

КОММУТАЦИОННЫЕ ПОТЕРИ В ЭЛЕКТРОПРИВОДЕ С СИНХРОННЫМ РЕАКТИВНЫМ ДВИГАТЕЛЕМ НЕЗАВИСИМОГО ВОЗБУЖДЕНИЯ

А.Н. Горожанкин
г. Челябинск, ЮУрГУ

TURN ON/OFF LOSS IN THE ELECTRIC DRIVE WITH THE FIELD REGULATED RELUCTANCE MACHINE

A.N. Gorozhankin
Chelyabinsk, SUSU

Приводится расчёт коммутационных потерь в электроприводе с синхронным реактивным двигателем независимого возбуждения, а также экспериментальные данные, полученные на макете электропривода мощностью около 20 кВт.

Ключевые слова: синхронный реактивный двигатель независимого возбуждения, потери в меди, коммутационные потери, потери в стали.

The article gives results of calculation of turn on/off loss in the electric drive with the field regulated reluctance machine, and the experimental data received with a bread-board model of the electric drive of capacity approximately 20 kilowatt.

Keywords: field regulated reluctance machine, losses in copper, turn on/off loss, losses in steel.

Введение. Интерес к расчёту коммутационных потерь в электроприводе с синхронным реактивным двигателем независимого возбуждения (СРДНВ) вызван тем, что ротор у СРДНВ выполнен массивным (нешихтованным) [1]. Для расчёта потерь в первую очередь необходимо выделить факторы, которые влияют на их величину, а затем оценить степень влияния каждого из них на величину коммутационных потерь. В качестве таких факторов взяты – форма сердечника статора СРДНВ [2], форма тока в фазных обмотках, число фаз обмотки статора СРДНВ. Расчёт выполнен методом обмоточных функций [3]. Затем приведены экспериментальные данные, полученные на макете электропривода мощностью около 20 кВт.

Условия расчёта. В качестве начальных условий для расчёта потерь СРДНВ приняты:

- момент коммутации выбирался таким образом, что достигался максимальный среднеинтегральный (за период коммутации) электромагнитный момент;
- магнитная система не насыщалась;
- величина полюсной дуги равна половине величины полюсного деления машины;
- число пазов статора равно сорока восьми;
- расчёт выполнялся для трех случаев формы тока в обмотке каждой фазы статора: трапецеидальной, ступенчатой и синусоидальной. В первом случае время реверса тока в каждой фазе соответствовало ширине фазной зоны статора. Этот случай соответствовал питанию фазных обмоток от

индивидуальных источников тока (ИИТ). Во втором случае ток в каждом полупериоде складывался из трех ступенек равной длительности, при этом амплитуда тока для средней ступени принималась в 2 раза выше, чем на крайних. Этот случай соответствовал питанию трехфазной обмотки статора от автономного инвертора (АИ), выполненного по стандартной мостовой схеме силовых цепей. В случае шестифазной и девятифазной обмотки статора число таких автономных инверторов равнялось двум и трём. Наконец, в третьем случае форма тока соответствовала обычной синусоиде;

– рассматривались два варианта формы поперечного сечения сердечника статора: в первом (традиционном) случае это было кольцо, ограниченное двумя окружностями, во втором – наружный диаметр сечения сердечника представлял собой квадрат, по углам которого размещалась обмотка возбуждения [2].

Потери в меди статора. Сравнение вариантов проводилось по величине показателя q_M :

$$q_M = \frac{M_{CP} / M_B}{\Delta P_M / \Delta P_B}, \quad (1)$$

где M_B и ΔP_B – момент и величина потерь в меди статора при идеальной прямоугольной форме тока в фазных обмотках статора и единичной (номинальной) амплитуде; M_{CP} и ΔP_M – среднее значение момента и потерь в меди статора при другой

форме тока в фазной обмотке статора и единичной амплитуде.

Показатель q_M позволял оценить эффективность использования электродвигателя по моменту при разных законах коммутации.

Зависимость величины показателя q_M от разных факторов: формы тока в обмотке фазы, поперечного сечения сердечника статора, числа фаз обмотки статора иллюстрирует табл. 1.

Как следует из этой таблицы, показатель q_M монотонно во всех случаях увеличивался по мере увеличения m – числа фаз статора. Правда при $m > 6$ эффективность этого увеличения снижалась.

Во всех рассматриваемых случаях второй вариант сердечника статора оказался заметно эффективнее (от 60 до 70 %), чем первый. Эта разница наблюдалась во всех рассмотренных случаях и мало изменялась при разных m .

Наилучшей формой тока следует признать трапецию. Например, при $m = 6$ замена синусоиды на трапецию даёт увеличение показателя q_M от 0,1 до 0,2.

Потери в роторе. Для определения потерь в роторе сначала выделяли критерии, которые влияли на их величину. Такими критериями считались [3]: отношение амплитуды пульсаций потока к его величине (A_F/F), частота пульсаций потока (f_F).

На рис. 1 показаны зависимости относительных пульсаций потока от числа фаз обмотки статора СРДНВ (m) для круглой формы сердечника статора. Здесь схематически изображен почечный

разрез первого варианта сердечника статора: белое кольцо – спинка статора, черное кольцо – зубцовая зона. Кривая 1 (рис. 1) относится к трехступенчатой форме фазного тока в обмотке статора СРДНВ. Пульсации потока составляли от 24 % до 5 %. Кривая 2 (рис. 1) относится к трапецидальной форме фазного тока. Пульсации потока составляли от 7 % до 1 %. Кривая 3 (рис. 1) относится к синусоидальной форме фазного тока в обмотке. Выбором этой формы достигался минимум пульсаций потока, а следовательно, потерь в стали ротора. Эти пульсации составляли от 3 до 0,5 %.

Частота пульсаций потока для круглой формы сердечника статора СРДНВ определялась числом фазных зон и рассчитывалась по формуле

$$f_F = 2mf_{\text{пит}}, \quad (2)$$

где $f_{\text{пит}}$ – частота питающего напряжения.

На рис. 2 показаны те же зависимости, но уже для квадратной формы сердечника статора. Здесь изображен поперечный разрез второго варианта сердечника статора: черное кольцо – зубцовая зона, в углах показаны квадратные пазы для размещения обмотки возбуждения. Кривая 1 (рис. 2) также относится к ступенчатой форме тока в фазе обмотки СРДНВ. Пульсации потока в этом случае составляли от 32 % до 17 %. Кривая 2 (рис. 2) относится к трапецидальной форме фазного тока. Пульсации потока составляли от 20 до 15 %. Кривая 3 (рис. 2) относится к синусоидальной форме фазного тока в обмотке. Пульсации потока в этом случае составляли от 10 до 4 %.

Для квадратной формы сердечника статора

Таблица 1

Величины показателя q_M

Сердечник статора	Форма тока	Число фаз						
		3	4	5	6	7	8	9
Первый вариант	Трапецидальная	0,78	0,83	0,87	0,89	0,91	0,92	0,93
	Трёхступенчатая	0,72	–	–	0,8	–	–	0,83
	Синусоидальная	0,73	0,76	0,78	0,785	0,791	0,792	0,794
Второй вариант	Трапецидальная	1,26	1,37	1,45	1,5	1,53	1,55	1,58
	Трёхступенчатая	1,17	–	–	1,35	–	–	1,41
	Синусоидальная	1,18	1,25	1,29	1,31	1,33	1,34	1,35

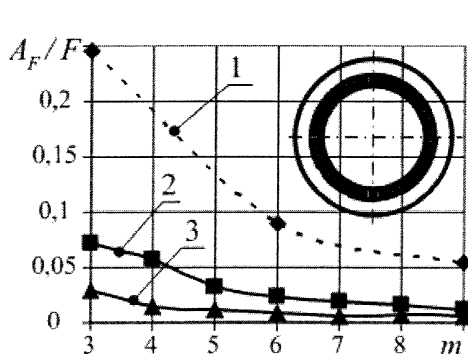


Рис. 1. К расчёту коммутационных потерь для первого варианта сердечника статора

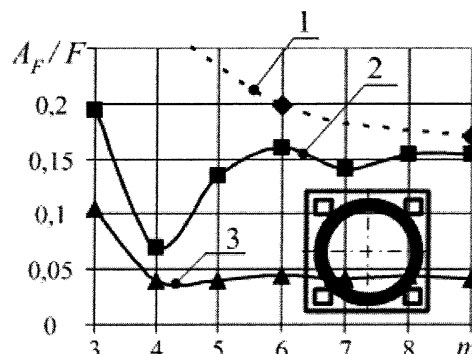


Рис. 2. К расчёту коммутационных потерь для второго варианта сердечника статора

СРДНВ частота пульсаций рассчитывалась по формуле

$$f_F = 4 \cdot f_{\text{ПНТ}}. \quad (3)$$

Величину потерь в роторе определяли по формуле

$$\Delta P_{\text{РОТ}} = k \left(\frac{A_F}{F} \right)^2 f_F, \quad (4)$$

где k – коэффициент пропорциональности.

Сравнение вариантов в этом случае проводилось по величине показателя q :

$$q = \frac{M_{\text{СР}} / M_{\text{Б}}}{(\Delta P_{\text{М}} + \Delta P_{\text{РОТ}}) / \Delta P_{\text{Б}}}. \quad (5)$$

Зависимость величины показателя q от разных факторов при $f_{\text{ПНТ}} = 50$ Гц иллюстрирует табл. 2.

Показатель q для первого варианта сердечника статора монотонно увеличивался по мере увеличения m – числа фаз статора. При $m < 6$ лучше синусоидальная форма тока в обмотках, а при $m \geq 6$ – замена синусоидальной формы тока в обмотках статора трапецеидальной даёт увеличение показателя q на 0,1.

Для второго варианта сердечника статора трапецеидальная и трехступенчатая форма тока в обмотках уступают синусоидальной.

Для асинхронного короткозамкнутого двигателя серии 4 А мощностью около 15 кВт показатель $q = 0,67$ [4].

Экспериментальная проверка. На рис. 3 показаны экспериментальные зависимости потерь для разных величин потока и частот вращения СРДНВ. Опыт проводился на холостом ходу. Питание осуществлялось от преобразователя частоты АВВ АСS 600. Номинальная мощность СРДНВ составляла $P_H = 20$ кВт, число пар полюсов $2p = 4$, число зубцов $z = 48$, активное сопротивление фазы $r = 0,16$ Ом, воздушный зазор $\delta = 1$ мм. Обмотка статора – трехфазная. Величина потока поддерживалась по закону [3]:

$$U_{\text{ЛНН}} / f_{\text{ПНТ}} = \text{const}. \quad (6)$$

В номинальной точке при частоте $f_{\text{ПНТ}} = 50$ Гц и линейном напряжении $U_{\text{ЛНН}} = 250$ В потери в стали составляли $P_0 = 500$ Вт. Расчётные потери в стали статора определялись по формуле [3]:

$$P_{\text{СТ.ОСН}} = k_0 p_{1/50} \left(\frac{f_1}{50} \right)^{1,3} (k_{\text{ДА}} B_a^2 m_a + k_{\text{ДЗ}} B_z^2 m_{z1}), \quad (7)$$

где k_0 – коэффициент добавочных потерь; $p_{1/50}$ – удельные потери при индукции 1 Тл и частоте перемagnetизования 50 Гц; $k_{\text{ДА}}$ и $k_{\text{ДЗ}}$ – коэффициенты, учитывающие увеличение потерь в стали по технологическим причинам.

По расчёту эти потери составили $P_{\text{СТ.ОСН}} = 300$ Вт, механические потери были получены путем аппроксимации кривой 5 (рис. 3) на нулевое линейное напряжение и составили $P_{\text{МЕХ}} = 100$ Вт. Потери в стали ротора

$$P_{\text{РОТ}} = P_0 - P_{\text{СТ.ОСН}} - P_{\text{МЕХ}} = 500 - 300 - 100 = 100 \text{ Вт}.$$

Таблица 2

Величины показателя q

Сердечник статора	Форма тока	Число фаз						
		3	4	5	6	7	8	9
Первый вариант	Трапецеидальная	0,51	0,56	0,72	0,78	0,83	0,84	0,89
	Трёхступенчатая	0,11	–	–	0,3	–	–	0,42
	Синусоидальная	0,68	0,74	0,76	0,77	0,78	0,78	0,78
Второй вариант	Трапецеидальная	0,31	0,95	0,53	0,43	0,51	0,46	0,46
	Трёхступенчатая	0,13	–	–	0,3	–	–	0,39
	Синусоидальная	0,64	1,11	1,14	1,12	1,15	1,14	1,17

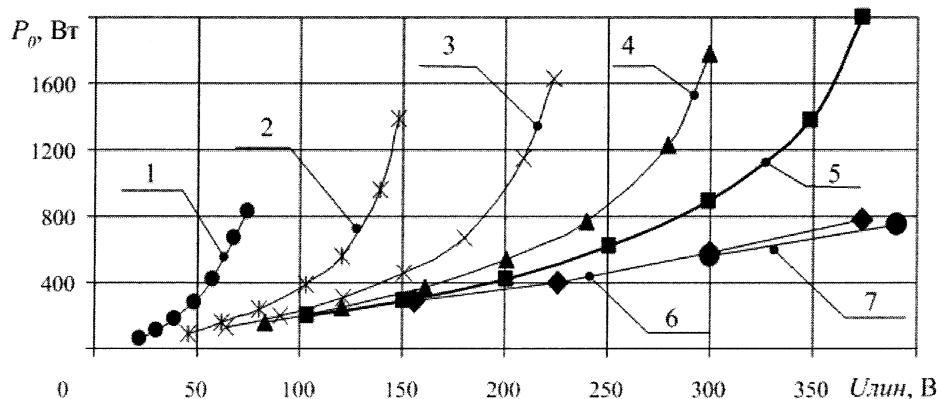


Рис. 3. Потери в функции линейного напряжения при питании СРДНВ от ПЧ для разных частот (1 – 10 Гц; 2 – 20 Гц; 3 – 30 Гц; 4 – 40 Гц; 5 – 50 Гц; 6 – 75 Гц; 7 – 100 Гц)

На рис. 4 показаны зависимости потерь в стали при перемагничивании ротора в функции частоты питающего напряжения при постоянном максимальном значении потока. Питание одной фазы трехфазной обмотки СРДНВ осуществлялось от преобразователя частоты (ПЧ) Control Techniques Commander SK. Ротор СРДНВ оставался неподвижным. Для получения потерь (кривая 1, рис. 4) он выставлялся так, что подключенная к ПЧ обмотка находилась в межполюсной промежутке. Для получения потерь (кривая 2, рис. 4) – подключенная к ПЧ обмотка находилась над полюсами ротора. Величина пульсаций потока подбиралась равной около 3...4 % от номинального значения потока по закону (6), т.е. соответствующей расчётной величине пульсаций при синусоидальной форме тока в фазных обмотках. Для трехфазной обмотки при частоте пульсаций $f_F = 300$ Гц потери в стали ротора (рис. 4) составляли около $P_{рот} = 50$ Вт. Потерями в стали статора $P_{ст.осн}$ пренебрегали, так как амплитуда пульсаций потока крайне мала для создания ощутимых потерь в шихтованном магнитопроводе статора СРДНВ. Эти потери в 2 раза меньше, чем полученные в предыдущем опыте, следовательно, форма пульсаций потока отлична от синусоиды. Для получения потерь в роторе $P_{рот} = 100$ Вт коэффициент пропорциональности должен быть в 2 раз больше расчётного для синусоидальной формы тока в обмотках (4).

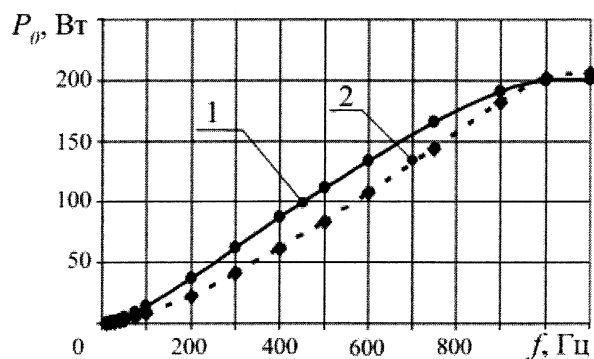


Рис. 4. Потери в стали при перемагничивании ротора СРДНВ (1 – перемагничивание потоком возбуждения; 2 – потоком реакции якоря)

Закключение. Независимо от формы сердечника статора, с точки зрения достижения максимального электромагнитного момента при минимальных потерях в меди обмоток СРДНВ, оптимальной является трапецеидальная форма тока в фазных обмотках (максимум показателя q_M).

По результатам исследования электропривода с СРДНВ и круглой формой сердечника статора для уменьшения потерь в роторе можно рекомендовать:

- питание статорных обмоток источниками трапецеидального тока при $m \geq 6$;
- питание обмоток источниками синусоидального тока при $m < 6$;
- переход на повышенные скорости вращения и частоту питающего напряжения $f_{пит} = 100...200$ Гц. В этом случае потери в роторе СРДНВ резко уменьшаются $f_{пуль} > 1$ кГц (см. рис. 4). Это объясняется снижением величины вихревых токов из-за увеличения активного сопротивления поверхности ротора на высоких частотах.

Для СРДНВ с квадратной формой сердечника статора для уменьшения потерь в роторе можно рекомендовать питание от синусоидальных источников тока. Кроме того, в этом случае частота пульсаций для трехфазного варианта в 1,5 раза меньше при той же частоте питающего напряжения $f_{пит}$, чем при круглой форме сердечника статора, и не зависит от количества фаз статорной обмотки.

Литература

1. Усынин, Ю.С. Электроприводы и генераторы с синхронной реактивной машиной независимого возбуждения / Ю.С. Усынин, М.А. Григорьев, К.М. Виноградов // *Электричество*. – 2007. – №3 – С. 21–26.
2. Статор синхронного реактивного двигателя независимого возбуждения / Ю.С. Усынин, М.А. Григорьев, К.М. Виноградов, А.Н. Горожанкин // *Электротехнические системы и комплексы: межвуз. сб. науч. тр.* – Магнитогорск: МГТУ, 2007.
3. Вольдек, А.И. Электрические машины: учебник для вузов / А.И. Вольдек. – Л.: Энергия, 1974. – 840 с.
4. Копылов, И.П. Проектирование электрических машин / И.П. Копылов. – М.: Энергоатомиздат, 1993.

Поступила в редакцию 20.05.2009 г.

Горожанкин Алексей Николаевич. Аспирант кафедры электропривода и автоматизации промышленных установок Южно-Уральского государственного университета, г. Челябинск. Область научных интересов – электропривод общепромышленных механизмов. Контактный телефон 8 (351) 267-93-21.

Gorozhankin Alexey Nikolaevich. Post-graduate student of the Electric Drive and Automation of Plants department of South Ural State University, Chelyabinsk. Professional interests – the electric drive of common industrial mechanisms. Contact telephone 007-(351) 267-93-21.