

УДК 621.313

ВЛИЯНИЕ ОСНОВНОГО МАГНИТНОГО ПОТОКА НА КОММУТАЦИЮ В НЕЯВНОПОЛЮСНЫХ МАШИНАХ ПОСТОЯННОГО ТОКА

КАЗАКОВ Ю.Б., д-р техн. наук, ШИШКИН В.П., канд. техн. наук

Рассмотрено влияние основного магнитного потока на коммутацию в неявнополюсных машинах постоянного тока с распределенными обмотками возбуждения. Показано отличие такого влияния по сравнению с явнополюсными машинами. Приведены результаты расчета распределения индукции поля главных полюсов в зоне коммутации.

Ключевые слова: коэффициент полюсного перекрытия, магнитный поток, индукция, зона коммутации.

PRIMARY MAGNETIC FLOW INFLUENCE UPON THE COMMUTATION IN DC CYLINDRICAL ROTOR MACHINES

Yu.B. KAZAKOV, Ph.D., V.P. SHISHKIN, Ph.D.

This work is devoted to the examination of primary magnetic flow influence upon the commutation in direct current cylindrical machines with arranged magnetizing coils. The authors have shown the difference of such influence in dc cylindrical rotor machines and in salient-pole ones. The results of main poles field induction dispensing calculation in the commutation zone are given here.

Key words: commutation, commutation reliability, magnetic flow, induction.

Проблема коммутационной надежности является основной проблемой машин постоянного тока, работающих в динамических режимах с перегрузками и большим числом включений и реверсирований. В первую очередь это касается нового класса машин – неявнополюсных машин постоянного тока (НПМПТ) с распределенными обмотками индуктора. Такие машины обладают рядом преимуществ перед традиционными явнополюсными машинами (ЯМПТ) с сосредоточенными обмотками возбуждения на явно выраженных полюсах (рис. 1). НПМПТ имеют меньшие массогабаритные показатели, но для них характерна более напряженная коммутация, меньшая динамическая устойчивость работы. Важность решения задачи обеспечения удовлетворительной коммутации в НПМПТ подтверждается в [1], где приведены теоретические и конструктивные сведения о таких машинах, их характеристиках.

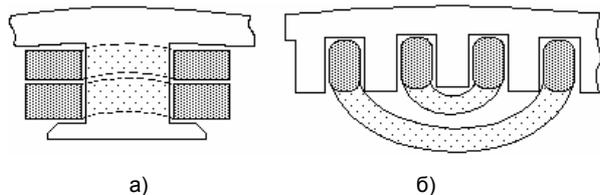


Рис. 1. Размещение обмоток возбуждения главных полюсов: а – в ЯМПТ; б – в НПМПТ

Конструктивные отличия НПМПТ: распределенность обмотки возбуждения (ОВ) главных полюсов (ГП) на несколько катушек и, соответственно, распределенность основного магнитного потока; малый и одинаковый зазор под ГП и добавочными полюсами (ДП); обязательное наличие компенсационной обмотки (КО), – оказывают влияние на характер коммутации. Так, из-за разного числа пазов индуктора и якоря, неравномерного распределения КО по пазам индуктора получить идеальную компенсацию поперечной реакции якоря не удастся. Например, для НПМПТ 4П80 КО укладывается только в 16 из 32 пазов в индукторе, а обмотка якоря (ОЯ) – во все 21 паз якоря. Возникающие при этом местные некомпенсированные поля ОЯ при нагрузках ухудшают коммутацию.

Для ЯМПТ коэффициент полюсного перекрытия $a \leq 0,7$ [2], таким образом, ширина зоны коммутации

$b_{зк}$ не превышает 70 % нейтральной зоны, что исключает проникновение основного магнитного потока в зону коммутации, наведение этим потоком ЭДС в коммутируемых секциях и позволяет пренебречь влиянием этого поля на характер коммутации (рис. 2).

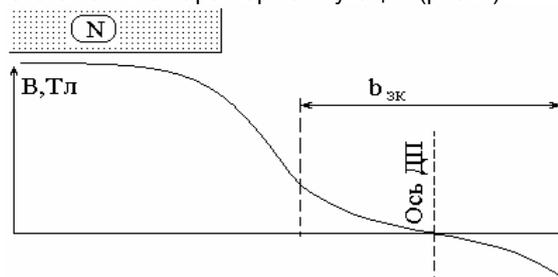


Рис. 2. Типичное распределение индукции основного магнитного потока ЯМПТ в зоне коммутации

В НПМПТ при таких же значениях a зачастую наблюдается искрение под щеткой, т.е. затрудненная коммутация, даже в режиме холостого хода, когда нет поля реакции якоря. Это указывает на существенное воздействие поля ГП на коммутацию в НПМПТ.

Влияние этих особенностей на коммутацию в НПМПТ мало изучено. При этом оценка коммутационной надежности НПМПТ по методикам, применяемым для традиционных ЯМПТ с сосредоточенными ОВ и основанных на теории цепей с сосредоточенными параметрами, может оказаться некорректной. Необходимо совершенствовать методы анализа коммутации НПМПТ. Для оценки влияния магнитного поля ГП на коммутацию в НПМПТ целесообразно применение полевых методов расчета [3].

При нескольких распределенных обмотках необходимо рассчитывать α по магнитному полю и/или путем анализа распределения МДС обмоток. Если ОВ ГП (параллельная и последовательная) НПМПТ выполнены в виде концентрических катушек, в том числе с разным распределением по пазам, то их α могут оказаться разными, в отличие от ЯМПТ. Если на статоре находится M распределенных обмоток, то для i -й обмотки, по [4],

$$\alpha_i = \frac{\sum_{n=1}^{K_i} (Y_{ni} w_{ni})}{\left(\tau \sum_{n=1}^{K_i} w_{ni} \right)},$$

где Y_{ni} – n -й шаг из K_i шагов K_i concentрических катушек i -й обмотки; w_{ni} – число витков n -й катушки i -й обмотки; τ – полюсное деление.

Результирующий коэффициент полюсного перекрытия

$$\alpha = \frac{\sum_{i=1}^M \left[J_i \sum_{n=1}^{K_i} (Y_{ni} w_{ni}) \right]}{\left(\tau \sum_{i=1}^M \left(J_i \sum_{n=1}^{K_i} w_{ni} \right) \right)},$$

где J_i – ток i -й обмотки; $W_i = \sum_{n=1}^{K_i} w_{ni}$ – число ее витков на полюс.

Если доля МДС i -й обмотки в результирующей МДС

$$\text{составляет } \beta_i = J_i W_i / \left(\sum_{i=1}^M (J_i W_i) \right), \text{ то } \alpha = \sum_{i=1}^M (\beta_i \alpha_i).$$

При наличии только параллельной и последовательной ОВ

$$\alpha = \beta_{\text{ПАР}} \alpha_{\text{ПАР}} + \beta_{\text{ПОС}} \alpha_{\text{ПОС}}.$$

В НПМПТ отдельные катушки ОВ могут иметь относительный шаг больший, чем α . Так, для НПМПТ 4П80 при $\alpha = 0,56$ одна из катушек ОВ имеет относительный шаг 0,33, а другая – 0,78 и проводники последней оказываются расположенными в зоне коммутации, которая оказывается на 17% меньше нейтральной зоны. При насыщении магнитной системы НПМПТ происходит уплощение кривой распределения индукции в зазоре по оси ГП и еще большее увеличение α с возрастанием проникновения основного потока в зону коммутации, в отличие от ЯМПТ, у которых α снижается с ростом насыщения. Все это при меньших, чем у ЯМПТ, зазорах вызывает в НПМПТ существенное возрастание проникновения основного магнитного потока в зону коммутации. Определение характеристик НПМПТ выполнялось с приведением МДС параллельной и последовательной ОВ к МДС возбуждения при результирующем α . В качестве коэффициентов приведения были приняты отношения $\alpha_{\text{ПАР}}$ и $\alpha_{\text{ПОС}}$ к α . Тогда МДС возбуждения F_B определяется по формуле

$$F_B = J_{\text{ПАР}} W_{\text{ПАР}} \frac{\alpha_{\text{ПАР}}}{\alpha} + J_{\text{ПОС}} W_{\text{ПОС}} \frac{\alpha_{\text{ПОС}}}{\alpha}.$$

С помощью разработанной системы проектирования НПМПТ [4] рассчитан ряд вариантов НПМПТ мощностью 40 кВт. Для этой машины выполнены расчеты магнитных полей методом конечных элементов при разных токах обмоток ОВ и разных их распределениях [5]. По кривым распределения индукции в зазоре уточнены $\alpha_{\text{ПАР}}$, $\alpha_{\text{ПОС}}$, α , значения основного магнитного потока и $\Phi_{\text{ЭК}}$. Погрешность определения потоков не превышает 4%.

Анализ результатов расчетов магнитного поля показывает, что средняя индукция основного потока в зоне коммутации для НПМПТ превышает более чем в 2,5 раза индукцию основного потока в зоне коммутации для ЯМПТ. Более того, в зоне коммутации НПМПТ при ширине ДП $b_{\text{ДП}}$, меньшей, чем ширина зоны коммутации $b_{\text{ЭК}}$, возможно даже изменение знака индукции основного магнитного потока (рис. 3, 4, 5).

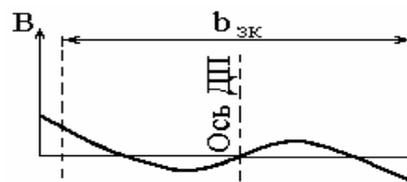


Рис. 3. Возможное распределение индукции основного магнитного потока в зоне коммутации НПМПТ

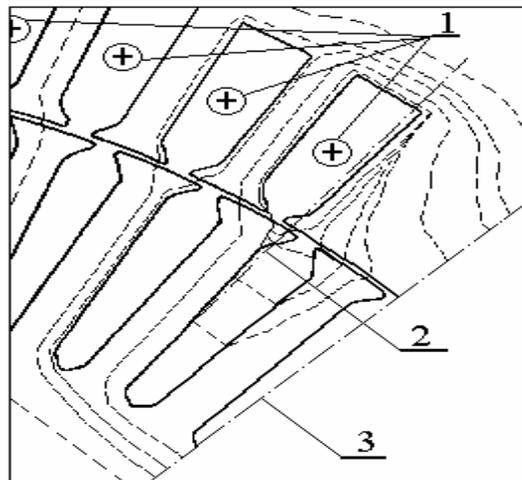


Рис. 4. Фрагмент рассчитанного распределения линий основного магнитного потока в зоне коммутации НПМПТ: 1 – проводники ОВ; 2 – граница зоны коммутации; 3 – ось ДП

Таким образом, от поля ГП в коммутируемых секциях обмотки якоря наводится ЭДС, пропорциональная значению индукции и усложняющая процесс коммутации. Добавка к реактивной ЭДС при номинальной нагрузке может достигать 10–15%. При этом ЭДС за период коммутации T может менять знак четыре раза. Это затрудняет настройку коммутации.

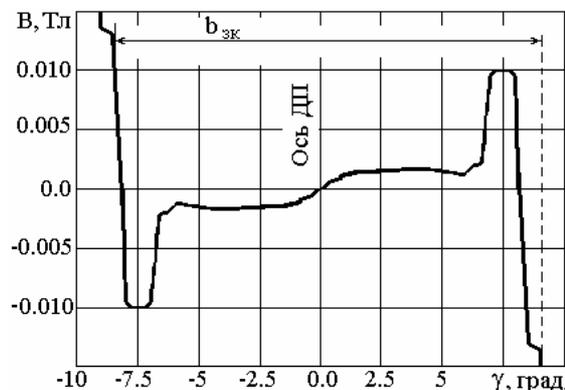


Рис. 5. Рассчитанное распределение индукции основного магнитного потока НПМПТ в зоне коммутации

Для генераторного режима ЯМПТ поле ГП во второй половине периода коммутации во время $T/2 < t < T$ наводит в коммутируемой секции ЭДС такого направления, которое способствует ускорению коммутации, а для двигательного режима – замедлению коммутации. Наоборот, у НПМПТ в двигательном режиме в период $T/2 < t < T$ при $b_{\text{ДП}} = b_{\text{ЭК}}$ в коммутируемых секциях наводится ЭДС, способствующая ускорению коммутации, а в генераторном режиме – замедлению коммутации. В период $0 < t < T/2$ все происходит с точностью до наоборот. То есть, под влиянием поля ГП в неявнополюсном двигателе происходит снижение, а в неявнополюсном генераторе – увеличение плотностей тока и под сбегающим и под набегающим краями щетки (рис. 6).

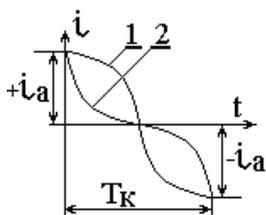


Рис. 6. Искажение тока линейной коммутации НПМПТ под действием поля ГП при $b_{дп} = b_{зк}$: 1 – двигатель; 2 – генератор

Таким образом, основное магнитное поле оказывает существенное влияние на коммутацию в неявнополюсных машинах постоянного тока, которое необходимо учитывать при разработке и настройке коммутации таких машин.

Казаков Юрий Борисович,
ГОУВПО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина»,
доктор технических наук, профессор кафедры электромеханики,
телефон (4932) 26-97-06,
e-mail: elmash@em.ispu.ru

Шишкин Валерий Павлович,
ГОУВПО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина»,
кандидат технических наук, профессор, декан электромеханического факультета,
телефон (4932) 26-97-47,
e-mail: shishkin@emf.ispu.ru

Список литературы

1. **Кожевников В.А., Копылов И.П.** Развитие теории и конструкции машин постоянного тока. – Л.: Наука, 1985. – 147 с.
2. **Хвостов В.С.** Электрические машины: Машины постоянного тока: Учебник для студ. электромех. спец. вузов / Под ред. И.П. Копылова. – М.: Высш. шк., 1988. – 336 с.
3. **Битюцкий И.Б.** Математическая модель формирования реактивной ЭДС крупной машины постоянного тока // Изв. вузов: Электромеханика. – 2002. – № 5. – С. 22–25.
4. **Казаков Ю.Б.** Матричный анализ и синтез схем статорных обмоток неявнополюсных машин постоянного тока // Электричество. – 1997. – № 4. – С. 41–44.
5. **Казаков Ю.Б., Щелькалов Ю.Я.** Особенности смешанного возбуждения неявнополюсных машин постоянного тока: Тр. V Междунар. конф. МКЭЭЭ-2003. – Ч. I. – С. 572–575.