

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПОТЕРЬ В СТАЛИ ВЕНТИЛЬНОГО РЕАКТИВНОГО ДВИГАТЕЛЯ

Л.А. Васильев, А.Е. Боев

Донецкий национальный технический университет

Запропоновано підхід до обчислення магнітних втрат у вентильних реактивних двигунах. Наведені результати математичного моделювання для зразка двигуна.

Прямое определение энергетических показателей вентильных реактивных двигателей (ВРД) с учетом потерь в стали оказывается невозможным из-за особенностей принципа действия и конструкции электромеханического преобразователя (ЭМП) этих электрических машин.

Для оценки магнитных потерь в ВРД в настоящее время применяют разные подходы: величина потерь в стали оценивается по амплитуде потокосцепления фазы в цикле коммутации [1]; рассматриваются потери от вихревых токов, а влияние высших гармоник индукции учитывается поправочным коэффициентом [2]; применяется гармонический анализ кривых индукции [3].

Указанные подходы основываются на допущении о линейности кривой намагничивания стали и равномерности распределения поля по толщине листа в пакете магнитопровода, и поэтому могут применяться для приближенной оценки величины магнитных потерь.

В фазах ВРД протекает однополярный ток, рабочий магнитный поток зависит от угла положения ротора и величины тока, проявляется локальное насыщение зубцовой зоны. Эти факторы приводят к тому, что кривые индукции на участках магнитной системы ВРД имеют выраженный несинусоидальный характер и их форма различна для отдельных элементов магнитной цепи.

На основе анализа распределения магнитных потоков выполнена дискретизация поперечного сечения ВРД с конфигурацией ЭМП 8/6 (8 полюсов статора и 6 полюсов ротора). В магнитной цепи статора и ротора выделены участки, которые имеют разный характер перемагничивания (рис. 1): 4, 2 – полюс статора и ротора; 3, 5 и 6 – 1, 2 и 3-й участки ярма статора соответственно; 1, 7 – участки ярма ротора.

В качестве примера на рис. 2 показаны кривые индукции для выделенных участков магнитной цепи статора, полученные в

результате математического моделирования электромагнитных процессов в образце ВРД 8/6 номинальной мощностью 130 Вт. Сердечники статора и ротора выполнены из электро-технической стали 2013 с толщиной листа 0,5 мм. Кривые индукции соответствуют кривой фазного тока с действующим значением $I = 2,2$ А при парной коммутации фаз для частоты вращения $n = 1500$ об/мин.

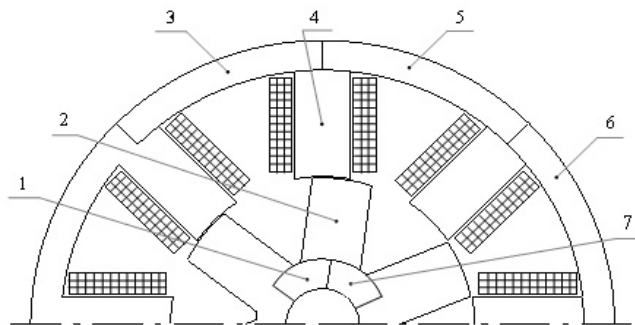


Рис. 1. Дискретизация поперечного сечения ВРД 8/6

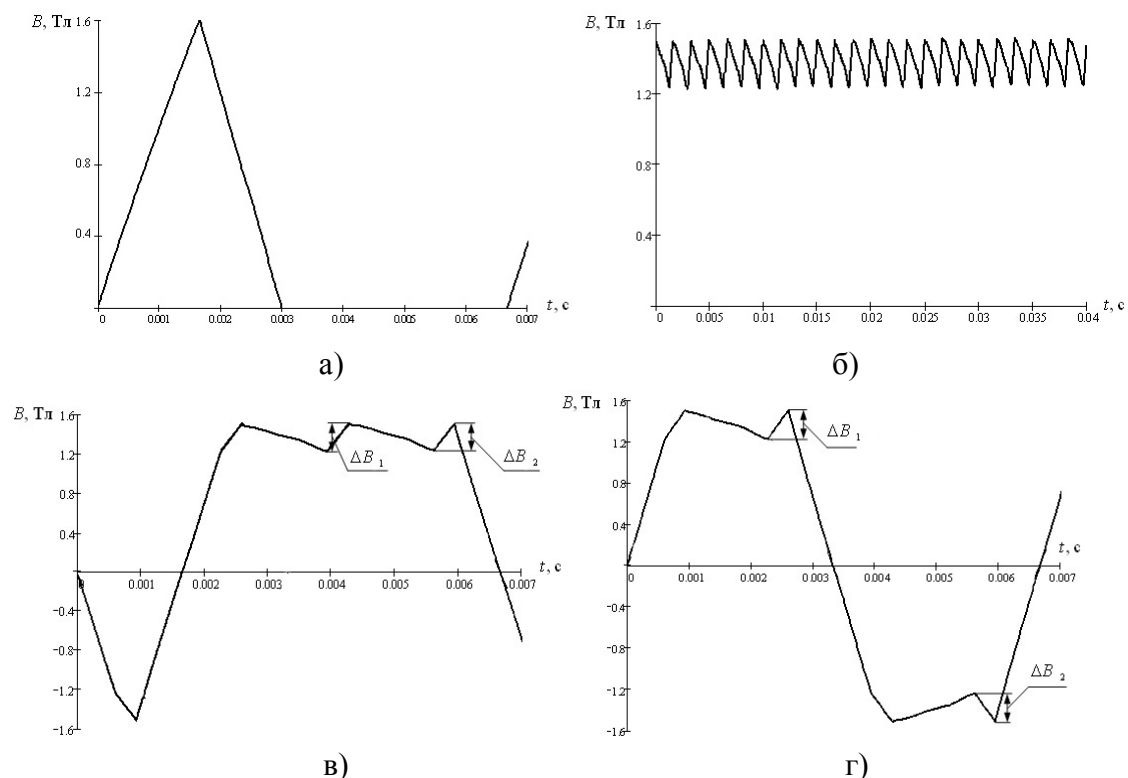


Рис. 2. Кривые индукции на участках магнитной цепи статора: полюс (а), участок ярма 1 (б), участок ярма 2 (в), участок ярма 3 (г)

Кривые рис. 2 иллюстрируют различный характер перемагничивания участков сердечника статора при выраженной несинусоидальности изменения индукции.

Взаимодействие магнитных потоков разных фаз ВРД вызывает провалы в кривых индукции (обозначены ΔB на рис. 2, в и г). Провалы приводят к появлению частных несимметричных циклов перемагничивания и общему увеличению площади петли гистерезиса, что должно учитываться при расчете гистерезисных потерь.

Для исследования электромагнитных процессов при несинусоидальном перемагничивании магнитопровода ВРД с учетом поверхностного эффекта и нелинейности кривой намагничивания разработана математическая модель для расчета нестационарного электромагнитного поля в листе электротехнической стали.

Динамика распределения электромагнитного поля по толщине листа стали при аппроксимации кривой намагничивания арктангенсом описывается нелинейным параболическим уравнением

$$\frac{\partial^2 H}{\partial x^2} = \frac{a_1 a_2}{\rho [1 + (a_2 H)^2]} \frac{\partial H}{\partial t}, \quad (1)$$

где H – напряженность магнитного поля; a_1 и a_2 – коэффициенты аппроксимации кривой намагничивания; x – пространственная координата; ρ – удельное сопротивление стали.

Для решения уравнения (1) используется метод конечных разностей. Для иллюстрации электромагнитных процессов при несинусоидальном перемагничивании на рис. 3, а показаны кривые индукции в полюсах статора в центральной части листа стали (кривая 1) и на его боковой поверхности (кривая 2) при работе исследуемого ВРД на частоте вращения $n = 2500$ об/мин. Кривые, представленные на рис. 3, б, отражают распределение индукции по толщине листа стали для отдельных моментов времени.

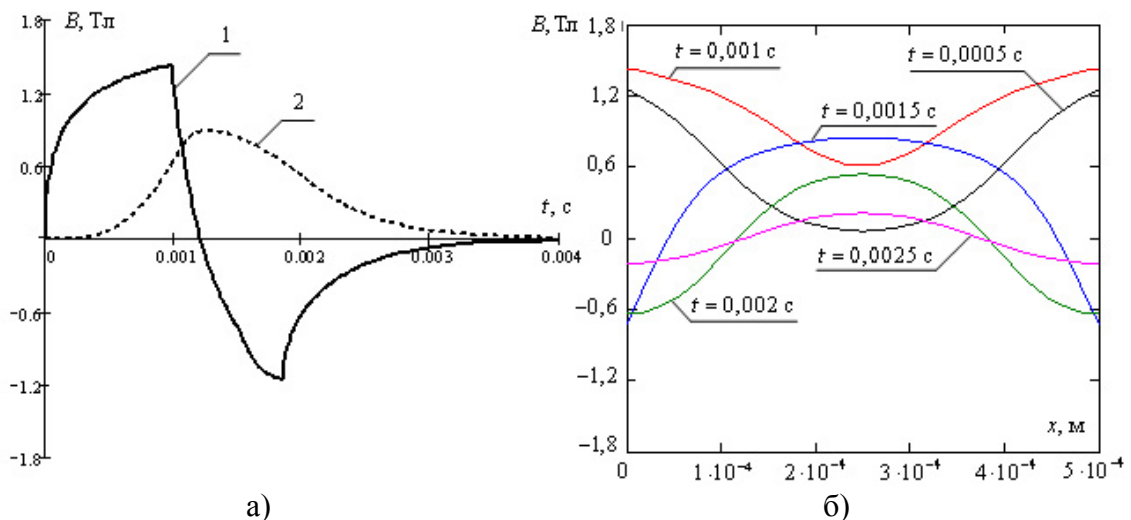


Рис. 3. Кривые индукции в центральной части листа стали и на его боковой поверхности (а) и распределение индукции по толщине листа (б) в полюсах статора при $n = 2500$ об/мин

Из рис. 3, а видно, что амплитуда индукции в центре листа меньше амплитуды на краю в 1,6 раза. Это свидетельствует о

проявлении поверхностного эффекта, ослаблении поля в центральной части листа вихревыми токами, что приводит к вытеснению потока к боковым поверхностям (рис. 3, б).

Для расчета гистерезисных потерь в ВРД на основе подхода, изложенного в [4], получено аналитическое выражение, которое учитывает частные циклы перемагничивания

$$P_h = 130k_{\text{обр}}k_h B_{\text{max } ds}^v b_{ds}^v n l_u \sum_{i=1}^m K_i b_i^{1-v} h_i,$$

где $k_{\text{обр}}$ – коэффициент, зависящий от обработки стали; k_h и v – коэффициенты, зависящие от свойств стали; $B_{\text{max } ds}$ – амплитуда индукции в полюсе статора за цикл коммутации; l_u – длина сердечника статора; K_i – коэффициент, учитывающий увеличение гистерезисных потерь на i -м участке из-за провалов в кривой индукции; b_i и h_i – ширина и высота i -й части магнитопровода.

Значения K_i определяются конфигурацией ЭМП и формой кривых индукции.

На рис. 4 показаны зависимости гистерезисных потерь P_h , потерь от вихревых токов P_F и суммарных магнитных потерь P_{mag} от момента нагрузки M_* , полученные в результате математического моделирования.

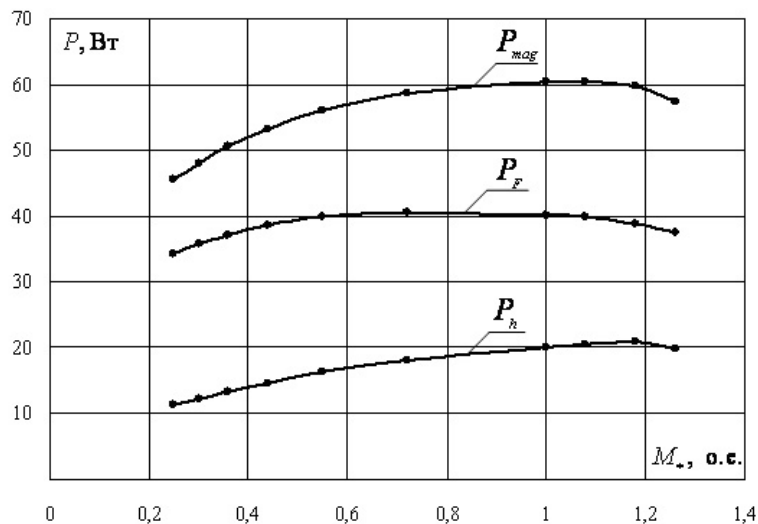


Рис. 4. Зависимости гистерезисных потерь P_h , потерь от вихревых токов P_F и суммарных магнитных потерь P_{mag} от M_*

В табл. 1 приведено распределение удельных и полных потерь в стали по участкам магнитной системы в номинальном режиме работы.

Таблица 1**Потери в стали ВРД в номинальном режиме работы**

Часть магнитной системы	P_F , Вт/кг	P_h , Вт/кг	Масса стали, кг	P_F , Вт	P_h , Вт
Полюса статора	13,4	9,2	0,53	7,1	4,9
Полюса ротора	14,8	12,7	0,33	4,9	4,2
Ярмо статора	38,9	14,6	0,57	22,4	8,3
Ярмо ротора	51,8	22,7	0,11	5,8	2,5
Суммарные потери	–	–	–	40,2	19,9

Данные, представленные в табл. 1, показывают, что наибольшие удельные потери характерны для участков ярма ротора. Это связано с тем, что кривые индукции в ярме ротора в значительной степени искажены влиянием высших гармоник по сравнению с остальными элементами магнитной цепи. Однако с учетом массы преобладают потери ярме статора и составляют приблизительно 50 % суммарных потерь в стали. Как показывают результаты моделирования в номинальном режиме магнитные потери в 1,4 раза превышают электрические, а при снижении нагрузки до $M_* = 0,25$ о.е. – в 4,2 раза.

Выводы

1. Магнитные потери составляют значительную часть суммарных потерь в ВРД (для исследуемого двигателя в номинальном режиме работы более 50 %). При этом наблюдается преобладание потерь от вихревых токов над гистерезисными потерями.

2. Потери в роторе ВРД значительно меньше потерь в статоре и составляют около 20 % от суммарных потерь при изменении нагрузки от 0,25 до 1,25 о.е.

3. Для ВРД характерно проявление магнитного поверхностного эффекта, вызванного высокой скоростью изменения несинусоидального магнитного потока на участках магнитной цепи.

Библиографический список

1. Никифоров, Б. В. Исследования вентильного индукторного двигателя в составе насосного агрегата [Текст] / Б. В. Никифоров, А. А. Цветков // Электротехника. – 2007. – № 6. – С. 24–33.

2. Ткачук, В. І. Електромеханотроніка [Текст] / В. І. Ткачук; Національний університет «Львівська політехніка». – Львів, 2006. – 440 с.

3. Nakamura, K. A method for calculating iron loss of an SR motor based on reluctance network analysis and comparison of symmetric and asymmetric excitation [Text] / K. Nakamura, S. Fujio, O. Ichinokura // IEEE transactions on magnetics. – 2006. – Vol. 42, № 10. – P. 3440–3442.

4. Boldea I., Nasar S.A. The induction machine handbook. CRC Press, 2002. – 950 p.