

ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫЕ РАСЧЕТЫ И ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ СИНХРОННОГО ГЕНЕРАТОРА НА ОСНОВЕ ВЫСОКОКОЭРЦИТИВНЫХ ПОСТОЯННЫХ МАГНИТАХ

Сангов Мухаммад Мамашарифович
магистр

Татевосян Андрей Александрович
кандидат технических наук

Иванчуков Евгений Валерьевич
магистр

Омский государственный технический университет, Омск

Аннотация. *Состояние вопроса:* Создание новых источников питания небольшой мощности (до 2 кВт) неразрывно связано с применением в магнитных системах генераторов постоянных магнитов из сплавов Nd-Fe-B. Поиск технических решений магнитных систем обуславливающих высокое выходное напряжение генератора при уменьшении таких факторов как момент страгивания и реакция якоря обладает особой актуальностью. Особый интерес представляет исследование магнитоэлектрического генератора построенного на базе асинхронной машины переменного тока, ротор которой заменен на индуктор с постоянными высококоэрцитивными магнитами. В статье приведено экспериментальное исследование и математическое моделирование магнитоэлектрического генератора с количеством $2p = 4$, с размещенными на роторе удлиненными постоянными магнитами призматической формы.

Материалы и методы: Для проведения экспериментальных исследований выполнена разработка лабораторного стенда, включающая в свой состав асинхронный двигатель, частотный преобразователь, магнитоэлектрический генератор, выпрямитель, блоки контроля и измерения электрического состояния обмоток и энергетических параметров генератора. Для моделирования применялись программное обеспечение конечно-элементного анализа Elcut 6.0 и Ansys 18.

Результаты: При выполнении экспериментов получены временные зависимости токов и напряжений в системе асинхронный двигатель – магнитоэлектрический генератор. Построена характеристика холостого хода генератора и внешняя характеристика при активной нагрузке и фиксированных значениях скорости вращения вала в диапазоне от 100 об/мин до 1300 об/мин. В ходе математического моделирования построены картины магнитного поля генератора, получено распределе-

ние магнитной индукции в воздушном зазоре при скорости вращения вала 400 об/мин.

Выводы: При разработке генератора предложено техническое решение магнитной системы, позволяющее уменьшить момент страгивания индуктора при пуске, а также представлена схема соединения обмоток генератора позволяющая уменьшить реакцию якоря и увеличить выходное напряжение генератора. Создан стенд для испытания опытного образца магнитоэлектрического генератора и измерения его выходных характеристик. На представленный в статье магнитоэлектрический генератор получен патент на изобретение № 2604051.

Ключевые слова: автономные, источники электроэнергии, генератор, тихоходный, магниты; обмотка; асинхронный двигатель.

ELECTROMAGNETIC CALCULATIONS AND EXPERIMENTAL INVESTIGATION OF A SYNCHRONOUS GENERATOR BASED ON HIGH COERCIVE PERMANENT MAGNETS

Sangov Muhammad Mamashariphovich
undergraduate

Tatevosyan Andrey Aleksandrovich
PhD

Ivanchukov Evgeniy Valerievich
undergraduate

Omsk State Technical University, Omsk

Abstract. The development of new power sources of low power (up to 2 kW) is inextricably linked with the use in magnetic systems of generators of permanent magnets made of Nd-Fe-B alloys. The search for technical solutions of magnetic systems that determine the high output voltage of the generator with a decrease in such factors as the moment of friction and the reaction of the armature is of particular relevance. Of special interest is the investigation of the magnetolectric generator of an alternating current constructed on the basis of an asynchronous machine whose rotor is replaced by an inductor with constant high-coercivity magnets. The article presents experimental research and mathematical modeling of a magnetolectric generator with an amount of $2p = 4$, with prismatic elongated permanent magnets placed on the rotor.

Materials and Methods: To carry out experimental research, a laboratory stand including an asynchronous motor, a frequency converter, a magnetolectric generator, a rectifier, blocks for monitoring and measuring the electrical state of the windings and power parameters of the generator has been devel-

oped. For simulation, the finite element analysis software ELCUT 6.0 and Ansys 18 was used.

Results: During the experiments, the time dependences of currents and voltages in the system of an induction motor – a magnetolectric generator – were obtained. The idling characteristic of the generator and the external characteristic with an active load and fixed values of the shaft rotation speed in the range from 100 rpm to 400 rpm. In the course of mathematical modeling, the magnetic field of the generator is constructed, the distribution of magnetic induction in the air gap at a rotation speed of 1300 rpm is obtained.

Conclusions: In the development of the generator, a technical solution of the magnetic system is proposed that allows reducing the torque of the inductor during start-up, as well as a connection diagram of the generator windings that allows reducing the armature response and increasing the output voltage. A laboratory bench was created for testing the magnetolectric generator and measuring its energy characteristics. The magnetolectric generator presented in the article received patent for invention № 2604051.

Keywords: autonomous, power sources, generator, slow-moving, magnets; winding; asynchronous motor.

Введение

В настоящее время высокий интерес научного сообщества уделяется исследованию электромеханических преобразователей ЭМПЭ выполненных с использованием высококоэрцитивных постоянных магнитов из редкоземельных сплавов ниодим-железо-бор (NdFeB) [1-4].

Проблемы, связанные с разработкой магнитоэлектрических машин и оптимизации разнообразных конструкций рассмотрены в работах: Буля Б.К., Демирчяна К.С., Иванова-Смоленского А.В., Кручининой И.Ю., Кулешов Е.В., Макаричева Ю.А., Овчинникова И.Е., Ряшенцева Н.П., Смелягина А.И., Тамма И.Е, Тозони О.В., Хитерера М. Я., Юринова В. М. и других [4-7].

Большой интерес представляют работы связанные с разработкой магнитоэлектрических генераторов, магнитная система которых построена на базе асинхронной машины переменного тока, в которой традиционный ротор заменен на ротор с размещенными на нем постоянными магнитами (индуктор). Многообразие форм и способов размещения по-

стоянных магнитов на роторе, поиск оптимального соотношения числа пар полюсов машины и количество зубцов статора, особенности соединения обмоток статора определяет научную новизну, а применение указанных магнитоэлектрических генераторов в автономных системах электроснабжения для нужд малой энергетики определяет практическую значимость исследования [8-12].

Постановка задачи

Рассмотрим магнитную систему магнитоэлектрической машины представленной на рис. 1. Магнитоэлектрическая машина содержит корпус 1, неподвижный статор 2, представляющий собой магнитопровод с пазами 3 в которых размещена трехфазная обмотка 4 и подвижный ротор 5 с постоянными магнитами 6. Ротор 5 от статора 2 отделён технологическим воздушным зазором δ , число магнитных полюсов ротора 5 должно равняться числу магнитных полюсов трехфазной обмотки с током статора 2.

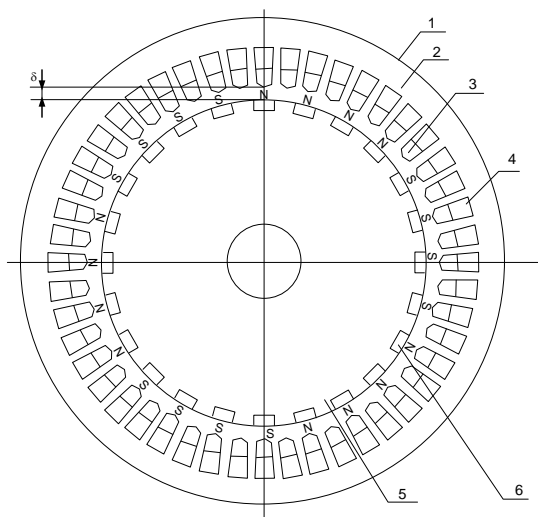


Рис. 1. Конструкция магнитной системы магнитоэлектрической машины

Для испытаний магнитоэлектрической машины работающей в генераторном режиме необходимо выполнить разработку экспериментального стенда, реализующего следующие функции:

- регулирование скорости вращения ротора магнитоэлектрической машины;
- измерение параметров состояния обмотки магнитоэлектрической машины;
- снятие энергетических характеристик магнитоэлектрической машины, важнейшей из которой является зависимость полезной мощности от скорости вращения вала.

Экспериментальный стенд

На рис. 2 представлена структурная схема для исследования магнитоэлектрической машины.

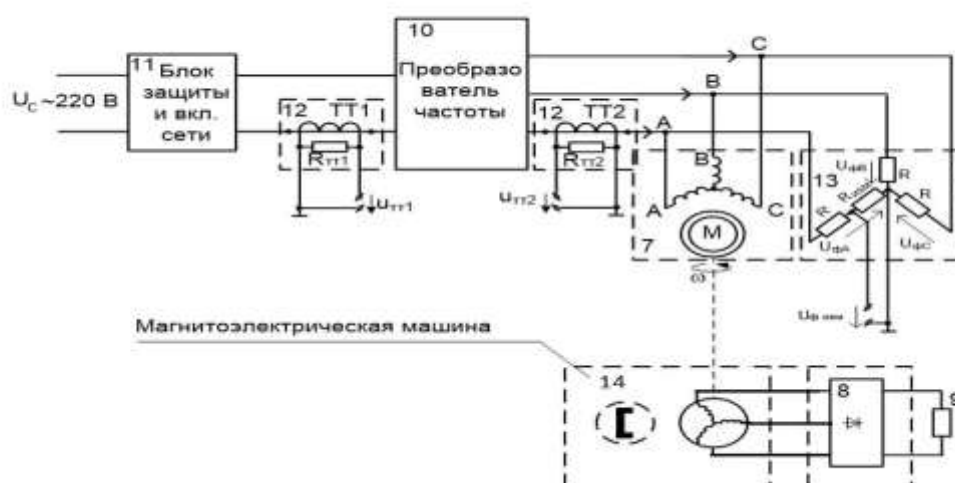


Рис. 2. Схема экспериментального стенда

На схеме обозначены: 1 – корпус, 2 – неподвижный статор, 3 – паз, 4 – трёхфазная обмотка асинхронного двигателя, 5 – подвижный ротор, 6 – постоянные магниты, 7 – асинхронный двигатель, 8 – трехфазный выпрямитель, 9 – нагрузочное сопротивление, 10 – частотный преобразователь, 11 – блок включения питания, 12 – трансформатор тока (ТТ1 и ТТ2), 13 – делитель напряжения, 14 – синхронный генератор на постоянных магнитах.

Внешний вид стенда для испытания магнитоэлектрической машины приведен на рис. 3.



Рис. 3. Стенд для исследования режимов работы магнитоэлектрической машин

Эксперимент

Величина индукции магнитного потока, сцепленного с обмоткой статора, достаточно высока и находится в диапазоне 0.5 Тл до 1.2 Тл в зависимости от угла поворота ротора [15; 16]. Большое значение индукции определяется, в том числе, и малым воздушным зазором, что при высокой технологичности сборки является несомненным преимуществом рассматриваемой магнитной системы. При подборе схемы выпрямления и стабилизации индуцированного напряжения в обмотке статора магнитоэлектрическая машина, работающая в генераторном режиме, в полной мере отвечает требованиям, предъявляемым к генераторам электрической энергии малой мощности.

Ротор магнитоэлектрической машины проводят во вращение от внешнего двигательного устройства, тем самым реализуя генераторный режим работы. За счет изменения магнитного потока, пронизывающего обмотку статора в последней наводится ЭДС индукции [13; 14]. Методика испытаний предусматривает снятие внешней характеристики генератора при различных скоростях вращения ротора: 500 об/мин, 700 об/мин, 1000 об/мин, 1300 об/мин. Регулирование скорости вращения асинхронного двигателя осуществляется частным преобразователем.

Эксперимент направлен на определение такого режима работы генератора, при котором отдаваемая мощность потребителю будет максимальной.

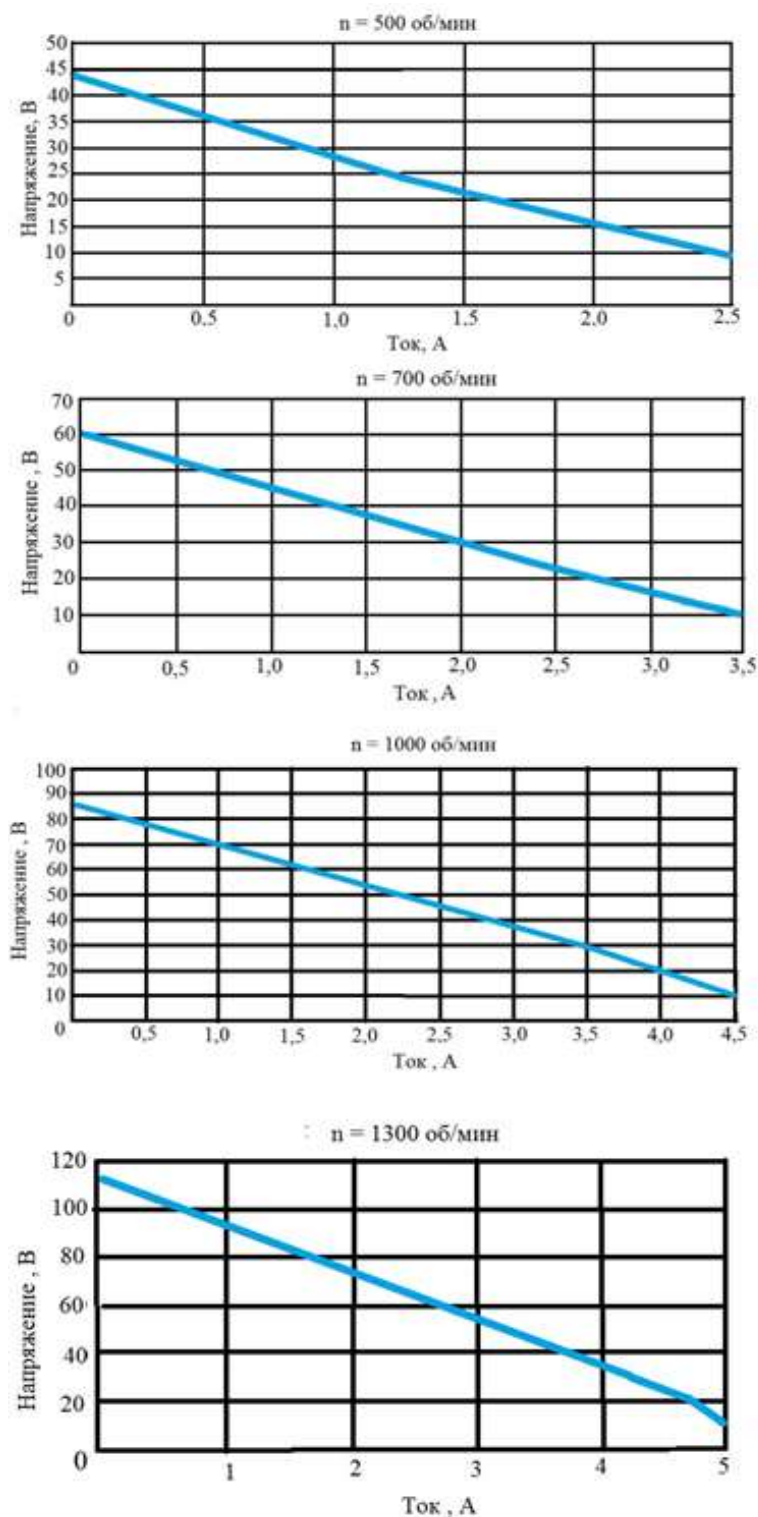


Рис. 4. Результаты испытаний магнитоэлектрического генератора при различной скорости вращения ротора

На холостом ходу индуцированное выпрямленное напряжение составляет 220 В.

Результаты эксперимента

Анализ результатов испытаний позволяет сделать вывод о рекомендуемом диапазоне работы магнитоэлектрической машины в согласованном режиме при сопротивлении нагрузки 16 Ом.

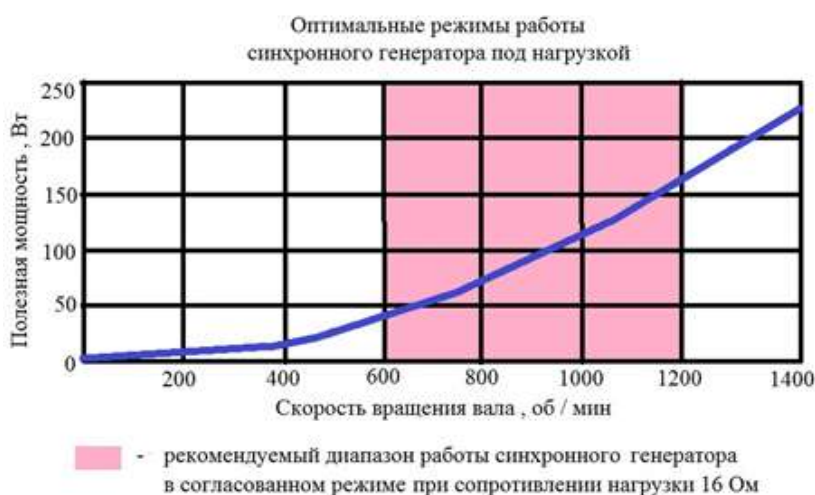


Рис. 5. Рекомендуемый диапазон работы магнитоэлектрической машины

Зависимость тока заряда аккумуляторной батареи от скорости вращения ротора магнитоэлектрической машины представлена на рис. 6.

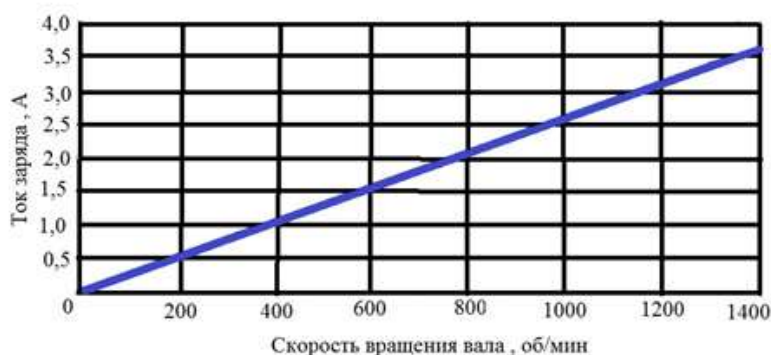


Рис. 6. Ток заряда аккумуляторной батареи

Обсуждение результатов

На основе экспериментальных данных можно сделать вывод о рекомендуемом режиме работы исследуемой магнитоэлектрической ма-

шины. Максимальная полезная мощность отдаваемая потребителю находится в диапазоне от 50 до 150 Вт при скорости вращения ротора 1200 об/мин. При дальнейшем увеличении скорости вращения наблюдается интенсивный нагрев обмотки статора. Кроме этого, имеет место реакция якоря, существенно увеличивающая момент сопротивления. Для усиления магнитного потока в зазоре необходимо предусмотреть изменение в конструкции ротора магнитоэлектрической машины, заключающееся в размещении на внутренней торцевой поверхности постоянных магнитов дополнительного магнитопровода, представляющего собой тонкостенный цилиндр из ферромагнитного материала.

Выводы

1. Создан опытный образец магнитоэлектрической машины
2. Разработан испытательный лабораторный стенд и методика испытаний магнитоэлектрической машины
3. Получены экспериментальные характеристики магнитоэлектрической машины, работающей в генераторном режиме на холостом ходу и под нагрузкой
4. Проведенные исследования позволяют разработать методику расчета оптимальных конструкций магнитоэлектрических машин.

Список использованных источников

1. Сафьянников И.А. Проблемы развития малой энергетики Западной Сибири / И.А. Сафьянников, И.Н. Россамахин // Современная техника и технологии: матер. IX Междунар. науч-практ. конф. студентов, аспирантов и молодых ученых. Томск: ТПУ, 2003. Т. 1. С. 242-243.
2. Кулагин Р.Н. Анализ конструкций тихоходных генераторов с постоянными магнитами // Известия Волгоградского государственного технического университета: межвуз. сб. науч. ст. № 13(86). Волгоград, 2011. 115 с. (Сер. Прогрессивные технологии в машиностроении. Вып. 7).
3. Кулешов Е.В. Магнитоэлектрический синхронный генератор на базе асинхронной машины для автономной ветроэлектрической установки. Автореф. ... канд. техн. наук. Владивосток, 2001. 20 с.
4. Lysenko O.A. Torque load observer of induction motor with double squirrel-cage of rotor // 2015 International Siberian conference on control and communications (SIBCON): 2015.
5. Исмагилов Ф.Р., Герасин А.А., Хайруллин И.Х., Вавилов В.Е. Электромеханические системы с высококоэрцитивными постоянными магнитами. М.: Машиностроение, 2014. 267 с.
6. Харитонов С.А., Коробков Д.В., Маслов М.А., Бородин Н.И., Левин А.В., Юхнин М.М., Лившиц Э.Я. Система генерирования электрической энергии типа «переменная скорость – постоянная частота» на базе синхронного генератора с возбуждением от постоянных магнитов и инверторов напряжения // Электротехника. 2008. № 6. С. 27-32.
7. Zaharova N.V. Improvement of magnetic system of the speed sensor in the devices of the impact parameters control. // International Siberian Conference on Control and Communications, SIBCON 2015. Proceedings, art. no. 7147067.
8. Гарганеев А.Г., Грабовецкий Г.В., Харитонов С.А. Электромагнитные процессы в системе генерирования постоянного тока «МЭГ – однофазный мостовой выпрямитель» // Научный вестник Новосибирского государственного технического университета. 2012. № 2. С. 143-154.
9. Гарганеев А.Г., Грабовецкий Г.В., Харитонов С.А. Электромагнитные процессы в системе генерирования постоянного тока «МЭГ – двухполупериодный нулевой выпрямитель» // Научный вестник Новосибирского государственного технического университета. 2012. № 2. С. 201-209.
10. Глазков В.П., Глазков О.В., Глазкова И.В. Ротор электрической машины с возбуждением от постоянных магнитов: пат. РФ № 123254 U1, H02K21/12, заявл. 15.06.2012. опубл. 20.12.2012.
11. Суворов И.В., Фолимонов Л.В. Ротор магнитоэлектрической машины, преимущественно синхронного генератора с возбуждением от

- постоянных магнитов: пат. РФ № 2308139 С2, H02K1/27, заявл. 10.02.2007; опубл. 10.10.2017. 49.
12. Левин А.В., Лившиц Э.Я., Хабаров В.А. Способ установки постоянных магнитов в роторе электрической машины: пат. РФ № 2230420 С1, H02K15/00, H02K15/03, заявл. 05.06.2003; опубл. 10.06.2004.
 13. Татевосян А.А., Огорелков Б.И., Татевосян А.С. Расчет индуктированной эдс в витке при относительном движении постоянного магнита с различной формой поперченного сечения. Омский научный вестник. 2014. № 3 (133). С. 179-183.
 14. Расчет индуктированной электродвижущей силы (ЭДС) синхронного магнитоэлектрического генератора на базе асинхронной электрической машины // Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2015612665 от 24.02.2015.
 15. Tatevosyan A.A. The calculation of the magnetic field of the synchronous magnetoelectric generator. // Dynamics of Systems, Mechanisms and Machines (Dynamics). 2016. Proceedings, art. № 7819095.
 16. Tatevosyan A.A., Tatevosyan A.S. Calculation of magnetic system of the magnetoelectric machines // Dynamics of Systems, Mechanisms and Machines, Dynamics. 2014. Proceedings, art. № 7005698.