаз статора следующим образом: А(+), В(0), С(-). Расчеты выполнены для плотности тока в обмотках  $j = 2,5$  А/мм<sup>2</sup>. С учетом того, что коэффициент заполнения паза принят равным  $k_z = 0,5$ , то плотности тока  $j = 2,5$  А/мм<sup>2</sup> будет соответствовать реальная плотность тока в обмотках статора, равная  $j_r = 5,0$  А/мм<sup>2</sup>.

Зависимость крутящего момента от положения ротора для исследуемых моделей вычислялась в диапазоне от оси  $d$  (поле соответствующих полюсов ротора направлено согласно с полем, создаваемым включенными фазами статора) до оси  $q$  (поле соответствующих полюсов ротора направлено встречно к полю, создаваемому включенными фазами статора). Для **Моделей 1 и 2** этот диапазон равен 45°, а для **Модели 3** – 90°. Коммутация фаз двигателя должна осуществляться от трех бесконтактных датчиков. Через каждые 15° для **Моделей 1 и 2** и через каждые 30° для **Модели 3** происходит изменение состояния датчиков и выдается команда на включение соответствующих фаз двигателя. Алгоритм переключения фаз следующий: А(+), В(0), С(-); А(+), В(-), С(0); А(0), В(-), С(+); А(-), В(0), С(+). и т. д. Таким образом, в пределах зоны коммутации включаются только две фазы в соответствии с заданным алгоритмом. На рис. 3 **зона коммутации 1**, равная 15°, соответствует 8-ми полюсным моделям, а **зона коммутации 2**, равная 45°, соответствует 4-х полюсной **Модели 3**.

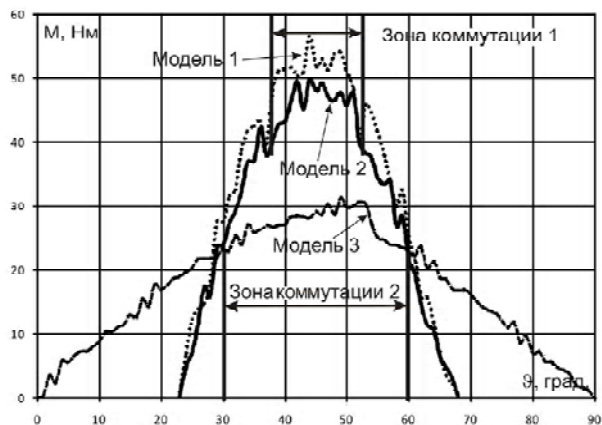


Рис. 3. Статические моментные характеристики для **Моделей 1, 2, 3**

Анализируя зависимость крутящего момента от положения ротора исследуемых моделей, следует отметить, что в зоне коммутации средний момент для **Модели 1** равен  $M_{1cp} = 52$  Нм, для **Модели 2** –  $M_{2cp} = 46$  Нм и, соответственно, для **Модели 3** –  $M_{3cp} = 25$  Нм. Масса магнитов для **Модели 1** равна  $m_1 = 2,88$  кг, для **Модели 2** –  $m_2 = 2,1$  кг и для **Модели 3** –  $m_3 = 1,05$  кг. Сравнимая **Модели 1 и 2**, с восемью ПМ в роторе отметим, что увеличение массы магнитов для **Модели 1** в 1,37 раза по сравнению с **Моделью 2** позволило увеличить значение среднего момента лишь в 1,1 раза. Кроме того, технология изготовления ротора **Модели 1** существенно сложнее, чем у **Модели 2**, так как необходимо выполнить соприкасающимися ребра магнитов у вала ротора. У **Модели 3** с четырьмя магнитами на роторе средний момент в пределах зоны коммутации примерно вдвое меньше по сравнению с **Моделью 1 и Моделью 2**.

Таким образом, приведенные результаты расчетов магнитного поля и моментов для трех моделей электродвигателей с ПМ свидетельствуют о том, что наиболее приемлемой является конфигурация магнитной системы у **Модели 2** с точки зрения стоимости ПМ, технологичности изготовления ротора и отношения массы электродвигателя к развиваемому моменту.

Электродвигатели с пазовым (или зубцово-пазовым) статором характеризуются большой величиной электромагнитного момента по сравнению с электрическими машинами, имеющими гладкий беспазовый статор. Однако их недостатком являются зубцово-пазовые пульсации, вызванные различными магнитными сопротивлениями областей пространства, расположенных вблизи зубцов и пазов. Эти пульсации генерируют набор высших гармонических составляющих, приводящих, в конечном итоге, к возникновению вибраций и шумов, отрицательно влияющих на долговечность подшипниковых узлов, а значит, и надежность электродвигателя в целом.

С целью ограничения зубцовых пульсаций применяют различные способы. Один из них – это выполнение скосов на роторе [5]. Такой способ является весьма эффективным, однако технология изготовления ротора усложняется. Кроме того, поскольку величина индукции в рабочем зазоре при использовании концентрации магнитного поля может быть даже выше остаточной индукции ПМ, то с целью уменьшения пульсаций приходится увеличивать величину рабочего зазора, а значит, уменьшать величину развиваемого момента. Другим способом, позволяющим уменьшить величину пульсации электромагнитного момента, является профилирование ферромагнитных полюсов по заданному определенному закону или придание специальной формы полюсов на роторе.

В качестве иллюстрации на рис. 4 приведены результаты расчета зависимости момента от угла поворота ротора в пределах зоны коммутации, равной 15°, при различных формах ферромагнитных концентраторов в роторе. В **Модели 2** (размеры этой модели приведены на рис. 1) магниты «утоплены» в сторону вала электродвигателя на величину, равную 4 мм, от внешнего диаметра ротора и выполнено скругление ферромагнитных полюсов по дуге, две крайние точки

которой находятся на верхних гранях соседних магнитов, а средняя точка дуги находится на расстоянии, равном 1 мм от внутренней расточки статора. В **Модели 2-1** магниты не «утоплены» и верхняя грань магнитов совпадает с внешним диаметром ротора, а в **Модели 2-2** магниты «утоплены» на величину, равную 8 мм от внешнего диаметра ротора и также выполнено соответствующее скругление по дуге, крайние точки которых находятся на верхних гранях магнитов.

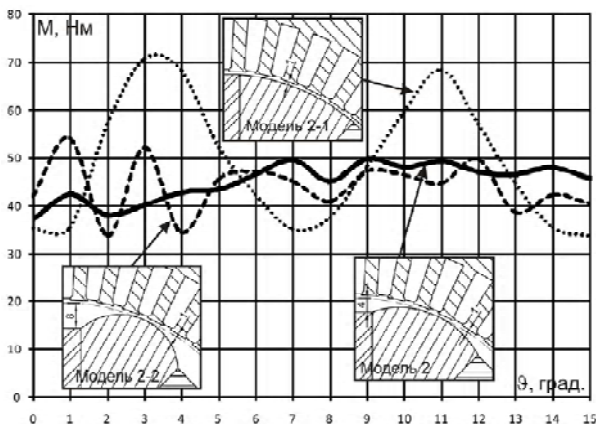


Рис. 4. Статические моментные характеристики Моделей 2, 2-1, 2-2

Анализируя результаты, представленные на рис. 4, следует отметить, что форма ферромагнитных полюсов на роторе существенным образом влияет на величину пульсаций электромагнитного момента. Если выполнять ферромагнитные концентраторы на роторе без соответствующего профилирования, то наблюдаются существенные пульсации электромагнитного момента. На рис. 4 для **Модели 2-1** максимальное значение момента составляет  $M_{\max 2-1} = 72$  Нм и, соответственно, минимальное —  $M_{\min 2-1} = 35$  Нм и, таким образом, разница между максимальным и минимальным значением момента составляет — 37 Нм. Для **Модели 2-2** эта разница между максимальным и минимальным значением момента составляет — 19 Нм, а для **Модели 2** — эта разница минимальна и соответственно составляет примерно 11 Нм. Очевидно, что профилирование ферромагнитных полюсов по более сложному закону позволит еще уменьшить пульсации электромагнитного момента, однако при этом усложнится и технология изготовления ротора.

Таким образом, применение численных методов и соответствующих программных комплексов позволяет выполнять расчет электромагнитного поля и моментов с учетом магнитных свойств материалов и па-

раметров модели. При этом для достижения поставленной цели, например, максимум момента в заданном объеме и минимума пульсаций электромагнитного момента, необходимо производить серию оптимизационных расчетов. Современные программные комплексы, например, ELCUT 5.6 или COMSOL 3.5 (FEMLAB) позволяют автоматизировать этот процесс и дают возможность получить оптимальную конфигурацию магнитной системы за приемлемое время.

### Выводы

1. На стадии предварительного проектирования электродвигателей с ПМ важен и должен учитываться анализ происходящих в нем процессов, особенно характер распределения продольной компоненты магнитной индукции в зазоре вдоль полюсного деления.
2. Конфигурация магнитной системы, состоящей из ПМ и ферромагнитных концентраторов, существенным образом влияет на моментные характеристики электродвигателей.
3. Профилирование ферромагнитных полюсов по заданному определенному закону позволяет уменьшить величину пульсаций электромагнитного момента.

### Перечень ссылок

1. Афонин А. А. Способ повышения магнитной индукции в зазоре электромеханических преобразователей энергии с постоянными магнитами / Афонин А. А. // Доповіді НАН України. — 2007. — № 6. — С. 76–80.
2. Гребеников В. В. Магнитные системы управляемых электрических машин с постоянными магнитами / Гребеников В. В. // Техн. электродинамика. Тем. выпуск : Проблеми сучасної електротехніки. — 2006. - Ч. 2. — С. 57–60.
3. Афонин А. А. Электромеханические преобразователи энергии нового типа / Афонин А. А., Гребеников В. В. // Пр. ін-ту електродинаміки НАН України : Зб. наук. пр. — К. : ІЕД НАНУ, 2007. - № 2 (116). — Ч. 1. — С. 91–96.
4. Афонин А. А. Инновационные технологии электрических машин с постоянными магнитами и двухсторонним возбуждением магнитного поля / Афонин А. А., Гребеников В. В. // Доповіді НАН України. — 2008. — № 6. С. 87–93.
5. Гребеников В. В. Моделирование магнитных полей в электромеханических преобразователях энергии с постоянными магнитами / Гребеников В. В., Прымак М. В. // Вісник кременчуцького державного політехнічного університету імені Михайла Остроградського. — 2009. — № 3 (56). — Ч 2. — С. 70–73.

Поступила в редакцию 11.05.09 г.

*Розглядаються результати розрахунку магнітного поля і моментів для трьох моделей електродвигунів з постійними магнітами. Показано, що конфігурація магнітної системи істотно впливає на моментні характеристики електродвигуна.*

*The results of the calculation of the magnetic field and the moments for the three models of electric motors with permanent magnets are considered. It is presented that the magnetic system configuration significantly affects the torque characteristics of electric motor.*