

МАГНИТНОЕ ПОЛЕ ВЫСШИХ ГАРМОНИЧЕСКИХ В ЗАЗОРЕ ВОЗБУДИТЕЛЯ СИНХРОННОГО ГЕНЕРАТОРА СОВМЕЩЕННОГО ТИПА

Ю.В. Зубков

Самарский государственный технический университет
443100, г. Самара, ул. Молодогвардейская, 244

Определен коэффициент дифференциального рассеяния поля реакции якоря возбуждителя, созданного однослойной электрически совмещенной обмоткой ротора вентильного генератора, посредством решения полевой задачи. Проведен анализ влияния насыщения сердечников на величину коэффициента дифференциального рассеяния.

Ключевые слова: электрически совмещенная обмотка, дифференциальное рассеяние, обмоточный коэффициент.

Синхронный генератор совмещенного типа (СГСТ) является электрической машиной с магнитным и электрическим совмещением, где электрически совмещенная обмотка ротора выполняет одновременно функции якорной обмотки синхронного возбуждителя и обмотки возбуждения генератора [1]. Возникает необходимость решения ряда практических задач, позволяющих оценить эффективность использования этой обмотки в магнитных полях возбуждителя и генератора.

Одной из таких задач является определение коэффициента дифференциального рассеяния магнитного поля реакции якоря возбуждителя и его составляющих.

Содержание высших гармонических индукций в зазоре определяет величину реактивности рассеяния обмотки ротора СГСТ и мощности возбуждения (управления) P_f . Чем меньше P_f , тем меньше:

- ток возбуждения при заданном напряжении, что облегчает реализацию автоматического регулирования возбуждения СГСТ;
- магнитодвижущая сила (МДС), что приводит к сокращению числа витков обмотки возбуждения возбуждителя (ОВВ) при заданном токе.

Полная МДС ОВВ при прочих одинаковых условиях (m_R – число фаз возбуждителя; w_R – число последовательных витков фазы обмотки якоря возбуждителя, характер нагрузки; δ – величина воздушного зазора, конфигурация зубцово-пазовой структуры статора и ротора, насыщение магнитопроводов статора и ротора ВГСТ) зависит от реакции якоря возбуждителя и рассеяния магнитного потока.

Интенсивность магнитного поля реакции якоря пропорциональна квадрату обмоточного коэффициента обмотки ротора для основной гармонической поля возбуждителя k_{ov1} .

Магнитное поле рассеяния обмотки ротора состоит из поля рассеяния пазов, лобовых частей и дифференциального рассеяния в воздушном зазоре.

Совмещенные обмотки для бесщеточного возбуждения выполняют с максимально возможным обмоточным коэффициентом в поле основной машины (в нашем случае – генератора). При таком подходе этот коэффициент относительно поля возбуждителя получается малым по величине из-за сильного укорочения шага. Поле ре-

Юрий Валентинович Зубков (к.т.н., доц.), доцент кафедры «Электромеханика и автомобильное оборудование».

акции якоря возбудителя, создаваемое такой обмоткой в воздушном зазоре, содержит спектр высших гармонических, имеющих большую амплитуду. Относительное их содержание в кривой индукции характеризуется коэффициентом дифференциального рассеяния [2]:

$$\sigma_0 = \frac{\sum \left(\frac{k_{ovv}}{v} \right)^2}{\left(\frac{k_{ov1}}{p_1} \right)^2} - 1, \quad (1)$$

где k_{ovv} – обмоточный коэффициент v -й гармонической ;
 p_1 – число пар полюсов возбудителя.

$$k_{ovv} = k_{pov} k_{yov} = \frac{\sin\left(\frac{\pi}{2m_R} v\right)}{q_e \sin\left(\frac{\pi}{2m_R q_e} v\right)} \sin\left(\frac{\pi}{2} \beta v\right), \quad (2)$$

где q_e – число пазов на полюс и фазу обмотки якоря возбудителя; β – относительный шаг обмотки ротора в поле возбудителя.

Выражение (1) справедливо для обычных симметричных обмоток. Для обмоток, генерирующих широкий спектр высших гармонических, оно справедливо в меньшей степени, а вычисление обмоточных коэффициентов по формуле (2) не учитывает геометрии зубцово-пазовой структуры и магнитного состояния машины. Следовательно, задача определения величины σ_0 с учетом перечисленных факторов является актуальной.

Обмоточный коэффициент можно определить как отношение амплитуды v -й гармоники индукции поля, созданного обмоткой с заданным распределением и укорочением шага, к амплитуде v -й гармоники индукции поля сосредоточенной обмотки с диаметральной шагом. Для этого необходимо решить полевую задачу и выполнить гармонический анализ поля в зазоре.

Для оценки влияния свойств стали, раскрытия пазов и величины воздушного зазора на точность расчета амплитуд гармоник индукции, а следовательно, и на точность определения обмоточных коэффициентов модель должна воспроизводить реальное поперечное сечение ВГСТ.

При определении обмоточных коэффициентов и коэффициента дифференциального рассеяния на модели была воспроизведена реальная обмотка с заданным распределением по пазам и укорочением шага на $\frac{7}{9}$, выполнен гармонический анализ поля на средней линии воздушного зазора и вычислено отношение амплитуд гармоник индукции поля реальной обмотки и поля сосредоточенной обмотки с диаметральной шагом.

Относительная магнитная проницаемость стали была принята равной $\mu_{cm} = 9700$, зазор достаточно мал по сравнению с полюсным делением ($\frac{\delta}{\tau_1} = 0,00277$), сердечник статора гладкий. Амплитудное значение полного фазного тока обмоток якоря возбу-

дителя с укороченным и диаметральным шагами остается неизменным и составляет для данной модели $F_{m\approx} = 37,62$ А.

Решение полевой задачи магнитостатики было осуществлено методом конечных элементов в пакете Elcut.

На рис. 1 показан график нормальной составляющей индукции поля реакции якоря B_{an} вдоль средней линии воздушного зазора на полюсном делении.

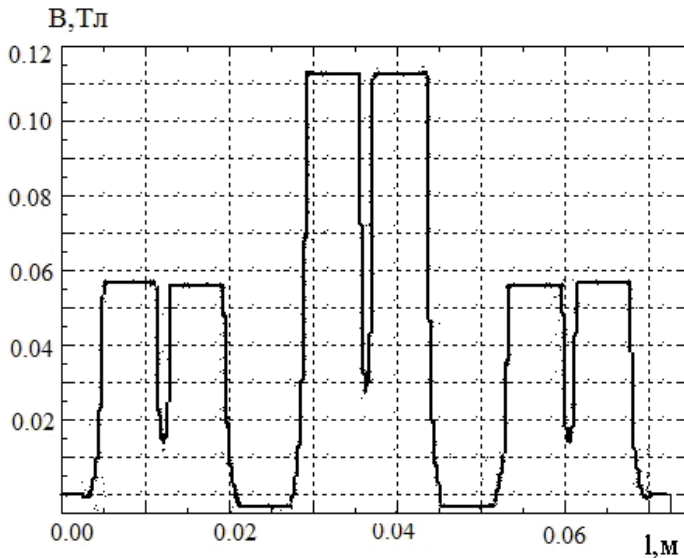


Рис. 1. Распределение индукции поля реакции якоря B_{an} вдоль средней линии воздушного зазора на полюсном делении для обмотки с укороченным шагом

Гармонический анализ этого распределения был выполнен с помощью встроенной функции *fft* (быстрое преобразование Фурье) пакета *MathCAD*. Предварительно был сформирован текстовый файл размерностью 2^N из значений B_{an} (N – целое число) и передан в *MathCAD*.

В таблице приведены результаты определения обмоточных коэффициентов при фиксированной магнитной проницаемости стали и зубчатом сердечнике ротора.

Расхождение результатов при моделировании поля и расчете по формуле (2) определялось по выражению $\left(\frac{k_{osv}^! - |k_{osv}|}{k_{osv}^!} \right) 100\%$ и составило (0-8) %. Результаты моделирования с достаточно высокой точностью совпадают с расчетом по аналитическим выражениям; таким образом, полевая модель может быть использована для оценки допущений, принятых при выводе аналитических выражений.

Коэффициент дифференциального рассеяния, найденный по выражению (1) в соответствии с результатами моделирования, составил $\sigma_0 = 0,510$. При вычислениях использовались члены конечного ряда $\nu = 1...30$.

Решение полевой задачи позволяет найти коэффициент дифференциального рассеяния, не прибегая к вычислению обмоточных коэффициентов.

Решение полевой задачи позволяет найти коэффициент дифференциального рассеяния, не прибегая к вычислению обмоточных коэффициентов.

Результаты моделирования магнитного поля ВГСТ при зубчатом сердечнике ротора

Номер гармоники ν	Амплитуда ν -й гармоники индукции при $y = \tau_1$, беспазовая машина	Амплитуда ν -й гармоники индукции при $y = \tau_1$, зубчатый ротор	Амплитуда ν -й гармоники индукции при $y = \frac{2}{9}\tau_1$, зубчатый ротор	$k'_{ов\nu}$, модель поля	$k_{ов\nu}$, расчет по формуле (2)	Расхождение, %
1	0.2154	0.1935	0.0641	0.342	0.342	0.0
5	0.0451	0.0404	0.0394	0.975	0.985	1.0
7	0.0319	0.0295	0.0193	0.655	0.643	1.8
11	0.0206	0.0210	0.0131	0.625	-0.643	2.9
13	0.0171	0.0195	0.0197	1.010	-0.985	1.6
17	0.0133	0.0346	0.0119	0.344	-0.342	0.6
19	0.0116	0.0138	0.0048	0.345	0.342	0.9
23	0.0098	0.0045	0.0042	0.933	0.985	5.6
25	0.0087	0.0054	0.0038	0.693	0.643	7.1
29	0.0078	0.0070	0.0042	0.599	-0.643	7.3

Исходя из магнитной энергии коэффициент дифференциального рассеяния

$$\sigma_0 = \frac{W}{W_1} - 1, \quad (3)$$

где W – магнитная энергия поля, кривая распределения которого приведена на рис. 1;

W_1 – магнитная энергия поля основной гармонической.

Энергия основного поля

$$W_1 = \frac{V_\delta}{2 \cdot \mu_0} \left(\frac{B_{m1}}{\sqrt{2}} \right)^2,$$

где V_δ – объем воздушного зазора; B_{m1} – амплитуда основной гармонической индукции в воздушном зазоре.

Полная магнитная энергия

$$W = \frac{m_R}{4} L \cdot I_{\approx m} = \frac{1}{2} \int_{V_\delta} H(\alpha) \cdot B(\alpha) dV_\delta = \frac{l_\delta \cdot \delta}{2} \int_0^{2\pi} H(\alpha) \cdot B(\alpha) \frac{p_1 \tau_1}{\pi} d\alpha, \quad (4)$$

здесь L – полная индуктивность обмотки якоря возбудителя; $I_{\approx m}$ – амплитудное значение переменной составляющей тока обмотки ротора. В практических расчетах интеграл в выражении (4) заменяют суммой $W = \frac{V_\delta}{2 \cdot \mu_0 \cdot z_R} \sum_{i=1}^{z_R} B_i^2$, где B_i – индукция

над зубцами ротора.

Значения B_{m1} и W определены при решении полевой задачи. Коэффициент дифференциального рассеяния, найденный по выражению (3), составил 0,732.

Разница в значениях σ_0 при его определении по формулам (1) и (3) объясняется учетом во втором случае всего спектра гармонических в кривой магнитной индукции.

Нахождение коэффициента дифференциального рассеяния по энергии магнитного поля в воздушном зазоре является более универсальным способом и может ис-

пользоваться при оптимальном проектировании СГСТ. Однако с точки зрения анализа зависимости амплитуд гармоник индукции от различных факторов (величины воздушного зазора, насыщения стали, раскрытия пазов) определение σ_0 по формуле (1) является более предпочтительным, так как позволяет определить воздействие этих факторов на конкретные гармоники поля дифференциального рассеяния. Оба способа учитывают при расчете дифференциального рассеяния реальную геометрию магнитопроводов, степень насыщения, демпфирование высших гармонических обмотками статора.

При работе ВГСТ в различных режимах (от холостого хода до короткого замыкания) существенно меняется степень насыщения сердечников, поэтому на втором этапе моделирования необходимо выяснить влияние насыщения стальных участков магнитопровода СГСТ на дифференциальное рассеяние в воздушном зазоре.

При анализе поля дифференциального рассеяния в воздушном зазоре его принято разделять на две составляющие [3]:

1) поясовое поле рассеяния, представляющее собой сумму пространственных гармонических поля воздушного зазора до подзубцового порядка, за исключением основной;

2) поле рассеяния по коронкам зубцов, которое представляет собой сумму всех пространственных гармонических поля в воздушном зазоре, создаваемых обмоткой ротора, с порядками от подзубцового и выше. Причем порядок подзубцовой гармонической

$$\nu_{Hz} = \frac{z_R}{2} - p.$$

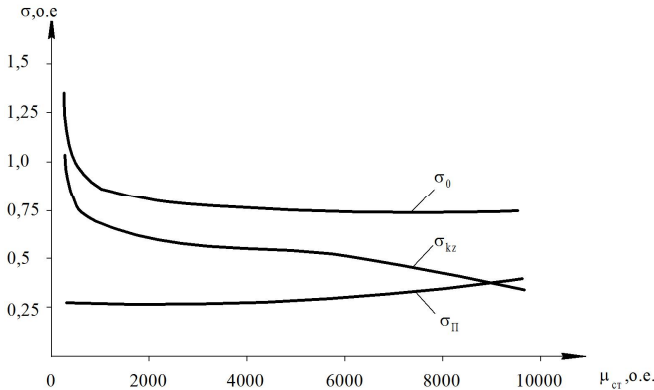


Рис. 2. Зависимость коэффициентов дифференциального рассеяния от насыщения стали

Оценим влияние насыщения стали на дифференциальное рассеяние обмотки ротора в целом и отдельные его составляющие. Причем поясовое рассеяние находим по обмоточным коэффициентам гармонических порядка $\nu = 5,7$, а рассеяние по коронкам зубцов – вычитанием поясового рассеяния из полного рассеяния воздушного зазора, рассчитанного по магнитной энергии:

$$\sigma_{0кz} = \sigma_0 - \sigma_{0II},$$

где σ_{0II} , $\sigma_{0кz}$ – коэффициенты поясового дифференциального рассеяния и рассеяния по коронкам зубцов соответственно.

Полевая задача решалась при различных значениях переменной составляющей полного тока обмотки и переменной магнитной проницаемости стали (в свойствах модели задана кривая $B = f(H)$, сталь 1411).

На рис. 2 приведены зависимости составляющих коэффициента дифференциального рассеяния от относительной магнитной проницаемости стали, характеризующей состояние магнитопровода в различных режимах работы СГСТ.

Из полученных данных можно сделать следующие выводы:

- электрически совмещенные обмотки характеризуются существенной величиной рассеяния магнитного поля в воздушном зазоре;
- мощность возбуждения СГСТ зависит от рассеяния магнитного поля, что указывает на необходимость расчета коэффициента дифференциального рассеяния с учетом реальной геометрии и состояния магнитной системы;
- данная задача решена посредством численного моделирования магнитного поля возбуждателя СГСТ;
- насыщение магнитопроводов оказывает существенное влияние на величину коэффициента дифференциального рассеяния по коронкам зубцов в области $\mu_{cm} = 1000$ и менее. Поясовое рассеяние мало зависит от насыщения.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. *Зубков Ю.В., Тулупов П.В.* Моделирование электромагнитных процессов вентильного генератора совмещенного типа / Известия вузов. Электромеханика. – 2011. – № 3. – С. 52-54.
2. *Геллер Б., Гамата В.* Высшие гармоники в асинхронных машинах / Пер. с англ. под ред. З.Г. Каганова. – М.: Энергия, 1981. – 352 с.
3. *Одилов Г.* Дифференциальное рассеяние обмотки якоря явнополюсной синхронной машины // Электричество. – 2002. – № 9. – С. 66-69.

Статья поступила в редакцию 21 февраля 2013 г.

THE UPPER HARMONICS MAGNETIC FIELD IN THE AIR GAP OF EXITER IN THE COMBINED TYPE SYNCHRONOUS GENERATOR

Y.V. Zubkov

Samara State Technical University
244, Molodogvardeyskaya st., Samara, 443100

The index of differential leakage of the field of exiter, created by single-layer electrically combined winding rotor of the ventil generator by means of the solution of a field task is defined. The analysis of influence of saturation of cores at a size of differential leakage factor is carried out.

Keywords: *the electrically combined winding, differential leakage, winding factor.*