

КОНСТРУКЦИЯ КОМПЕНСАЦИОННОЙ ОБМОТКИ УНИПОЛЯРНОЙ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ МАШИНЫ

В.Я. Геча, А.Б. Захаренко, А.К. Надкин
(ОАО «Корпорация «ВНИИЭМ»)

Проведён анализ ряда конструкций компенсационных и якорных обмоток униполярных электрических машин методом конечных элементов. Предложена конструкция этих обмоток, в которой достигается полная компенсация реакции якоря.
Ключевые слова: униполярная электрическая машина, моделирование, компенсационная обмотка, обмотка якоря.

Введение

Для привода направленной антенно-фидерной системы рассматривается возможность применения униполярной электрической машины (УЭМ). Её преимуществами перед биполярными машинами постоянного тока являются отсутствие коллектора из медных пластин, высокое использование активных материалов одновременно как токопроводов, так и магнитопроводов, меньший относительный вес при низких напряжениях, большой КПД из-за отсутствия потерь в стали на гистерезис и вихревые токи, простота конструкции вследствие малого количества деталей, высокая термостойкость и долговечность, меньшая стоимость машины и простота обслуживания.

Реакция якоря в униполярных электрических машинах является одним из основных вопросов теории и расчёта этих машин, поскольку большие значения тока якоря и его поле существенно влияют на работу УЭМ [1]. Относительное значение МДС якоря в УЭМ значительно выше, чем в биполярных машинах постоянного тока. Характер реакции якоря зависит от типа токосъёма. В рассматриваемых примерах реакция якоря имеет только поперечную составляющую.

Если рабочая точка машины лежит на прямолинейных участках кривой намагничивания, т. е. когда магнитная система машины не насыщена результирующим магнитным полем или сильно насыщена, то искажение основного поля в стали не приводит к снижению наводимой ЭДС [2]. Но так как обычно рабочая точка машины лежит на нелинейном участке кривой намагничивания (на «колене»), т. е. магнитная цепь имеет «среднее» насыщение, то происходит насыщение индуктора (рис. 1) и снижение полного потока и соответствующее уменьшение ЭДС. Для сохранения величины ЭДС увеличивают МДС обмотки возбуждения. Таким образом, дополнительный ток возбуждения компенсирует размагничивающее влияние поперечной реакции якоря.

Насыщение магнитной цепи снижает возможность регулирования напряжения УЭМ. При необходимости широкого регулирования необходимо:

- либо уменьшить поток реакции якоря путём увеличения магнитного сопротивления на его пути;
- либо скомпенсировать реакцию якоря с помощью специальной обмотки, имеющей направление тока, противоположное направлению тока в якоре.

Целью данной работы является разработка конструкции компенсационной обмотки, позволяющей полностью скомпенсировать реакцию якоря.

Моделирование

Для моделирования магнитных полей УЭМ с целью выбора оптимального сочетания конструкций якорной и компенсационной обмоток использовалось программное обеспечение FEMM [3]. Были решены двумерные модельные задачи с внешними граничными условиями Дирихле и количеством конечных элементов около 300 тысяч. Во всех рассмотренных случаях ток якоря равен по значению, но противоположен по направлению току компенсационной обмотки, плотность тока составляет $5 \div 7 \text{ А/мм}^2$. На рис. 1 представлено поперечное сечение и распределение магнитной индукции при нескомпенсированной реакции якоря

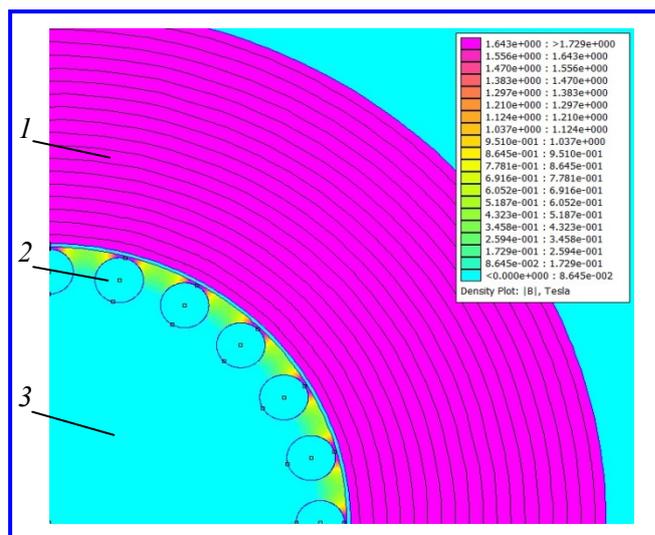


Рис. 1. Распределение магнитной индукции реакции якоря без компенсации: 1 – индуктор; 2 – обмотка якоря; 3 – якорь

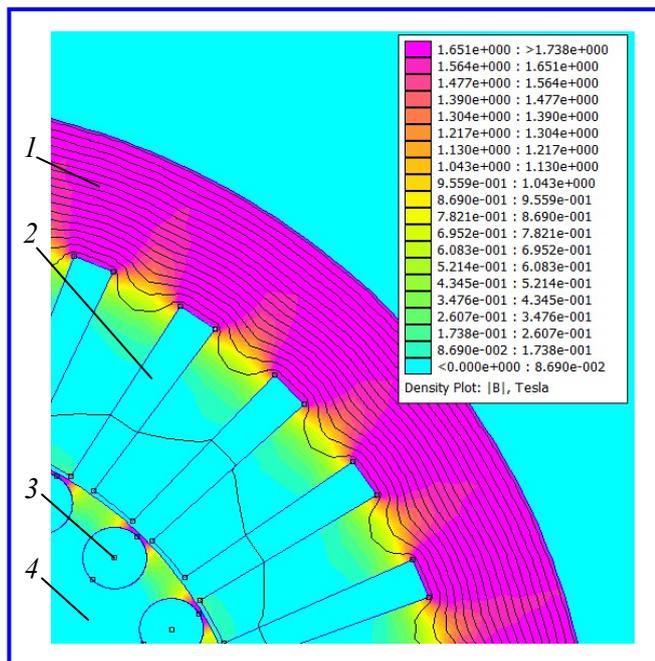


Рис. 2. Распределение магнитной индукции в конструкции с немагнитными пазми индуктора:
 1 – индуктор; 2 – немагнитный паз;
 3 – обмотка якоря; 4 – сердечник якоря

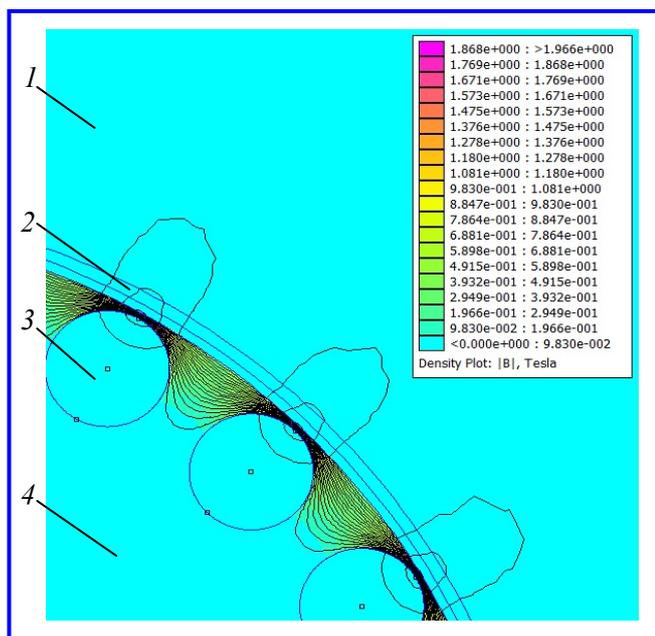


Рис. 3. Распределение магнитной индукции при наличии стержневой обмотки якоря и компенсационной обмотки в виде цилиндра:
 1 – индуктор;
 2 – компенсационная обмотка; 3 – обмотка якоря; 4 – якорь

УЭМ, конструкция обмотки якоря – стержневая. Среднее значение магнитной индукции в индукторе (статоре) от поля МДС якоря (ротора) составляет 1,7 Тл, что не позволяет обеспечить прохождение через индуктор заметного потока возбуждения.

Немагнитные вставки

Увеличение магнитного сопротивления в поперечной цепи достигается введением на пути потока якоря немагнитных участков, располагаемых радиально в плоскостях, проходящих через ось вращения УЭМ. Участки могут быть заполнены немагнитным материалом, либо представлять собой незаполненные пазы (рис. 2). Правильной является конструкция с внутренними пазами, так как поле якоря близ наружной поверхности статора слабее, чем около внутренней. Однако данным методом невозможно добиться полной компенсации – магнитный поток, вызываемый МДС якоря, смещается в область над немагнитными пазами и намагничивает сталь ярма индуктора, создавая тем самым сопротивление потоку возбуждения.

На рис. 2 показано распределение магнитной индукции в конструкции с немагнитными пазами индуктора, созданными для увеличения магнитного сопротивления для потока реакции якоря, полученное в результате решения аналогичной модельной задачи. Из рис. 2 видно, что ярмо индуктора насыщается индукцией 1,6 Тл, что также, как и в случае, показанном на рис. 1, не позволяет получить приемлемые характеристики УЭМ.

Компенсация реакции якоря

От сочетания конструкций компенсационных обмоток и обмоток якоря во многом зависит степень компенсации реакции якоря.

Использование стержневой обмотки якоря в сочетании с цилиндрической компенсационной обмоткой приводит к значительному намагничиванию стали ($B = 1,9$ Тл) на кольцевом участке вблизи воздушного зазора (рис. 3).

Полностью скомпенсировать поле якоря можно лишь в том случае, когда пространственное распределение токов в компенсационной и якорной обмотках будут зеркальными отображениями. Компенсационная обмотка может представлять собой полый цилиндр, выполненный из ферромагнитного или немагнитного материала, например, меди и расположенный коаксиально с ротором УЭМ. Применение обмоток в виде медных цилиндров представляет собой одно из лучших решений для компенсации реакции якоря [4]. Однако такие обмотки имеют иной коэффициент теплового расширения по сравнению со стальным индуктором, поэтому надёжно закрепить их достаточно сложно, с учётом того, что электромагнитная сила, развиваемая в УЭМ и действующая на обмотки, весьма существенна.

Более предпочтительным является вариант с якорной

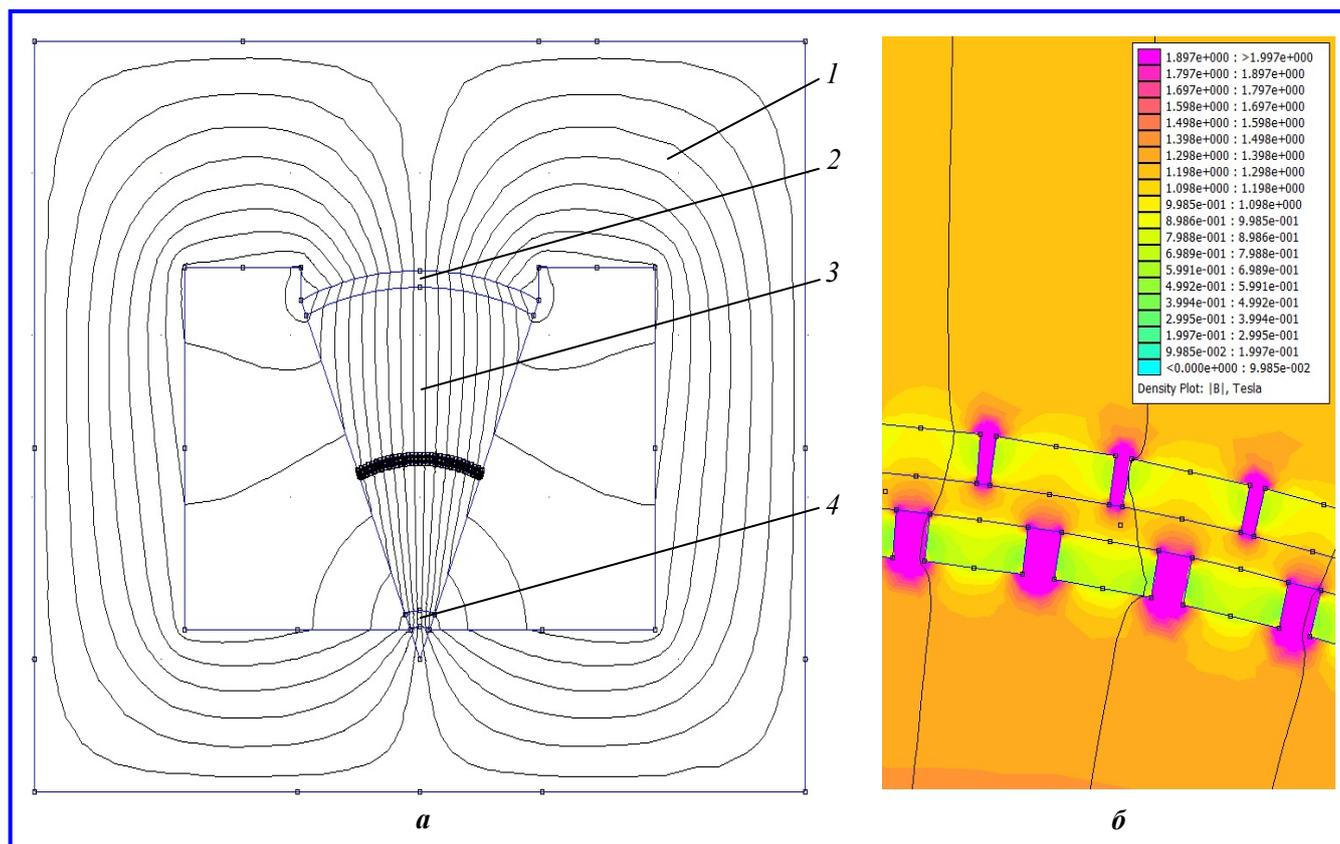


Рис. 4. Расчётная модель (а) и распределение магнитной индукции в области воздушного зазора при взаимодействии поля возбуждения с полем реакции якоря при сегментарной якорной и компенсационной обмотках (б): 1 – вспомогательный магнитопровод; 2 – постоянный магнит; 3 – часть сердечника индуктора; 4 – часть сердечника якоря

и компенсационной обмоткой в виде сегментов (рис. 4).

Для моделирования взаимодействия поля возбуждения с полем якоря была создана модель, представляющая собой вырезанный сектор исходной модели. Поле обмотки возбуждения моделируется в задаче постоянными магнитами в верхней и нижней частях модели, намагниченных в одном радиальном направлении. Коэрцитивная сила и толщина магнитов подбирались такой, чтобы в зазоре была обеспечена индукция 1,4 Тл, соответствующая реальному значению и являющаяся распространённой для машин данного типа [1]. Для замыкания униполярного магнитного потока в модели добавлен вспомогательный магнитопровод. При скомпенсированной реакции якоря индукция поля возбуждения снижается на 0,14 Тл, что допустимо.

В предложенной конструкции поле реакции якоря сосредоточено между обмоткой якоря и компенсационной и не насыщает дополнительно магнитную систему УЭМ. Кроме того, электро-

магнитная сила, развиваемая в УЭМ, действует на зубцы якоря и индуктора, как в обычной электрической машине. Таким образом, наилучшие результаты по компенсации реакции якоря при наиболее технологичном закреплении обмоток достигнуты при использовании обмоток в виде сегментов.

Выводы

1. Для обоснованного выбора наилучшей конструкции компенсационной и якорной обмоток УЭМ методом конечных элементов решены модельные задачи.

2. Наиболее оптимальным является вариант выполнения якорной и компенсационной обмоток в виде множества проводящих сегментов, расположенных сверху и снизу от воздушного зазора.

Литература

1. Бертинов А. И., Алиевский Б. Л. Униполярные электрические машины с жидкометаллическим токосъёмом / А. И. Бертинов, Б. Л. Алиевский. – М. – Л. : Энергия, 1966.
2. Электрические униполярные машины / Л. А. Суханов,

Р. Х. Сафиуллина, Ю. А. Бобков. – М. : ВНИИЭМ, 1964.

3. Буль О. Б. Методы расчёта магнитных систем электрических аппаратов. Магнитные цепи, поля и программа FEMM / О. Б. Буль. – М. : Издательский центр «Академия», 2005.

4. Заявка на соискание полезной модели РФ № 2014110526
Конструкция обмотки якоря и компенсационной обмотки униполярной электрической машины / В. Я. Геча, А. Б. Захаренко, А. К. Надкин.

Поступила в редакцию 01.04.2014

Владимир Яковлевич Геча, д-р техн. наук, зам. генерального директора,
e-mail: volikgecha@gmail.com, т. (495) 365-26-69.

Андрей Борисович Захаренко, д-р техн. наук, начальник отдела, т. (495) 366-26 44.

Александр Каренович Надкин, мл. научн. сотрудник, т. (495) 366-54-24.