

Л.А. Васильев, Ю.В. Мнускин, А.Е. Боев

МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ВЕНТИЛЬНОГО РЕАКТИВНОГО ДВИГАТЕЛЯ НА ОСНОВЕ МАГНИТНОЙ СХЕМЫ ЗАМЕЩЕНИЯ

Приведен сравнительный анализ результатов расчета статических характеристик вентильного реактивного двигателя с помощью синтезированной магнитной схемы замещения и метода конечных элементов. Рассмотрено влияние одновременной коммутации на распределение магнитного поля и статические характеристики.

Анализ магнитного поля вентильных реактивных двигателей (ВРД) является отправной точкой для решения задач проектирования и обоснованного выбора электромагнитных нагрузок этих электрических машин. На этом этапе необходимо учитывать не только особенности конструкции электромеханического преобразователя (ЭМП), обусловленные зубчатой структурой сердечников статора и ротора, общее и локальное насыщение магнитной системы, но и дискретно-пульсирующий характер магнитного поля ВРД, взаимное влияние фаз при различных алгоритмах коммутации. Комплексное решение этих задач требует использования эффективных вычислительных методов в отношении точности результатов электромагнитных расчетов и затрат машинного времени.

Для исследования процессов электромеханического преобразования энергии в ВРД широко применяются математические модели, основанные на результатах полевого анализа. Параметры магнитной системы представляются в виде поверхностей потокосцепления $\Psi(i, \theta)$ и электромагнитного момента $M(i, \theta)$ в функции двух переменных: тока возбужденной фазы i и пространственной координаты ротора θ [1, 2]. Таким образом, фазы ЭМП рассматриваются как изолированные друг от друга в магнитном отношении. Это допущение оправдано, когда ВРД работает в режиме одиночной коммутации и интервалы возбуждения фаз не перекрываются. Вместе с тем, как показано в [3], одновременная коммутация позволяет в ряде случаев существенно улучшить выходные характеристики. Энергия, запасенная в магнитном поле отключаемой фазы, используется для форсированного включения следующей фазы двигателя. На отдельных временных интервалах наблюдается протекание токов одновременно в нескольких фазах ЭМП, изменяется распределение потоков на участках магнитной системы, что не может быть учтено в рамках указанного выше подхода.

Упрощающие допущения о характере распределения результирующего магнитного поля преодолеваются с помощью численного решения полевой задачи на каждой итерации для мгновенных значений фазных токов и угловых положений ротора [4]. В настоящее время применение данного подхода сдерживается большим объемом вычислений. В этом отношении математические модели на основе магнитных схем замещения (МСЗ), оперируя значительно меньшим числом элементов, позволяют сочетать высокое быстродействие и необходимую точность [5, 6].

Основной этап формирования эквивалентной схемы замещения состоит в определении ее параметров. Активную зону ВРД можно разделить на три основные части: участки магнитопроводов статора и ротора, пазовые области и воздушный зазор. Электромеханическое преобразование энергии осуществляется главным образом в воздушном зазоре, где сконцентрирована значительная часть энергии магнитного поля.

Для расчета проводимостей воздушных промежутков применяются подходы, основанные на аппроксимации силовых линий магнитного поля простыми геометрическими фигурами [7, 8]. В [9] на примере асинхронной машины область воздушного зазора представляется в виде разветвленной схемы замещения, топология которой изменяется при вращении ротора. Однако комплексный учет особенностей конструкции ЭМП возможен на основе численного решения уравнений Лапласа и Пуассона для немагнитных участков.

На рис. 1 показан фрагмент синтезированной схемы замещения магнитной системы ВРД 8/6 (8 полюсов статора, 6 полюсов ротора). Обмотки фаз ВРД представлены источниками магнитодвижущей силы (МДС), участки магнитопроводов – нелинейными магнитными сопротивлениями. При этом полагается, что в зубцах статора и ротора отсутствует тангенциальная составляющая потока, а в ярмах – радиальная. Поле пазового рассеяния статора в схеме замещения эквивалентруется сосредоточенными магнитными сопротивлениями между смежными полюсами $R_{\sigma z}$ и сопротивлениями для потока, замыкающегося через дно паза $R_{\sigma a}$.

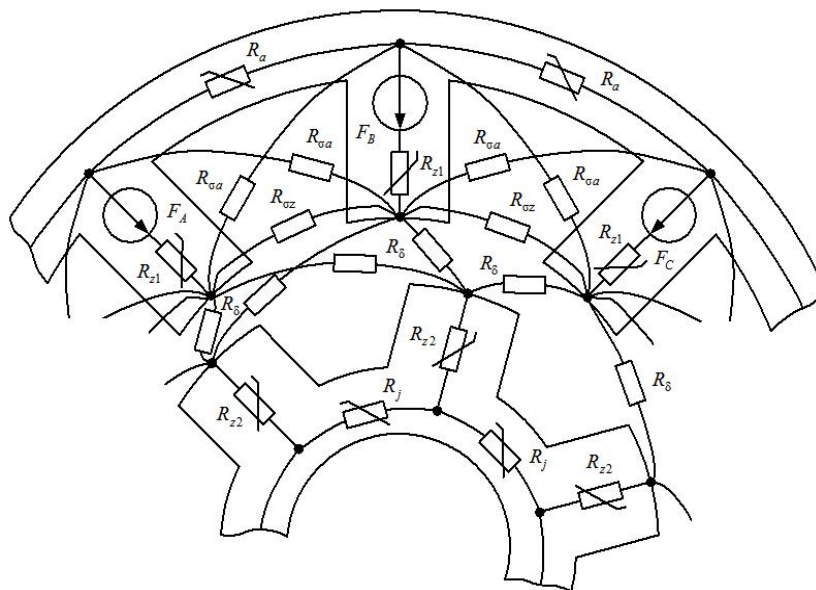


Рисунок 1 – Фрагмент схемы замещения магнитной системы ВРД:

F_A, F_B, F_C – МДС обмоток статора; R_{z1}, R_{z2} – сопротивления полюсов статора и ротора, учитывающие магнитное сопротивление полюса и области локального насыщения; R_a, R_j – сопротивления участков ярма статора и ротора соответственно; R_{oa} – магнитное сопротивление пазового рассеяния на дно паза статора; R_{oz} – сопротивление между зубцами статора; $R_\delta(\theta)$ – сопротивления участков воздушного зазора в функции угла положения ротора θ

Магнитные сопротивления воздушного зазора R_δ могут быть рассчитаны методом конечных элементов (МКЭ) при различных положениях зубчатых сердечников с последующей интерполяцией расчетных точек кубическими сплайнами.

Существенное влияние на характеристики ВРД оказывает локальное насыщение при малом перекрытии полюсов статора и ротора. В этом случае наблюдается значительная неравномерность распределения индукции и насыщение угловых зон сердечников [10]. Для учета неравномерности распределения поля в зубцах применяются различные подходы: области локального насыщения моделируются дополнительными магнитными сопротивлениями [11], с помощью нелинейно-параметрических элементов дается интегральное описание магнитных свойств зубцовой зоны [12].

Учет влияния локального насыщения зубцов в данной работе осуществляется на основе методики, изложенной в [13, 14]. Используется дискретизация полюсных наконечников на параллельные ветви, при этом выделяются участки, по которым замыкается поток в насыщенной части полюса и ненасыщенные участки вне области перекрытия.

Электромагнитное состояние схемы замещения описывается системой нелинейных алгебраических уравнений. В матричной форме на основе метода контурных токов уравнения могут быть представлены в виде

$$\mathbf{R}_k \vec{\Phi}_k = \mathbf{G} \vec{F}, \quad (1)$$

где \mathbf{R}_k – матрица контурных магнитных сопротивлений; $\vec{\Phi}_k$ – вектор-столбец контурных потоков; \mathbf{G} – матрица контуров схемы замещения; \vec{F} – вектор-столбец МДС ветвей.

Матрица контурных сопротивлений

$$\mathbf{R}_k = \mathbf{G} \mathbf{R} \mathbf{G}^T,$$

где \mathbf{R} – диагональная матрица магнитных сопротивлений ветвей.

Следует отметить, что система (1) имеет переменную структуру, вследствие изменения конфигурации схемы замещения в области воздушного зазора при вращении ротора.

Исходными данными для электромагнитного расчета выступают МДС обмоток статора, угол положения ротора θ , сопротивления воздушного зазора R_δ в функции θ , кривые намагничивания

для стальных участков магнитной цепи. Для решения системы уравнений (1) применим метод Ньютона. В результате определяются потокоцепления фаз, потоки в элементах магнитной системы, а также электромагнитный момент.

Электромагнитный момент можно рассчитать из энергетического подхода

$$M = \frac{\partial W'}{\partial \theta} \Big|_{i=\text{const}},$$

где W' – коэнергия магнитного поля.

Для оценки адекватности разработанной модели на рис. 2 и 3 представлены результаты расчетов потокоцепления возбужденной фазы ВРД и среднего момента на интервале коммутации в функции тока, полученные с помощью МКЭ (штриховые кривые) и магнитной схемы замещения (сплошные кривые). Расчет магнитного поля производился для образца ВРД 8/6 мощностью 130 Вт. Полевая задача рассматривалась в двумерной постановке.

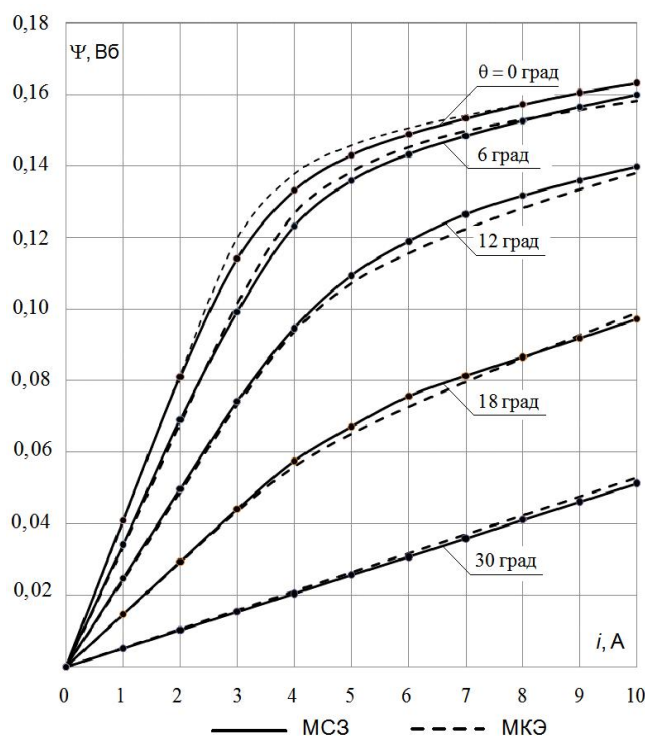


Рисунок 2 – Расчетные зависимости потокоцепления возбужденной фазы для различных углов положения ротора и тока

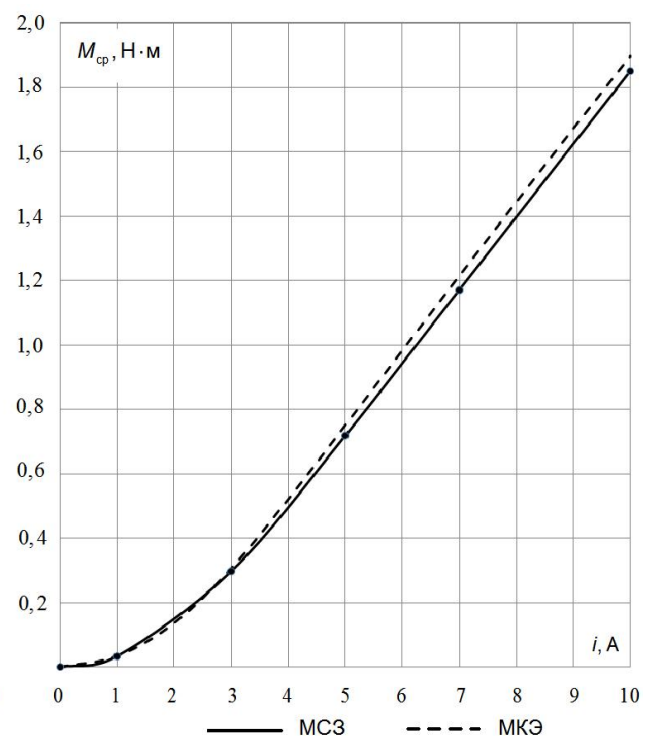


Рисунок 3 – Зависимости среднего электромагнитного момента на интервале коммутации в функции тока

Как показывает сопоставление результатов, расхождения в определении среднего электромагнитного момента, потокоцепления и потоков на участках магнитной цепи в диапазоне от рассогласованного положения зубцов статора и ротора к согласованному не превышают 5 %.

Статические характеристики ВРД при возбуждении одной фазы нельзя рассматривать как исчерпывающие характеристики магнитной системы. При использовании различных алгоритмов коммутации возможно протекание токов одновременно в нескольких фазах ЭМП. В результате совместного действия в магнитной цепи МДС различных фаз изменяются пути замыкания силовых линий магнитного поля и распределение потоков на участках магнитной системы, изменяется их магнитное состояние.

В качестве примера на рис. 4 показаны картины магнитного поля исследуемого образца ВРД для двух случаев: когда ток в фазе B равен нулю (рис. 4 а) и когда за счет упрежденной коммутации успевает достичь значения 5 А (рис. 4 б). При этом ток фазы A полагался равным 5 А в обоих случаях, а направление токов в фазах принималось одинаковым.

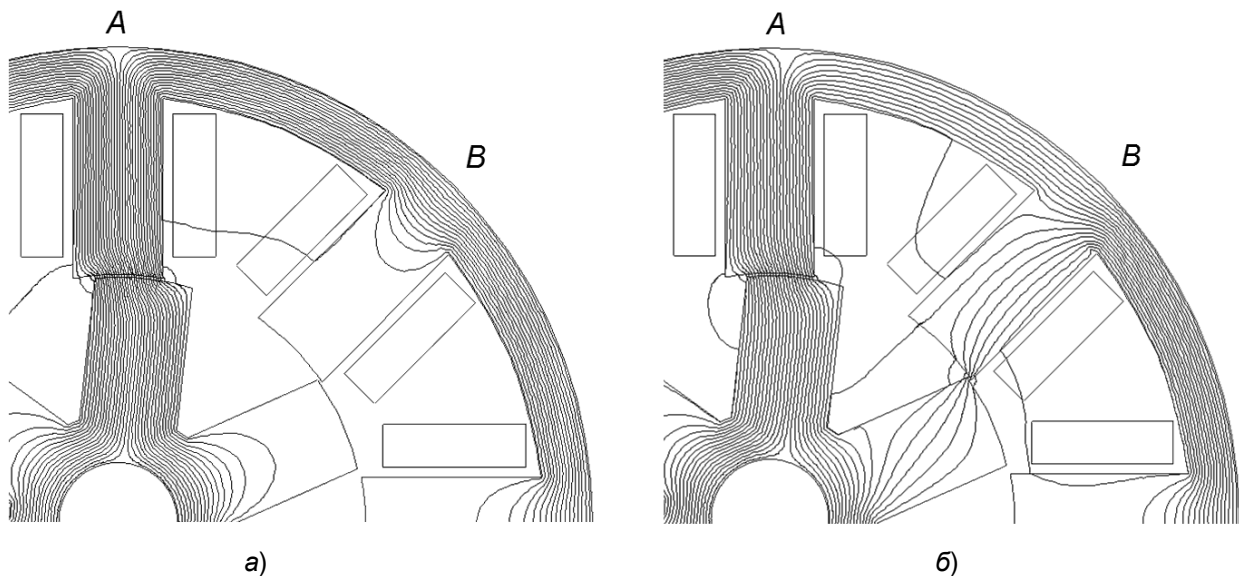


Рисунок 4 – Картины поля ВРД 8/6 при одной возбужденной фазе (а) и при одновременном возбуждении двух фаз (б)

Из рис. 4 следует, что на отдельных участках наблюдается суммирование потоков возбужденных фаз и увеличение степени насыщения, на других – потоки направлены навстречу и частично компенсируют друг друга (например, участок ярма статора между возбужденными полюсами).

В связи с этим практический интерес представляет возможность использования магнитной схемы замещения для определения характеристик ВРД при возбуждении двух фаз. На рис. 5 приведены зависимости потокосцепления фазы А (по рис. 4) при промежуточных положениях сердечника ротора, когда наблюдается протекание токов в фазах А и В при отсутствии тормозного момента (штриховыми линиями показаны результаты, полученные МКЭ; сплошными – с помощью МСЗ).

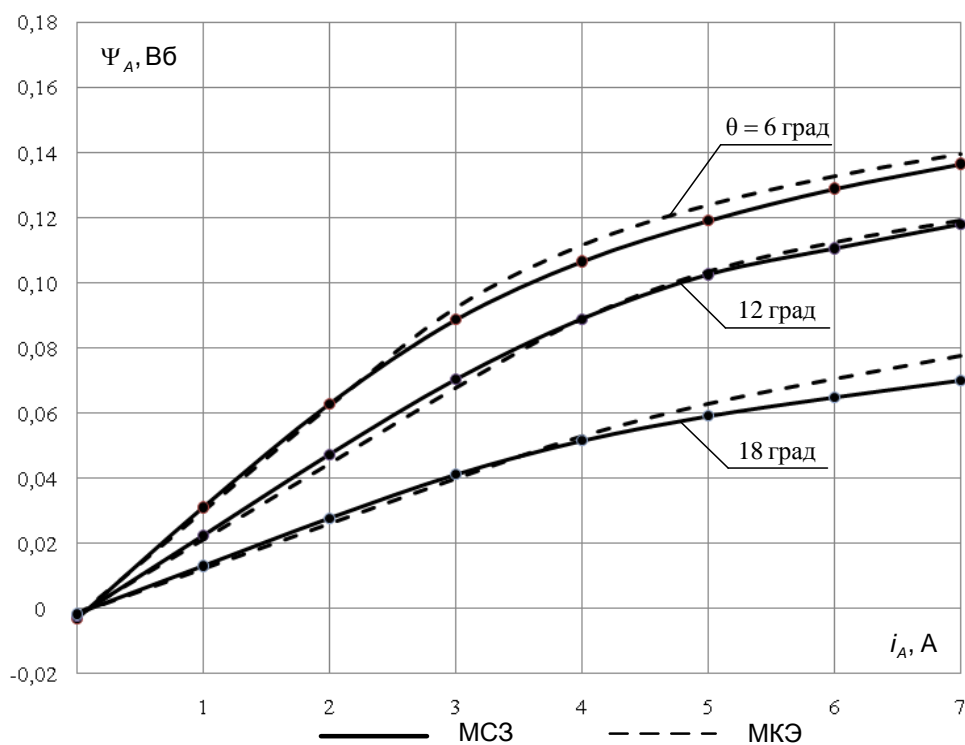


Рисунок 5 – Зависимости потокосцепления фазы А в функции тока и угла положения ротора при возбужденной фазе В ($i_B = 5$ А)

Потокоцепления, рассчитанные с помощью МКЭ и по магнитной схеме замещения, отличаются менее чем на 9 %. Вместе с тем результаты исследований магнитного поля показывают, что значения потокоцеплений, рассчитанные при использовании допущения о магнитной «независимости» фаз (рис. 2), оказываются завышенными по сравнению с результатами, полученными при учете их взаимного влияния при принятом направлении токов в обмотках (рис. 5). Это объясняется изменениями в распределении потоков на участках магнитной цепи и их различным уровнем насыщения при действии в магнитной системе источников МДС двух фаз. Необходимо отметить, что зависимости, показанные на рис. 5, строго не выходят из начала координат из-за наличия взаимной индуктивности между фазами.

Таким образом, разработанная математическая модель позволяет корректно учитывать распределение магнитных потоков в сердечниках статора и ротора, их общее и локальное насыщение, взаимное влияние фаз на уровне магнитной системы при различных алгоритмах коммутации. Эти обстоятельства открывают возможности для исследований ВРД с помощью магнитной схемы замещения в динамических режимах работы с учетом взаимного влияния процессов в электромеханическом и полупроводниковом преобразователе. Численные эксперименты показали существенную экономию затрат вычислительного времени по сравнению с полевым анализом, что позволяет использовать модель на этапе предварительного выбора геометрии и обмоточных данных ВРД.

Список литературы

1. Кузнецов В. А. Дискретная математическая модель вентильно-индукторного двигателя / В. А. Кузнецов, А. В. Матвеев // *Электричество*. – 2000. – № 8. – С. 22–27.
2. Малафеев С. И. Анализ электромагнитного момента вентильно-индукторного двигателя в мехатронной системе с нелинейным токовым управлением / С. И. Малафеев, В. А. Шабаев, А. В. Захаров // *Электротехника*. – 2006. – № 3. – С. 37–42.
3. Васильев Л. А. Одновременная коммутация фаз и ее влияние на выходные характеристики ВРД / Л. А. Васильев, Ю. В. Мнускин, А. И. Лужнев // *Наукові праці Донецького національного технічного університету. Серія: «Електротехніка і енергетика»*, вип. 9 (158). – Донецьк, 2009. – С. 43–47.
4. Рымша В.В. Усовершенствованная цепно-полевая модель вентильно-реактивного двигателя / В. В. Рымша, И. Н. Радимов, М. В. Гулый, П. А. Кравченко // *Электротехніка і електромеханіка*. – 2010. – № 5. – С. 24–26.
5. Иванов-Смоленский А. В. Универсальный метод расчета электромагнитных процессов в электрических машинах / А. В. Иванов-Смоленский, Ю. В. Абрамкин, А. И. Власов, В. А. Кузнецов – М.: Энергоатомиздат, 1986. – 216 с. – Библиогр.: с. 210–213.
6. Кузнецов В. А. Особенности расчета и моделирования вентильно-реактивных электрических машин / В. А. Кузнецов, В. В. Магин, А. С. Марков // *Электричество*. – 2008. – № 11. – С. 30–36.
7. Ткачук В. І. Електромеханотроніка / В. І. Ткачук. – Львів: Видавництво «Львівська політехніка», 2006. – 440 с.
8. Rafajdus. P. Analysis of the switched reluctance motor (SRM) parameters / P. Rafajdus, I. Zrak, V. Hrabovcova // *Journal of electrical engineering*. – 2004. – Vol. 55, № 7-8. – P. 195–200.
9. Perho J. Reluctance network for analysing induction machines : degree of Doctor of Science in Technology : 12-12-2002 / Jarmo Perho. – Helsinki, 2002. – 147 p.
10. Захарченко П. И. Исследование магнитного поля в зубцовой зоне вентильного двигателя при малом перекрытии полюсов статора и ротора / П. И. Захарченко, С. В. Карась, Е. Б. Ковалев // *Взрывозащищенное электрооборудование: сб. науч. тр. УкрНИИВЭ*. – Донецк: ООО «АИР», 2009. – С. 131–137.
11. Kokernak J. M. Magnetic circuit model for the mutually coupled switched-reluctance machine / J. M. Kokernak, D. A. Torrey // *IEEE transactions on magnetics*. – 2000. – Vol. 36, № 2. – P. 500–507.
12. Птах Г. К. Методика описания магнитных свойств зубцовой зоны индукторных машин с сосредоточенными обмотками / Г. К. Птах, А. И. Плешков, А. И. Линев // *Известия вузов. Электромеханика*. – 2004. – № 1. – С. 19–24.
13. Vujičić V. A simple nonlinear model of the switched reluctance motor / V. Vujičić, S. N. Vukosavić // *IEEE transactions on energy conversion*. – 2000. – Vol. 40, № 15. – P. 395–400.
14. Deihimi A. A general nonlinear model of switched reluctance motor with mutual coupling and multiphase excitation / A. Deihimi, S. Farhangi, G. Henneberger // *Electrical Engineering*. – 2002. – Vol. 84. – P. 143–158.