

УДК 621.313.3

ИДЕНТИФИКАЦИЯ ПАРАМЕТРОВ СИНХРОННОГО ГЕНЕРАТОРА С ВОЗБУЖДЕНИЕМ ОТ ПОСТОЯННЫХ МАГНИТОВ МЕТОДОМ ЧИСЛЕННОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ МАГНИТНОГО ПОЛЯ**Ю.В. Зубков, Э.Г. Чеботков**Самарский государственный технический университет
Россия, 443100, г. Самара, ул. Молодогвардейская, 244

Численным моделированием магнитного поля синхронного генератора с магнито-электрическим возбуждением определены коэффициент рассеяния индуктора и реактивные сопротивления реакции обмотки якоря. Приведены картины магнитных полей, создаваемых индуктором и обмоткой якоря. Показано распределение индукции на середине немагнитного зазора. Оценено влияние рассеяния магнитов и соотношения между реактивностями обмотки якоря по продольной и поперечной осям на характеристики генератора.

Ключевые слова: генератор с возбуждением от ПМ, коэффициент рассеяния индуктора, параметры обмотки якоря.

При проектировании автономных источников электроэнергии с магнито-электрическим возбуждением, находящихся в настоящее время широкое применение в таких областях, как ветроэнергетика, авиация, автомобильный и железнодорожный транспорт, является актуальной задача определения реактивностей обмотки якоря и коэффициента рассеяния магнитной системы таких преобразователей. Основой расчета этих параметров является вид кривой размагничивания постоянного магнита (ПМ) и его линия возврата [1]. В качестве ПМ в современных конструкциях электромеханических преобразователей используются высококоэрцитивные магниты, имеющие линейную кривую размагничивания, совпадающую при этом с линией возврата.

Поставленная задача решалась при создании синхронного генератора для энергоснабжения железнодорожного вагона, имеющего следующие данные: мощность $P = 8$ кВт; линейное напряжение $U = 380$ В; частота вращения $n = 350$ об/мин; число полюсов $2p = 12$; способ возбуждения – постоянные редкоземельные магниты марки $NdFeB N38H$, имеющие при температуре 80 °С остаточную индукцию $B_r = 1,16$ Тл и коэрцитивную силу $H_c = 750$ кА/м. На рис. 1 показан фрагмент магнитной системы генератора. ПМ намагничены по меньшей длине, имеют преобладание радиальной намагниченности, отделены от немагнитного зазора магнитомягкой электротехнической сталью марки 2412.

С целью определения рабочей точки магнита на кривой размагничивания при известной геометрии активной зоны СГ методом конечных элементов в программной среде *Elcut* проведено моделирование магнитного поля, включающее несколько этапов: режим холостого хода, продольная реакция якоря, поперечная реакция якоря.

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

Эдуард Галактионович Чеботков (к.т.н., доц.), доцент кафедры «Электромеханика и автомобильное электрооборудование».

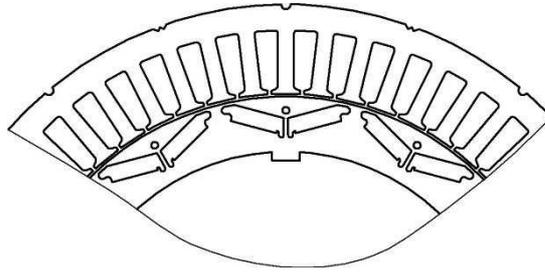


Рис. 1. Фрагмент магнитной системы синхронного генератора

При моделировании режима холостого хода источники поля задавались величиной коэрцитивной силы ПМ $H_c = 750$ кА/м с соответствующими направлениями осей намагничивания и относительной магнитной проницаемостью $\mu = 1,23$. Магнитные свойства сердечников якоря и индуктора заданы кривой намагничивания электротехнической стали. С целью сокращения времени расчета моделирование проводилось на протяжении двух полюсных делений. Граничное условие – на внешней поверхности сердечника статора, внутренней поверхности сердечника ротора и на боковых границах области (оси полюсов одной полярности) векторный магнитный потенциал $A = 0$. На рис. 2 приведены картина магнитного поля СГ при холостом ходе и кривая распределения нормальной составляющей индукции на середине воздушного зазора.

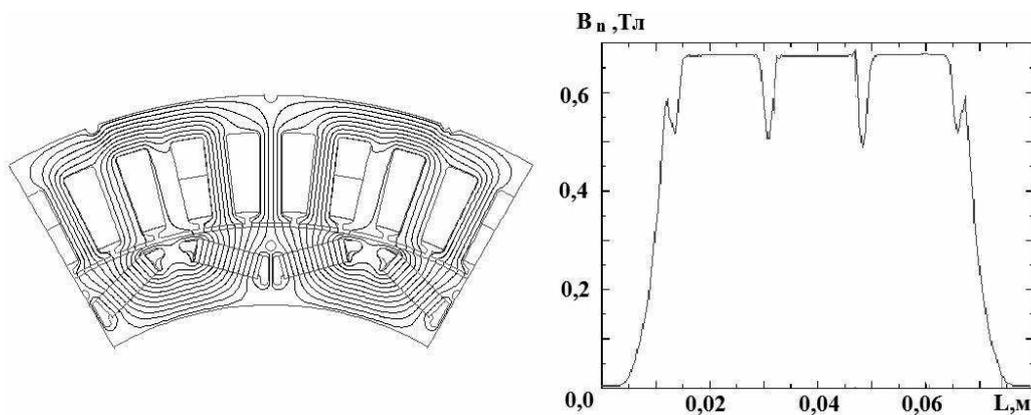


Рис. 2. Картина магнитного поля и кривая распределения индукции в режиме холостого хода

По итогам моделирования магнитного поля с использованием функции *fft* быстрого преобразования Фурье пакета *MathCad* определены следующие величины и параметры:

- магнитный поток в воздушном зазоре $\Phi_{\delta 0} = 0,00623$ Вб;
- магнитный поток в нейтральном сечении магнита $\Phi_m = 0,00834$ Вб;
- коэффициент рассеяния магнитов $k_{\sigma} = \Phi_m / \Phi_{\delta 0} = 1,338$;
- максимальное значение магнитной индукции в зазоре $B_{\delta m 0} = 0,679$ Тл;
- основная гармоническая индукции в зазоре $B_{\delta m 01} = 0,77$ Тл;

– коэффициент насыщения магнитной цепи

$$k_{\mu} = (F_{\delta} + F_{cm}) / F_{\delta} = 847/808 = 1,048.$$

Для определения влияния реакции якоря на поле постоянных магнитов (возбуждения) и индуктивных сопротивлений реакции якоря по продольной и поперечной осям осуществлено моделирование магнитного поля при продольном (когда магнитная ось фазы обмотки якоря совпадает с осью поля ПМ) и поперечном (когда ось фазы совпадает с поперечной осью поля возбуждения) положении индуктора. Источником поля в этих задачах является полный ток паза статора. На якоре генератора уложена двухслойная трехфазная обмотка следующих параметров: число пазов $z=54$, число полюсов $2p=12$, число пазов на полюс и фазу $q=1\frac{1}{2}$, шаг по пазам $y=4$ (укороченный) (см. таблицу).

Таблица обмотки и распределения пазов по фазным зонам на протяжении двух пар полюсов

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18
A	A	Z	B	B	X	C	C	Y	A	A	Z	B	B	X	C	C	Y
A	Z	Z	B	X	X	C	Y	Y	A	Z	Z	B	X	X	C	Y	Y

При моделировании ток в фазе A равен максимальному относительному значению $I_A = I_m = 1$, токи в фазах B и C $I_B = I_C = -\frac{\sqrt{3}}{2}$.

В случае продольной реакции якоря ось фазы $A-X$ совпадает с осью поля возбуждения и с серединой зубца статора. Граничные условия такие же, как в задаче холостого хода ($A=0$). На рис. 3 показано распределение линий магнитного поля продольной реакции якоря в генераторе и кривая нормальной составляющей индукции на середине воздушного зазора.

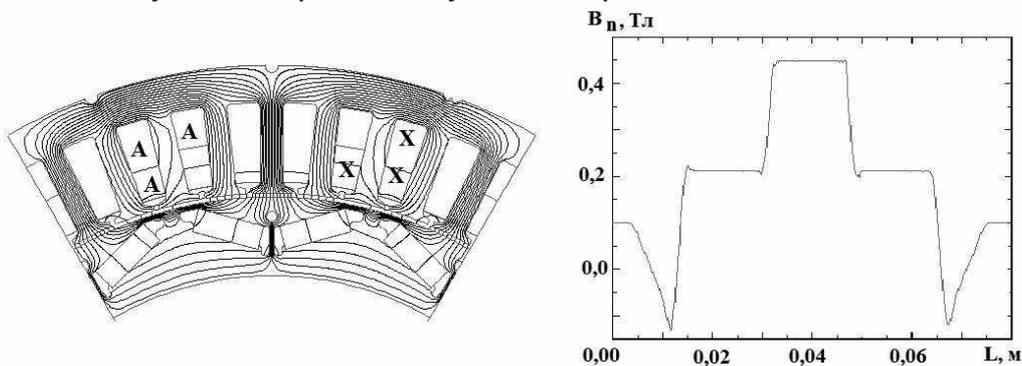


Рис. 3. Картина магнитного поля и кривая распределения индукции продольной реакции якоря

Анализируя результаты моделирования, можно видеть, что как в режиме холостого хода, так и при продольной реакции заметны сильно насыщенные участки магнитной цепи, индукция в которых достигает значения 2 Тл. По этим путям замыкаются потоки рассеяния ПМ. Существенное насыщение этих участков увеличивает магнитное сопротивление потокам рассеяния и приводит к уменьше-

нию коэффициента рассеяния магнитов. Гармонический анализ кривой распределения поля позволил определить:

– магнитный поток продольной реакции якоря в воздушном зазоре $\Phi_{ad} = 0,00246$ Вб;

– максимальное значение индукции продольной реакции якоря $B_{adm} = 0,45$ Тл;

– основную гармонику индукции в зазоре $B_{adm1} = 0,321$ Тл;

– коэффициент формы поля продольной реакции якоря

$$k_{ad} = B_{adm1} / B_{adm} = 0,321 / 0,45 = 0,713;$$

– основную гармонику магнитного потока продольной реакции

$$\Phi_{ad1} = \frac{2}{\pi} \cdot B_{adm1} \cdot \tau \cdot l_s = \frac{2}{\pi} \cdot 0,321 \cdot 0,0793 \cdot 0,16 = 0,00275 \text{ Вб};$$

– ЭДС продольной реакции якоря

$$E_{ad} = \pi \sqrt{2} f w k_{ob} \Phi_{ad1} = \pi \sqrt{2} \cdot 35 \cdot 288 \cdot 0,96 \cdot 0,00275 = 111,6 \text{ В};$$

– ненасыщенное значение индуктивного сопротивления продольной реакции якоря в абсолютных

$$x_{ad} = E_{ad} / I_d = 111,6 / 12,76 = 8,75 \text{ Ом}$$

и относительных единицах

$$x_{ad}^* = x_{ad} \frac{I_{\phi}}{U_{\phi}} = 8,75 \frac{12,76}{220} = 0,508.$$

На следующем этапе осуществлен расчет магнитного поля поперечной реакции якоря. В этом случае ось фазы $A-X$ совпадает с поперечной осью поля возбуждения и с серединой зубца статора. На границах области векторный магнитный потенциал $A = 0$. На рис. 4 показано распределение линий магнитного поля поперечной реакции якоря в генераторе и кривая нормальной составляющей индукции на середине воздушного зазора.

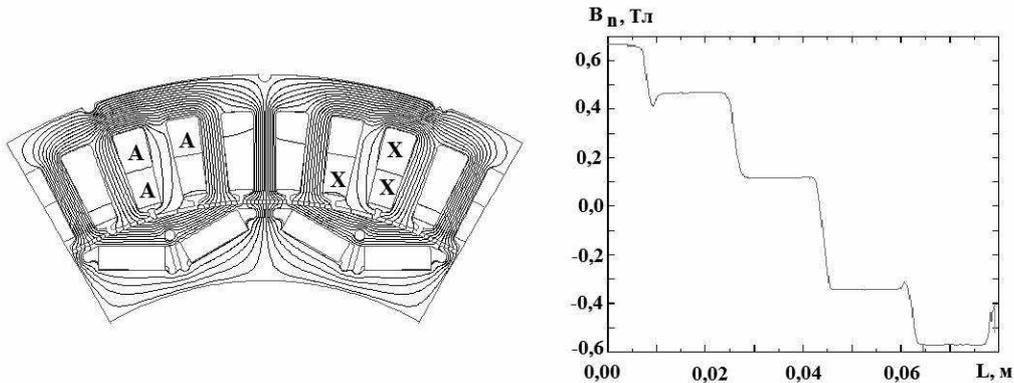


Рис. 4. Картина магнитного поля и кривая распределения индукции поперечной реакции якоря

По данным моделирования найдены параметры поля поперечной реакции якоря:

– магнитный поток поперечной реакции якоря в воздушном зазоре $\Phi_{aq} = 0,00486$ Вб;

– максимальное значение индукции поперечной реакции якоря $B_{aqm} =$

0,667 Тл;

– основная гармоника индукции в зазоре $B_{aqm1} = 0,602$ Тл;

– коэффициент формы поля поперечной реакции якоря

$$k_{aq} = B_{aqm1} / B_{aqm} = 0,602 / 0,667 = 0,903;$$

– основная гармоника магнитного поля поперечной реакции

$$\Phi_{aq1} = \frac{2}{\pi} \cdot B_{aqm1} \cdot \tau \cdot l_8 = \frac{2}{\pi} \cdot 0,602 \cdot 0,0793 \cdot 0,16 = 0,00485 \text{ Вб};$$

– ЭДС поперечной реакции якоря

$$E_{aq} = \pi \sqrt{2} f W k_{o\phi} \Phi_{aq1} = \pi \sqrt{2} \cdot 35 \cdot 288 \cdot 0,96 \cdot 0,00485 = 208,3 \text{ В};$$

– ненасыщенное значение индуктивного сопротивления поперечной реакции якоря в абсолютных

$$x_{aq} = E_{aq} / I_q = 208,3 / 12,76 = 16,33 \text{ Ом}$$

и относительных единицах

$$x_{aq}^* = x_{aq} \frac{I_{\phi}}{U_{\phi}} = 16,33 \frac{12,76}{220} = 0,947.$$

Как следует из анализа магнитного поля, для случаев продольной и поперечной реакции якоря соотношение между индуктивными сопротивлениями реакции якоря по продольной и поперечной осям в генераторе с магнитоэлектрическим возбуждением ($x_{ad} < x_{aq}$) имеет характер, противоположный явнополюсным СГ с электромагнитным возбуждением ($x_{ad} > x_{aq}$). Данное обстоятельство объясняется характерной ориентацией ПМ относительно зазора и их армированием магнитомягкой сталью. Знание значений этих параметров и коэффициента рассеяния магнитной системы СГ позволяет на стадии проектирования моделировать номинальный и другие режимы работы генератора.

Выводы

В результате моделирования магнитных полей индуктора и якоря генератора с возбуждением от постоянных магнитов установлено:

– ПМ имеют достаточный энергетический запас для обеспечения стабильной работы генератора при изменении нагрузки в широком диапазоне несмотря на существенную величину коэффициента рассеяния магнитной системы индуктора;

– данный генератор имеет более жесткую внешнюю характеристику и меньшую величину номинального изменения напряжения, чем генератор с электромагнитным возбуждением, за счет относительно малого индуктивного сопротивления реакции якоря по продольной оси;

– полученные результаты могут быть распространены на генераторы отличающейся мощности с идентичной геометрией активной зоны. Машины с другой конфигурацией статора и ротора могут быть исследованы посредством конечно-элементного моделирования по алгоритму, изложенному в статье.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Бут Д.А. Бесконтактные электрические машины. – М.: Высш. шк., 1990. – 416 с.
2. Высоцкий В.Е., Зубков Ю.В., Тулунов П.В. Математическое моделирование и оптимальное проектирование вентильных электрических машин. – М: Энергоатомиздат, 2007. – 340 с.

3. *Зубков Ю.В.* Расчет магнитного поля вентильного генератора совмещенного типа // Проблемы электротехники, электроэнергетики и электротехнологии: Труды 4-й Междунар. науч.-техн. конф., ч. 1. – Тольятти, 2012. – С. 40-46.

Статья поступила в редакцию 14 апреля 2015 г.

IDENTIFICATION OF PARAMETERS SYNCHRONOUS GENERATOR WITH PERMANENT MAGNETS BY MAGNETIC FIELD NUMERICAL SIMULATION

Yu.V. Zubkov, Ed. G. Chebotkov

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

In the paper the inductor dissipation factor and armature reactances of a permanent-magnet excitation synchronous generator are determined by magnetic-field numerical simulation. The patterns of the magnetic fields generated by the inductor and the armature windings are given. The distribution of induction in the centre of a non-magnetic gap is shown. The effect of PM dissipation and the ratio between the armature winding reactances lengthwise and widthwise on the generator characteristics is estimated.

Keywords: generator with excitation from the PM, inductor dissipation factor, armature winding parameters.