

УДК 621.313.8

В.В.Чумак, канд.техн.наук, **О.Л.Тимошук**, канд.техн.наук, **Е.А.Монахов** (Национальный технический университет Украины "КПИ", Киев)

Цепи-полевая модель магнитоэлектрического синхронного торцевого генератора для автономных энергоустановок

В статье рассмотрена цепи-полевая модель торцевого магнитоэлектрического генератора малой мощности с односторонней магнитной системой, которая позволяет получить внешние характеристики при активной и активно-индуктивной нагрузке при коэффициенте мощности 1 и 0,909 соответственно. Цепи-полевые модели позволяют рассматривать динамические режимы работы и анализировать работу электрических машин нестандартных конструкций. Данная комбинированная модель позволяет проводить оптимизацию предложенной конструкции во время проектирования с учетом величины и типа нагрузки.

Ключевые слова: цепи-полевая модель, торцевой генератор.

В статті розглянуто коло-польову модель торцевого магнітоелектричного генератора малої потужності з односторонньою магнітною системою, яка дозволяє отримати зовнішні характеристики для активного та активно-індуктивного навантаження при коефіцієнті потужності 1 та 0,909 відповідно. Коло-польові моделі дозволяють розглядати динамічні режими роботи та аналізувати роботу електричних машин нестандартних конструкцій. Дана комбінована модель дозволяє проводити оптимізацію запропонованої конструкції під час проектування з урахуванням величини та типу навантаження.

Ключові слова: коло-польова модель, торцевий генератор.

С каждым годом применение магнитоэлектрических машин растет в связи с их высокими энергетическими и массогабаритными показателями, значительной надежностью и децентрализацией энергосистем в передовых странах мира. В первую очередь, магнитоэлектрические машины применяются для малых и средних по мощности автономных систем энергообеспечения, так как они имеют ряд преимуществ по сравнению с классическими электрическими машинами [1]:

- высокие массогабаритные показатели;
- отсутствие потерь на возбуждение и, как следствие, более высокий коэффициент полезного действия;
- отсутствие щеточного контакта и, как следствие, более высокую надежность.

Следует заметить, что автономные системы предполагают более высокий уровень надежности и мобильности по сравнению с машинами общего назначения. В качестве объекта исследования выбрана торцевая магнитоэлектрическая машина, которая имеет следующие преимущества по сравнению с традиционной машиной с цилиндрической расточкой статора [2]:

- высокие удельные массогабаритные показатели;
- плоский воздушный зазор, что, в свою очередь, позволяет изменять его для уменьшения разброса характеристик [3];
- возможность регулирования или стабилизации внешней характеристики путем изменения величины немагнитного зазора, что невозможно в цилиндрической конструкции;
- возможность размещения большого количества пар полюсов благодаря относительно большому диаметру, что является актуальным для низкоскоростных энергетических комплексов, таких как безредукторные ветроустановки [4], для малых гидроэлектростанций [5] и пр.;
- дополнительные преимущества сочленения торцевой конструкции с приводным механизмом.

Поскольку генераторы общего назначения обычно работают параллельно с сетью, то влияние несимметричной нагрузки не является существенным фактором для работающей машины вследствие постоянного перетока мощностей. Однако в автономных системах величина и ха-

рактик нагрузок существенно влияют на рабочий режим электрической машины. Поэтому вопрос учета нагрузки для автономных энергосистем имеет важное значение. Целью данного исследования является вопрос создания модели торцевого магнитоэлектрического генератора, которая могла бы отобразить не только электромагнитные процессы, протекающие в машине, но и оценить влияние характера нагрузки при анализе для оптимального проектирования. Для этого была создана трехмерная цепи-полевая модель исследуемой машины в программной среде ANSYS Maxwell [6].

Для упрощения исследований была выбрана торцевая магнитоэлектрическая машина с односторонней магнитной системой с призматическими магнитами как наиболее простая.

На рис. 1 показана трехмерная полевая модель исследуемого генератора.

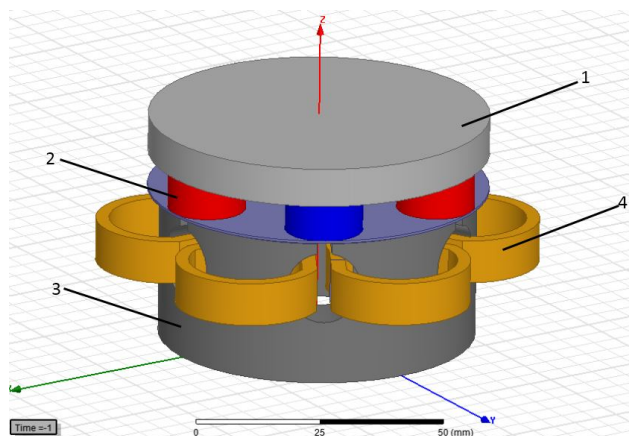


Рис. 1. Трехмерная полевая модель торцевого магнитоэлектрического генератора: 1 – статор; 2 – ротор; 3 – обмотка; 4 – постоянные магниты.

Исходные данные для моделирования приведены в таблице 1.

Таблица 1. Исходные данные

Параметр	Значение
ПМ	NdFeB N38H: $B_r = 1,21$ Тл, $H_c = 939$ кА/м
Материал ротора	Сталь 3
Материал статора	Сталь 1211
Количество витков в катушке	110
Частота вращения	1000 об/мин
2p	6

При моделировании были приняты следующие допущения:

1. Не учитывались потери от вихревых токов в активных частях электрической машины.
2. Статор выполнен массивным.
3. Обмотка статора представляется массивной, одновитковой (в расчетной области разбивается на W витков).

Цепи-полевые математические модели позволяют исследовать динамические режимы работы электрических машин. В свою очередь, они позволяют рассчитывать динамические режимы без необходимости использования переходных параметров электрической машины, а их динамические характеристики рассчитываются непосредственно в результате решения цепи-полевой математической модели как неизвестные функции времени. Прежде всего, цепи-полевые модели необходимы при анализе динамических режимов, так как установившиеся процессы могут быть проанализированы с использованием концепций электромагнитных параметров электрических машин [7].

Математическая связь между уравнениями электромагнитного поля и электрических цепей обмоток осуществляется через значение магнитного потенциала по следующей формуле [7]:

$$\psi_\phi = \frac{w \cdot 2 \cdot l_n}{S_n} \int_{S_q} A \cdot dS,$$

где S_n – площадь паза; l_n – длина паза; A – значение векторного магнитного потенциала.

Граничные условия. На поверхности расчетной области для векторного потенциала задаются однородные граничные условия первого рода:

$$A|_G = 0.$$

На внешних границах расчетной области задаются условия непрерывности векторов поля.

Начальные условия. Начальные условия необходимы при решении нестационарных задач, зависящих от времени. При этом необходимо задать начальные условия – значения полевой функции в середине области в начальный момент времени.

$$A(x, y, z, t)|_{t=0} = A(x, y, z, 0).$$

Для создания именно цепи-полевой модели дополнительно было использовано программное обеспечение *ANSYS Maxwell Circuit*, которое соз-

дает связь между клеммами обмотки трехмерной полевой модели и электрической схемой. На рис. 2 показана электрическая схема, собранная в *ANSYS Maxwell Circuit*.

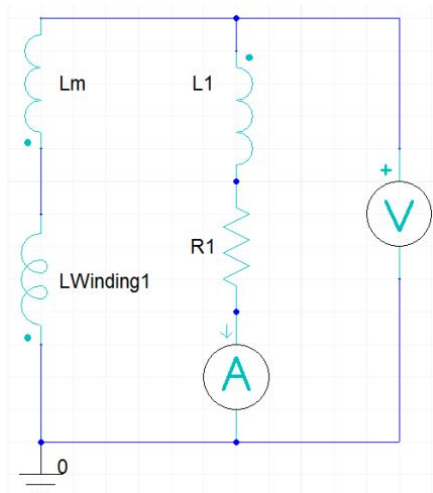


Рис. 2. Электрическая цепь исследуемого генератора.

В схеме *LWinding1* обозначает обмотку исследуемого генератора. В электрическую цепь посредством элемента *LWinding1* передаются данные о генераторе (индуцируемое напряжение, активное, индуктивное сопротивление). *Lm* – индуктивность взаимной индукции лобовых частей, добавлено в цепь, так как оно напрямую не учтено в модели. Сопротивления *R1* и *L1* – это нагрузочные сопротивления, которые по своей сути являются конечным потребителем.

В качестве первого приближения и оценки адекватности модели было сделано полевое моделирование при чисто активной нагрузке, т.е. коэффициент мощности составил 1. На рис. 3 показана внешняя характеристика генератора.

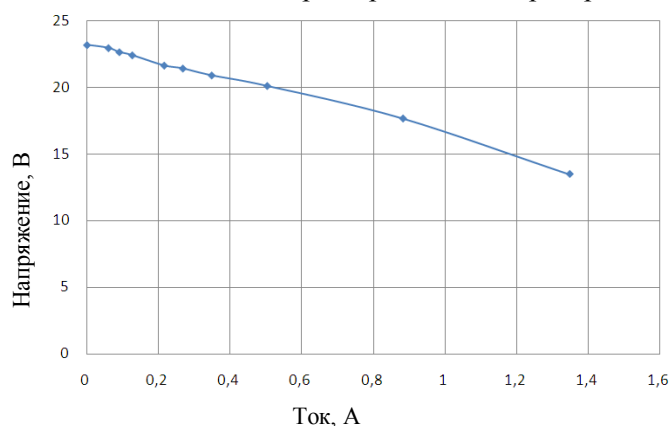


Рис. 3. Внешняя характеристика при активной нагрузке.

Для подтверждения адекватности модели по результатам аналитических расчетов и полевого моделирования был изготовлен и испытан синхронный магнитоэлектрический торцевой генератор мощностью 14 Вт.

На рис. 4 показаны внешние характеристики генератора при активной нагрузке по результатам эксперимента (кривая б) и по результатам моделирования (кривая а) для сравнения.

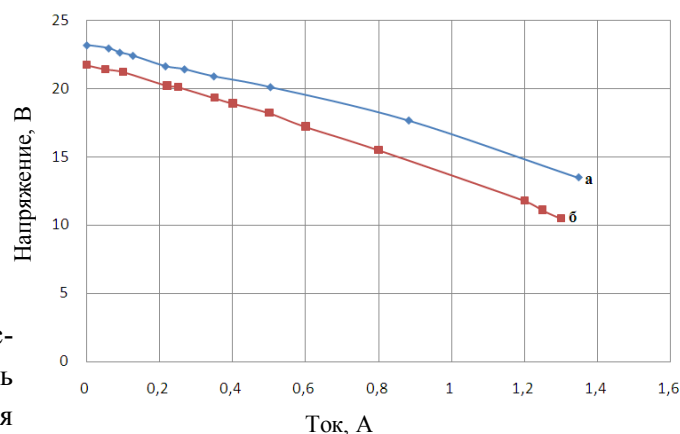


Рис. 4. Внешняя характеристика генератора при активной нагрузке: а – по результатам моделирования; б – по результатам эксперимента.

Из сравнения характеристик видно, что погрешность составила менее 10%, что подтверждает адекватность модели и позволяет проводить дальнейшие исследования при активно-индуктивной нагрузке. Эксперимент при активно-индуктивной нагрузке не приводится ввиду того, что в лабораторных условиях трудно поддерживать постоянный коэффициент мощности при столь малой мощности испытуемого генератора. Однако данные исследования могут быть адаптированы для более крупных машин, так как модель является параметрической, что позволяет варьировать ряд основных параметров и автоматизировано перестраивать объект.

Изменяя значения активного сопротивления *R1* и индуктивности *L1* при постоянном коэффициенте мощности, равном 0,909, были получены внешние характеристики генератора с активной и активно-индуктивной нагрузкой, которые изображены на рис. 5.

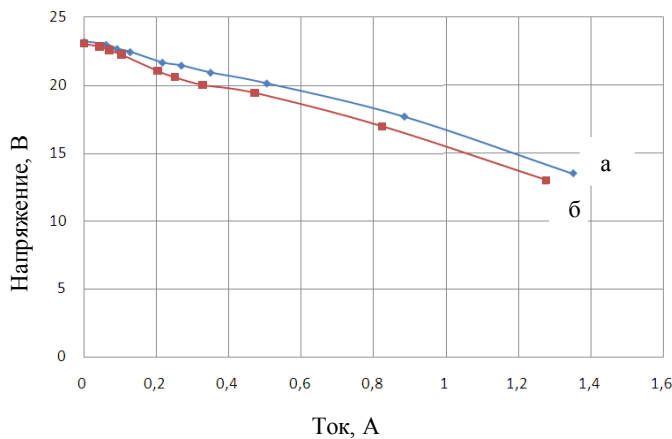


Рис. 5. Внешняя характеристика при активной и активно-индуктивной нагрузке: *a* – активная нагрузка; *б* – активно-индуктивная нагрузка.

Очевидно, что характеристика *б* проходит ниже, чем характеристика *a* при активной нагрузке. Причиной данного явления является реакция якоря при активно-индуктивной нагрузке, что подтверждает адекватность модели в целом. Следует заметить, что для простоты изложения была показана цепи-полевая модель для однофазного синхронного магнитоэлектрического генератора. Однако возможно создание и более сложных схем, к примеру, на рис. 6 показан вариант для изучения протекающих процессов в трехфазном генераторе.

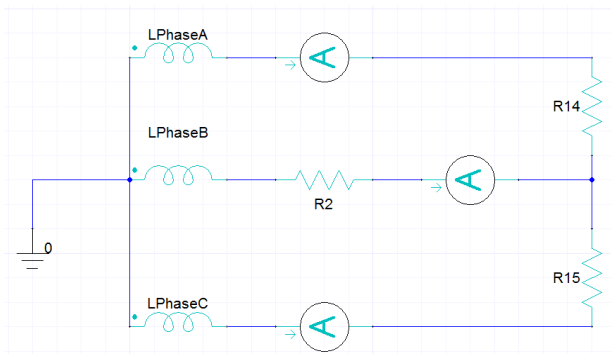


Рис. 6. Схема электрических соединений трехфазного генератора.

При этом возможно изучение влияния

выпрямительных и инверторных систем, которые являются неотъемлемой частью в системах автономных энергетических комплексов и пульсирующей нагрузкой для синхронных генераторов.

Выводы. 1. Цепи-полевая модель отображает физические процессы, которые происходят в торцевом магнитоэлектрическом генераторе, что дает возможность с максимальным удобством и оперативностью на этапе проектирования генератора проводить оптимизацию конструкции с учетом величины и характера нагрузки без необходимости построения реальной экспериментальной модели.

2. Сравнение экспериментальных и расчетных данных по построению внешней характеристики генератора показало более высокую сходимость (максимальное расхождение составило менее 10%) по сравнению с традиционными методами расчета [2, 3, 8].

1. Jacek F. Gieras Rong-Jie Wang Maarten J. Kamper "Axial Flux Permanent Magnet Brushless Machines" Second Edition Springer 2008 ISBN 978-1-4020-6993-2.
2. Балагуров В.А., Галтеев Ф.Ф. Электрические генераторы с постоянными магнитами – М.: Энергоатомиздат, 1988. – 280 с.
3. Паластин Л.М. Синхронные машины автономных источников питания. – М.: Энергия, 1980. – 384 с.
4. Chalmers B.J., Spooner E. (1999), "An axial-flux permanent-magnet generator for a gearless wind energy system", Energy Conversion, IEEE Transactions. – Vol. 14. – No. 2. – P. 251–257.
5. Howey D.A. (2009). Axial flux permanent magnet generators for pico-hydropower, EWB-UK Research Conference, Electrical Engineering Department, Imperial College, United Kingdom.
6. Maxwell 3D (v15) – user's guide, ANSYS, 2010.
7. Васильковский Ю.М. Польовий аналіз електричних машин. – К.: НТУУ "КПІ", 2007. – 192 с.
8. Шишкин В.П. Автоматизированное проектирование торцевых магнитоэлектрических генераторов переменного тока. – Иваново: Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина, 2006. – 68 с.