

УДК 621.313.8

МЕТОДИКА РАСЧЕТА МАГНИТНОЙ СИСТЕМЫ ТОРЦЕВЫХ СИНХРОННЫХ МАГНИТОЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ГЕНЕРАТОРОВ

Е. А. Монахов, В. В. Чумак

Национальный Технический Университет Украины «Киевский Политехнический Институт»
просп. Победы, 37, корп. 20, г. Киев, 03056, Украина E-mail: emonachov@gmail.com; chumack_kpi@ukr.net

Рассмотрен инженерный расчет магнитной системы одностороннего торцевого магнитоэлектрического генератора с призматической формой магнитов. Представлен порядок расчета, а также типовой пример расчета. Рассмотрена универсальная методика расчета данного класса машин и проведено сравнение с трехмерной полевой моделью в специализированном программном пакете. В качестве объекта исследований выбран магнитоэлектрический генератор с односторонней магнитной системой, позволяющий создать конструкцию с повышенными требованиями по герметичности. По расчетам и результатам моделирования изготовлен и испытан опытный образец торцевого генератора. Сравнение экспериментальных и расчетных данных показало сходимость по основным величинам в пределах 7–10 %, что является высоким результатом при расчете электрических машин с возбуждением от постоянных магнитов. Данная инженерная методика позволяет проводить удовлетворительный по точности расчет без применения трудоемких полевых методов.

Ключевые слова: торцевой, магнитоэлектрический генератор, расчет.

МЕТОДИКА РОЗРАХУНКУ МАГНІТНОЇ СИСТЕМИ ТОРЦЕВИХ СИНХРОНИХ МАГНІТОЕЛЕКТРИЧНИХ ГЕНЕРАТОРІВ

Є. А. Монахов, В. В. Чумак

Національний Технічний Університет України «Київський політехнічний інститут»
просп. Перемоги, 37, корп. 20, м. Київ, 03056, Україна E-mail: emonachov@gmail.com; chumack_kpi@ukr.net

Розглянуто інженерний розрахунок магнітної системи одностороннього торцевого магнітоелектричного генератора з призматичною формою магнітів. Приведений порядок розрахунку, а також типовий приклад розрахунку. Розглянута універсальна методика розрахунку даного класу машин і проведено порівняння з тривимірною польовою моделлю у спеціалізованому програмному пакеті. Об'єктом дослідження обрано магнітоелектричний генератор з односторонньою магнітною системою, яка дозволяє створити конструкцію з підвищеними вимогами до герметичності. За розрахунками та результатами моделювання виготовлено та випробувано дослідний зразок торцевого генератора. Порівняння експериментальних і розрахункових даних показало збіжність за основними величинами в межах 7–10 %, що є високим результатом при розрахунку електричних машин зі збудженням від постійних магнітів. Дана інженерна методика дозволяє проводити задовільний за точністю розрахунок без застосування трудомістких польових методів.

Ключові слова: торцевий, магнітоелектричний генератор, розрахунок.

АКТУАЛЬНОСТЬ РАБОТЫ. Современный этап развития электромеханики характеризуется возрастающим применением специальных электрических машин, в частности магнитоэлектрических генераторов, с малой аксиальной длиной, двигателей – генераторов в технологических процессах, позволяющих использовать принцип обратимости электрических машин, а также в тепловых установках, работающих на низкопотенциальной энергии, ветроустановках и установках для микротурбин [1].

В связи со значительным разнообразием соответствующих конструкций электрических машин, адаптированных под конкретные системы имеет смысл рассмотреть такой класс электромеханических преобразователей, как торцевые магнитоэлектрические двигатели или генераторы с односторонней или двухсторонней магнитной системой.

Требуется создание универсальных методик расчета для такого класса машин, а также ее уточнение с помощью численных методов и сравнение с экспериментальными данными изготовленных образцов для установления достоверности апробированной методики расчета.

Данные вопросы были предметом внимания работ [2–7]. Однако универсальной методики для расчета торцевых магнитоэлектрических генераторов с различной конфигурацией магнитной системы на

существующий момент нет.

Цель работы – на примере синхронного магнитоэлектрического генератора с призматическими магнитами разработать методику на основе синтеза существующих перечисленных методик и провести уточнение созданной методики полевыми методами.

МАТЕРИАЛ И РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ. Рассмотрен расчет синхронного генератора с малой аксиальной длиной с возбуждением от постоянных магнитов.

Рассмотрим конкретную конструкцию магнитоэлектрического синхронного генератора с односторонней магнитной системой [8], изображенную на рис. 1.

В качестве примера расчета выбран прототип торцевого магнитоэлектрического генератора на основе редкоземельных магнитов NdFeB N38H.

$$P_{\text{ном}} = 14 \text{ Вт}, U_{\phi} = 12 \text{ В}, n_1 = 1000 \text{ об/мин}, \\ f = 50 \text{ Гц}, m = 1$$

Ротор выполнен из конструкционной стали марки 3, статор из стали марки 1211.

Особенности магнитной системы:

- магнитная система явнополюсная;
- форма полюсов – призматическая;
- количество пар полюсов $2p=6$;

- форма выходного напряжения синусоидальная;
- расчет магнитной системы приводится на пару полюсов;
- определение положения рабочей точки на диа-

грамме магнита осуществляется без учета действия реакция якоря, поскольку последняя ничтожно мала по сравнению с коэрцитивной силой магнита.

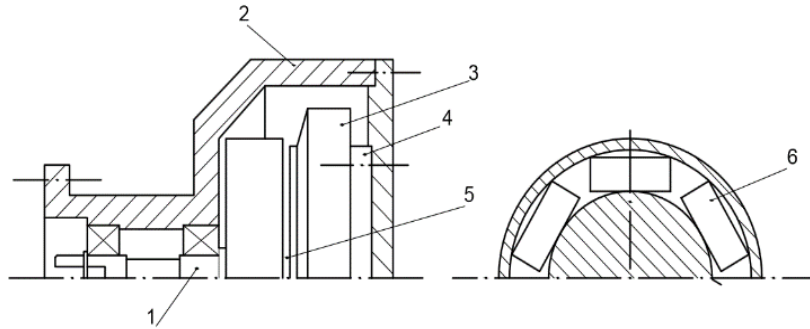


Рисунок 1 – Торцевая магнитоэлектрическая машина
1 – вал, 2 – корпус, 3 – обмотка, 4 – статор, 5 – воздушный зазор, 6 – постоянный магнит

Габариты машины приведены ниже:

- внешний диаметр сердечника статора,
- ;
- внутренний диаметр сердечника статора,
- ;
- длина сердечника статора,

2.1. Алгоритм расчета магнитной системы торцевого магнитоэлектрического генератора. Определение конструктивных параметров магнитной системы приведены в табл. 1.

Таблица 1 – Конструктивные параметры магнитной системы

Параметр	Формула
Среднее полюсное деление ротора	_____
Предварительная ширина дуги	_____
Площадь поперечного сечения магнита	_____
Площадь под полюсами в направлении основного магнитного потока	_____
Длина силовой линии в спинке статора	_____
Площадь сечения спинки статора	_____
Определение площади спинки индуктора	_____

Определение проводимости потоку рассеяния и коэффициента рассеяния производилось с помощью полевых методов.

Коэффициент рассеяния – это отношение полного потока к полезному(рабочему) потоку

Под полезным потоком будем понимать поток, который проходит через «воображаемую» плоскость, которая параллельна плоскости призматиче-

ского магнита и равна последней. Под полным потоком будем понимать полезный поток, а также потоки рассеяния: потоки на боковых гранях магнита.

Поток определялся как интеграл по поверхности:

По результатам моделирования:

- рабочий поток:
- суммарный поток:

Тогда коэффициент рассеяния по результатам моделирования составляет:

Формулы для аналитического расчета проводимостей и коэффициента рассеяния представлены в табл. 2.

Таблица 2 – Проводимости и коэффициент рассеяния

Параметр	Формула
Проводимость основного потока	_____
Средняя проводимость между торцами внешних граней	_____
Средняя проводимость между торцами внутренних граней	_____
Проводимость рассеивания магнита	_____
Коэффициент рассеяния	_____

Результаты расчета конструктивных параметров,

проводимостей, коэффициента рассеяния приведены в табл. 3.

Таблица 3 – Результаты расчета конструктивных параметров, проводимостей, коэффициента рассеяния

Параметр	Величина

Отклонения между коэффициентом рассеяния, полученном при моделировании и аналитическом расчете:

2.2. *Определение индукции.* Порядок расчета магнитной цепи приведен в табл. 4.

Таблица 4 – Порядок расчета магнитной цепи

Параметр	Формула
Индукция в воздушном зазоре	_____
Индукция в спинке статора	_____
Индукция в спинке индуктора	_____
МДС воздушного зазора	—
МДС спинки статора	
МДС спинки индуктора	
Суммарная МДС	

2.3. *Результаты расчета магнитной системы и*

ее элементов. Результаты расчета магнитной системы приведены в табл. 5.

Таблица 5 – Результаты расчета

Параметр	Значение			
	0,6	0,7	0,8	0,9
	0,318	0,371	0,424	0,477
	0,856	0,998	1,141	1,284
	0,329	0,384	0,439	0,494
	379,9	443,2	506,5	569,9
	352	491	720	1070
	6,44	8,99	13,18	19,59
	250	304	344	392
	7,065	8,591	9,721	11,07
	393,4	460,8	529,4	600,5

2.4. *Определение положения рабочей точки на диаграмме магнита.* Положение рабочей точки М (____, ____) на диаграмме магнита определяются по данным рис. 2 по методике [9, 10].

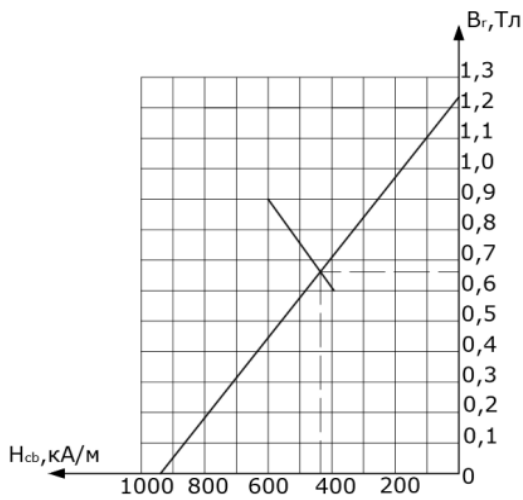


Рисунок 2 – Положение рабочей точки М (____, ____) на диаграмме магнита

Значение рабочей точки (____ и ____) приведено в табл. 6.

Таблица 6 – Рабочая точка постоянного магнита

Обозначение параметра	Величина
	0,661
	435

Определение индукции в рабочем зазоре:

Магнитный поток в воздушном зазоре:

Определим величину ЭДС холостого хода:

По результатам расчета был спроектирован и изготовлен торцевой синхронный генератор и испытан в лаборатории микромашин кафедры электрических машин, КПИ. Сравнение расчетных и эксперимен-

тальных данных приведено в табл. 7.

Таблица 7 – Сравнение результатов

ЭДС холостого хода	23,94 В
Напряжение х.х. (модель)	21,6 В
Напряжение х.х. (эксперимент)	21,2 В

Как видно из табл. 7, величина холостого хода почти в два раза превышает номинальное напряжение. Вопрос регулирования напряжения не рассмотрен в данной статье. На рис. 3 представлена внешняя характеристика испытуемого генератора.

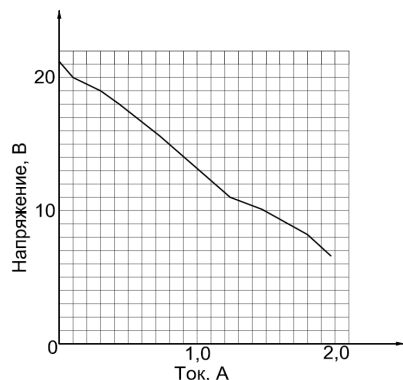


Рисунок 3 – Внешняя характеристика

ВЫВОДЫ. Использование полевых методов дает наилучшие результаты, однако использование полевых методов требует мощные вычислительные ресурсы и необходимую квалификацию. Тем не менее, разработанная методика для расчета данного типа одностороннего генератора торцевой конструкции с призматическими магнитами показывает высокие результаты сходимости.

METHOD OF CALCULATION OF THE MAGNETIC SYSTEM OF THE AXIAL FLUX PERMANENT MAGNET

I. Monakhov, V. Chumack

National Technical University of Ukraine “Kyiv Polytechnic Institute”

prosp. Pobedi, 37, Kyiv, 03056, Ukraine E-mail: emonachov@gmail.com; chumack_kpi@ukr.net

The article reports on the engineering method of calculation of the magnetic system of one-sided axial-flux permanent magnet generator with prismatic magnets. It presents the algorithms of calculation, also it present typical example of calculation. It considers universal method of calculation of this type of machines. Also it was compared with three – dimensional field model in special programs. The object of research is permanent magnet generator with one – sided magnetic system, which allows design constructions with high demand on tightness. According to results of calculation and simulation a prototype of axial-flux generator was produced and tested. Comparison of experimental and calculated data showed the convergence on the basic values at 7-10%, which is high result in the design of electric machine with excitation of permanent magnets. This engineering method allows to provide a sufficient accuracy without applying a time – consuming methods of field simulation.

Key words: axial flux, generator, calculation, permanent magnet

REFERENCES

1. Andres S. Holmes, Guodong Hong, Keith R. Pullen (2005), “Axial-flux permanent magnet micropower generation”, *Journal of microelectromechanical systems*, vol. 4, no. 1, pp. 54–62.

2. Kaftanaty, V. (2014), “Theoretical research and calculation of one phase micro generator for robotics”, *Energia – XXI*, no. 1-2, pp. 116–130.

3. Shishkin, V. (2006) *Avtomatizirovannoe proektirovanie torcovykh magnitoelektricheskikh generatorov peremennogo toka* [Computer-aided design of axial – flux permanent magnet alternative generators], Ivanovo Power Engineering Institute named after V.I.Lenin, Ivanovo, Russia.

4. Palastin, M.(1972), *Ehlektricheskie mashiny avtonomnykh istochnikov pitaniya* [Electrical machines for autonomous energy sources], Energia, Moscow.

5. Chumack, V., Monakhov, I. (2014), “Axial-flux permanent magnet machine”, *Energia – XXI*, no.1-2, pp. 140–142.

ЛИТЕРАТУРА

1. Andres S. Holmes, Guodong Hong, Keith R.Pullen. Axial-flux permanent magnet micropower generation // *Journal of microelectromechanical systems*. – 2005. – Vol. 4, № 1. – PP. 54–62.

2. Кафтантаий В.Т. Теоретические исследования и расчет микроминиатюрного синхронного однофазного генератора для изделия робототехники// *Энергия–XXI*. – 2014. – № 1-2. – С. 116–130.

3. Шишкин В.П. Автоматизированное проектирование торцовых магнитоэлектрических генераторов переменного тока. – Иваново: Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина, 2006. – 68 с.

4. Паластин Л.М. Электрические машины автономных источников питания. – М.:Энергия, 1972. – 463 с.

5. Cavagnino A., Lazzari M., Profumo F., and Tenconi A. A comparison between the axial-flux and the radial flux structures for PM synchronous motors // *IEEE Trans. Ind. Appl.* – 2002. – Vol. 38, № 6. – PP. 1517–1524.

6. Jacek F. Gieras, Rong-Jie, Wang, Maarten J. Kamper (2008) *Axial Flux Permanent Magnet Brushless Machines*, Springer, USA.

7. Ramu Krishnan (2009), *Permanent Magnet Synchronous and Brushless DC Motor Drives*, CRC Press, USA.

8. Чумак В.В., Монахов Е.А. Торцевая магнитоэлектрическая машина // *Энергия–XXI*. – 2014. – № 1-2. – С. 140–142.

9. Постоянные магниты: справочник / Под ред. Ю.М. Пятина. – М.: Энергия, 1971. – 375 с.

10. Арнольд Р.Р. Расчет и проектирование магнитных систем с постоянными магнитами. – М.: Энергия, 1969. – 184 с.

Стаття надійшла 23.02.2015.