

МОДЕЛИРОВАНИЕ МАГНИТНОГО ПОЛЯ СИНХРОННОГО ГЕНЕРАТОРА С ПОСТОЯННЫМИ МАГНИТАМИ

В статье описывается подход к моделированию магнитного поля синхронных генераторов с постоянными магнитами. Высокий интерес в малой энергетике построения автономных источников питания делает актуальными задачи проектирования энергоэффективных конструкций синхронных магнитоэлектрических генераторов, в которых центральное место занимают исследование магнитного поля и определение оптимального закона изменения индукции в рабочем зазоре с последующим расчетом индуцированной электродвижущей силы (ЭДС) в фазных обмотках генератора. Технологическая сложность сборки синхронных генераторов с высококоэрцитивными постоянными магнитами, обусловленная значительными силами притяжения между конструктивными элементами якоря и индуктора, требует изготовления дополнительной оснастки и принятия мер безопасности персонала при проведении сборочных работ. В приведенной статье проведено исследование магнитного поля синхронного генератора с постоянными магнитами с использованием метода конечно-элементного анализа в комплексах программ ELCUT 6.0 и ANSYS Maxwell и предложена методика расчета индуцированной ЭДС в фазных обмотках синхронного генератора. Результаты расчета ЭДС фазных обмоток синхронного генератора сопоставлены с экспериментальными данными, полученными на лабораторном стенде.

Ключевые слова: магнитоэлектрическая машина, электродвижущая сила фазной обмотки синхронного генератора, конечно-элементный анализ магнитного поля.

Широкое применение магнитоэлектрических машин во многих отраслях промышленности связано с появлением на рынке доступных постоянных магнитов на основе неодимовых сплавов, обладающих большой коэрцитивной силой — более 800 кА/м и остаточной индукцией 0,8–1,4 Тл. В малой энергетике повысился интерес к разработке синхронных генераторов с постоянными магнитами. Электрогенератор с ротором на постоянных магнитах может быть построен по двум основным конструктивным схемам: аксиального типа с торцевым расположением постоянных магнитов и коаксиального типа с радиальным расположением магнитов и фазных обмоток статора. Одним из технических решений аксиального типа является разработка электрогенераторов на базе асинхронных электрических машин, у которых короткозамкнутый ротор заменен на индуктор, имеющий в своем составе постоянные магниты. Применение таких генераторов исключает использование редуктора в кинематической схеме комплекса, что позволяет уменьшить массо-габаритные показатели устройства, повысить его надежность и коэффициент полезного действия. Благодаря конструктивным особенностям асинхронной машины, таким как трехфазная обмотка статора, шихтованный магнитопровод и малый рабочий зазор, после замены короткозамкнутого ротора на индуктор с постоянными магнитами приведенное техническое решение обладает высокой технологичностью сборки, причем мощность синхронного генератора

зависит от магнитной индукции в рабочем зазоре в квадратичной степени [1–3].

Рассмотрим конструкцию бесколлекторного магнитоэлектрического генератора, представленного на рис. 1а. Синхронный генератор имеет индуктор 1 с постоянными магнитами 2 и якорь 3, представляющий собой магнитопровод с пазами 4, в которых размещена трехфазная обмотка 5. Индуктор от якоря отделен воздушным зазором δ и представляет собой немагнитный цилиндр с расположенными на нем постоянными магнитами, намагниченными в осевом направлении. Число полюсов р индуктора принято равным числу полюсов магнитного поля трехфазной обмотки с током якоря [4].

Результаты расчета плоскопараллельной модели магнитного поля синхронного генератора с постоянными магнитами при отсутствии тока в обмотке якоря (режим холостого хода генератора) в комплексе программ ELCUT 6.0 (магнитоэлектростатическая задача) представлены на рис. 1б.

Для моделирования результирующего магнитного поля под нагрузкой необходимо задать скорость вращения индуктора и характер нагрузки. Результаты моделирования результирующей картины магнитного поля с учетом реакции якоря в среде ANSYS Maxwell представлены на рис. 2.

Аналитический расчет индуцированной ЭДС в фазной обмотке генератора по разработанной методике [5] показывает, что мгновенное значение ЭДС в витке будет

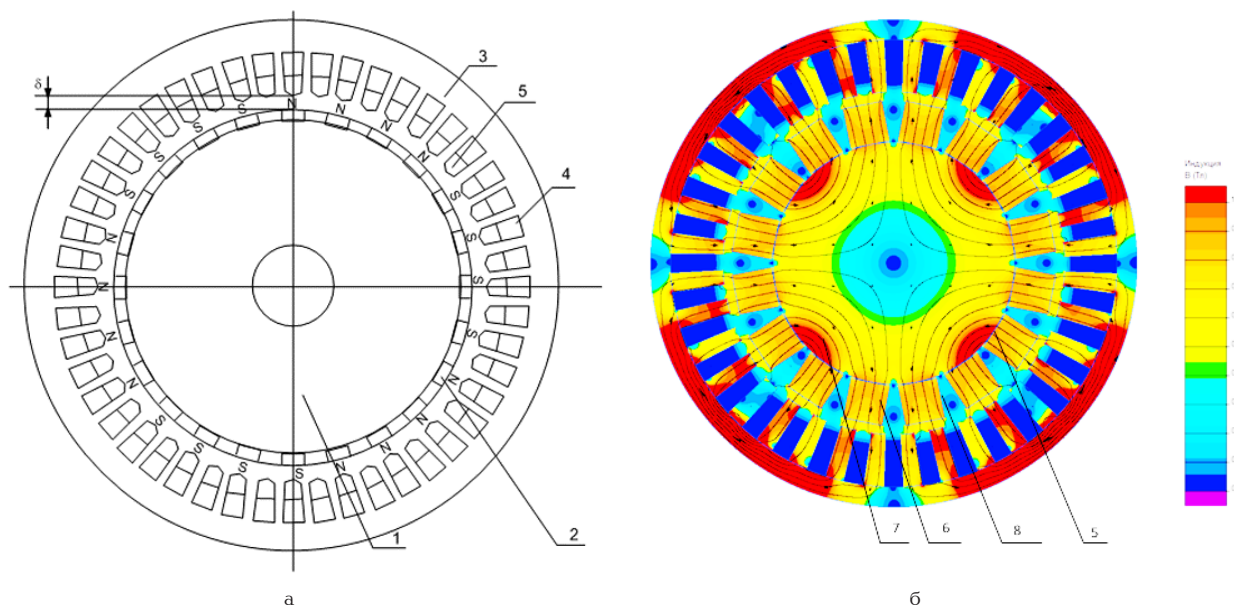


Рис. 1. Конструкция синхронного генератора (а) и картина магнитного поля генератора в режиме холостого хода в комплексе программ ELCUT 6.0 (б)

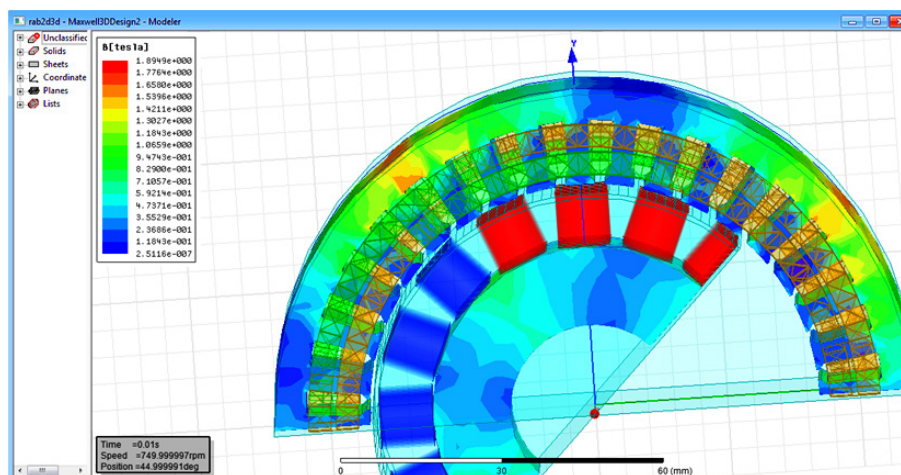


Рис. 2. Распределение вектора магнитной индукции в трехмерной модели магнитной системы синхронного генератора с постоянными магнитами

$$e = E_m \sqrt{1 - \left(1 - \frac{v}{R}\right)^2}. \quad (1) \quad \frac{\pi}{4} < \beta \leq \frac{3\pi}{8}, \quad \frac{3\pi}{8} < \beta \leq \frac{\pi}{2}, \text{ соответственно,}$$

Расчет по полученному выражению позволяет выявить форму временной зависимости ЭДС фазной обмотки синхронного генератора.

Для расчета амплитудного значения ЭДС фазной обмотки генератора используется следующее выражение:

$$E_m = 4k \cdot v \cdot B_{\max} \cdot Wd, \quad (2)$$

где W — число активных проводников в пазу; v — скорость вращения индуктора, об/мин; k — число магнитов по длине ротора; d — диаметр магнита, м; $B_{\max}$ — наибольшее значение индукции, Тл.

В зависимости от угла β поворота индуктора можно определить значения переменной составляющей индуцированной ЭДС в витках фазной обмотки якоря. При изменении угла β значения магнитной индукции будут $-\frac{\pi}{8} \leq \beta \leq \frac{\pi}{8}$, $\frac{\pi}{8} < \beta \leq \frac{\pi}{4}$,

$$B_{01} = \sin(8\beta), \quad B_{01} = -0,815 \sin(8\beta),$$

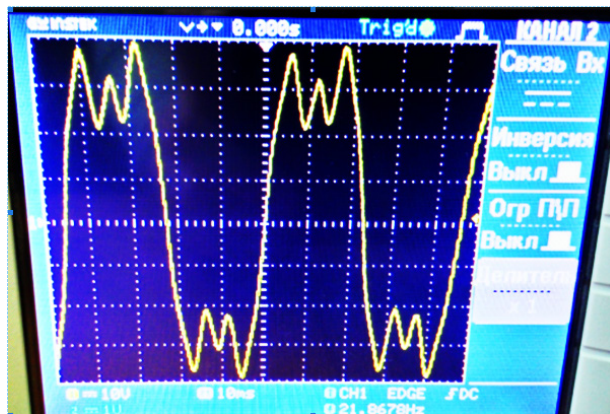
$$B_{01} = 0,815 \sin(8\beta), \quad B_{01} = -\sin(8\beta). \quad (3)$$

С учетом геометрического сдвига постоянных магнитов индуктора значения B_{02} и B_{03} рассчитываются по (3) для начальных значений $\beta = -\frac{13\pi}{72}$ и $\beta = -\frac{17\pi}{72}$ соответственно.

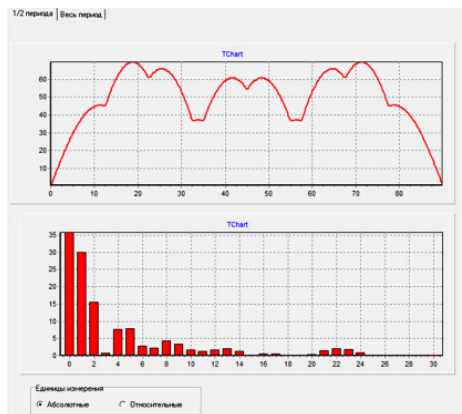
Индуктированное значение ЭДС в фазной обмотке якоря бесколлекторной магнитоэлектрической машины можно определить по формуле

$$E = E_m (B_{01} + B_{02} + B_{03}). \quad (4)$$

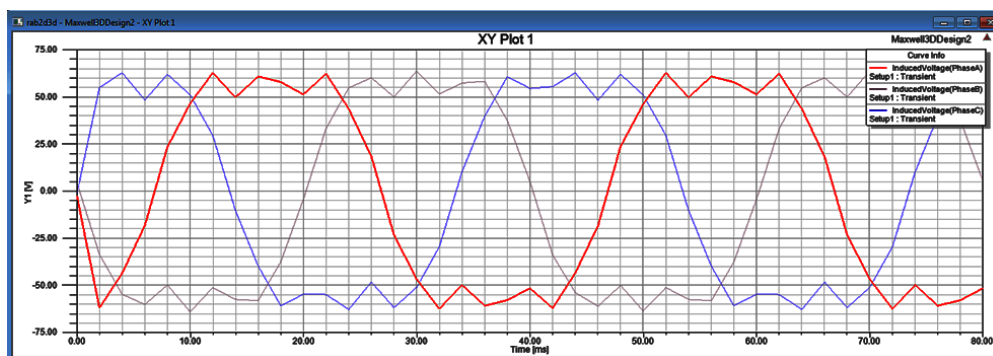
На рис. 3 представлены результаты эксперимента опытного образца синхронного генератора с постоянными магнитами (а), аналитического



а

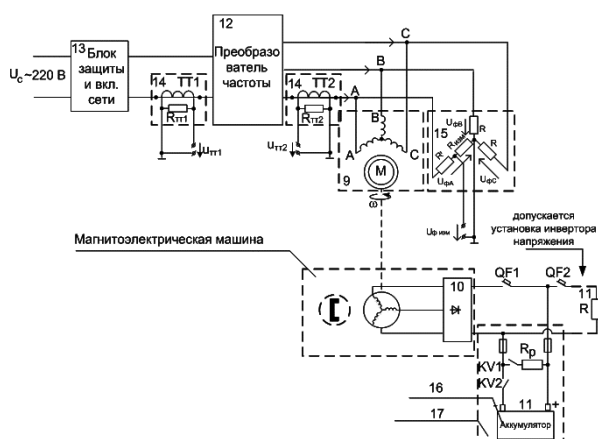


б



в

Рис. 3. Временные зависимости индуцированной ЭДС синхронного генератора с постоянными магнитами: а — осциллограмма напряжения фазной обмотки опытного образца синхронного генератора; б — результаты аналитического расчета ЭДС фазной обмотки синхронного генератора; в — временная диаграмма ЭДС фазной обмотки синхронного генератора, полученная на основе численного расчета трехмерной модели его магнитного поля в пакете ANSYS Maxwell



а



б

Рис. 4. Электрическая схема (а) и внешний вид лабораторного стенда (б) по исследованию характеристик опытного образца синхронного генератора

расчета ЭДС фазной обмотки якоря (б) и результатов расчета, полученных при исследовании магнитного поля в программном комплексе ANSYS Maxwell (в).

На рис. 4 представлена электрическая схема лабораторного стенда для исследования характеристик опытного образца синхронного генератора с постоянными магнитами. Экспериментальная внешняя характеристика синхронного генератора при различной скорости вращения индуктора пред-

ставлена на рис. 5. Анализ полученных в ходе эксперимента данных позволяет определить оптимальный режим работы опытного образца синхронного генератора с постоянными магнитами (рис. 6).

Выводы.

1. Предложена конструкция синхронного генератора, защищенная патентом на полезную модель № 151437 от 10.04.2015.

2. Разработано и зарегистрировано в Фонде интеллектуальной и промышленной собственности

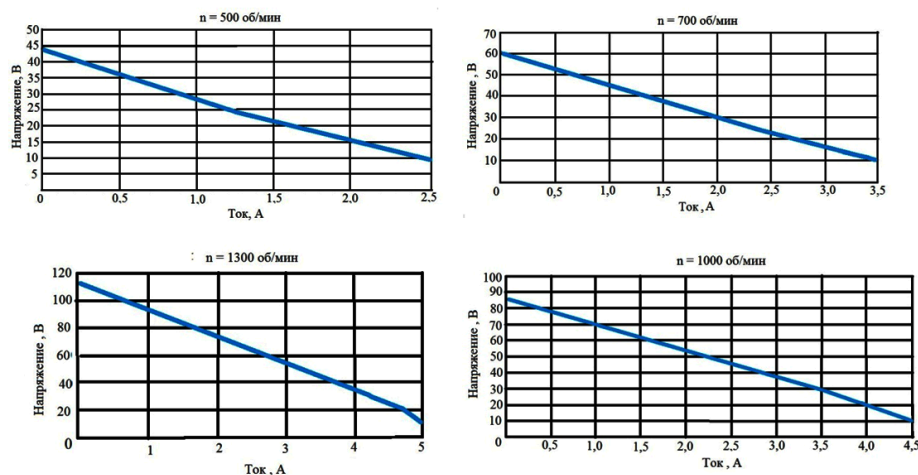


Рис. 5. Результаты экспериментального исследования внешней характеристики синхронного генератора с постоянными магнитами

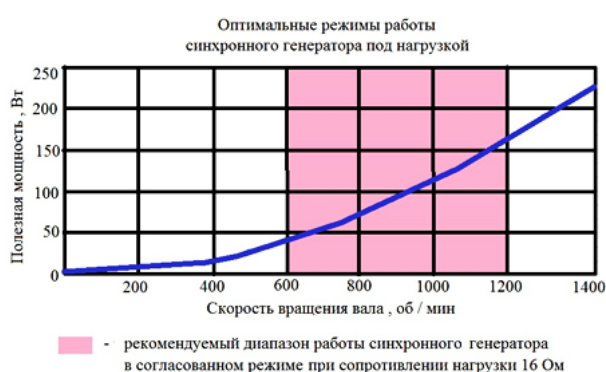


Рис. 6. Область оптимального режима работы синхронного генератора под нагрузкой (заряд аккумуляторной батареи)

программное обеспечение по расчету индуктированной ЭДС в обмотке магнитоэлектрического генератора № 2015612665.

3. Создан опытный образец синхронного генератора на высококоэрцитивных постоянных магнитах из редкоземельного сплава NdFeB.

4. Разработаны лабораторный стенд и методика испытаний синхронного генератора в режимах холостого хода и под нагрузкой.

5. Получены экспериментальные характеристики синхронного генератора под нагрузкой и определены оптимальные условия его работы для обеспечения максимума полезной мощности.

6. Проведенные исследования позволили разработать методику расчета оптимальных конструкций синхронных генераторов полезной мощностью от 1 до 3 кВт.

Библиографический список

1. Кулагин, Р. Н. Анализ конструкций тихоходных генераторов с постоянными магнитами / Р. Н. Кулагин // Известия

Волгоградского государственного технического университета : межвуз. сб. науч. ст. / ВолгГТУ. — Волгоград, 2011. — № 13 (86). — С. 79–80. — (Сер. Прогрессивные технологии в машиностроении. Вып. 7).

2. Корнеев, В. В. Проектирование синхронных машин с постоянными магнитами / В. В. Корнеев ; науч. рук. А. Г. Приступ // Радиоэлектроника, электротехника и энергетика : XX Междунар. науч.-техн. конф. студентов и аспирантов, Москва, 27–28 февр. 2014 г. : тез. докл. — М. : Издат. дом МЭИ, 2014. — Т. 2. — С. 137.

3. Кулешов, Е. В. Магнитоэлектрический синхронный генератор на базе асинхронной машины для автономной ветроэлектрической установки : автореф. ... канд. техн. наук / Кулешов Евгений Валериевич. — Владивосток : Изд-во ДВГТУ, 2001. — 20 с.

4. Пат. 151437 РФ, МПК Н 02 К 23/04. Магнитоэлектрическая машина / Татевосян А. А., Татевосян А. С. ; заявитель и патентообладатель ФГБОУ ВПО «Омский государственный технический университет». — № 2014134571 ; заявл. 22.08.2014 ; опубл. 04.03.2015.

5. Свидетельство № 2015612665 РФ. Расчет индуктированной электродвижущей силы (ЭДС) синхронного магнитоэлектрического генератора на базе асинхронной электрической машины : свидетельство об офиц. регистрации программы для ЭВМ / Татевосян А. А., Огорелков Б. И. ; заявитель и правообладатель ФГБОУ ВПО «Омский государственный технический университет». — № 2014663558 ; заявл. 25.12.2014 ; зарегистр. 24.02.2015. — 1 с.

ТАТЕВОСЯН Андрей Александрович, кандидат технических наук, доцент (Россия), доцент кафедры электрической техники, декан Энергетического института.

Адрес для переписки: karo1@mail.ru

МИЩЕНКО Владимир Сергеевич, магистрант гр. ЭЭм-152 факультета элитного образования и магистратуры.

Адрес для переписки: vladimir_mi@inbox.ru

Статья поступила в редакцию 20.04.2016 г.

© А. А. Татевосян, В. С. Мищенко