

УДК 621.313.8

СПОСОБ ИЗМЕРЕНИЯ МАГНИТНОЙ ИНДУКЦИИ ДЛЯ ВХОДНОГО КОНТРОЛЯ ПОСТОЯННЫХ МАГНИТОВ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ИМИТАТОРА МАГНИТНОЙ СИСТЕМЫ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ МАШИНЫ

А. Б. Захаренко, К. С. Осикова

Предложена конструкция имитатора магнитной системы магнитоэлектрической машины и новый способ измерения магнитной индукции с помощью имитатора магнитной системы магнитоэлектрической машины. Проведено два расчета магнитной индукции методом конечных элементов: реальной магнитоэлектрической машины и имитатора магнитной системы магнитоэлектрической машины. Приведена формула коэффициента подобия, позволяющая воспользоваться результатами измерения магнитного поля в имитаторе магнитной системы для анализа индукции постоянных магнитов в реальной магнитоэлектрической машине. Выполнен расчет коэффициента подобия, приведена рекомендация по расчету магнитной индукции в магнитоэлектрической машине на основе измеренной в имитаторе магнитной системы.

Ключевые слова: магнитоэлектрическая машина, магнитная индукция, способ измерения, постоянный магнит, имитатор магнитной системы.

Введение

В настоящее время широко применяются редкоземельные постоянные магниты с повышенной температурой Кюри (до 450°C) и коэрцитивной силой по намагниченности до 1800 кА/м, обладающие повышенной термостабильностью магнитных свойств за счет специальных легирующих элементов, что дает возможность их использования в магнитоэлектрических машинах с рабочей температурой выше 150°C.

При этом стоимость редкоземельных постоянных магнитов неуклонно повышается. Наиболее существенным образом на их стоимость влияют именно легирующие элементы: кобальт, галлий и ниобий [1]. Поэтому ряд производителей, особенно зарубежных, уменьшают издержки именно за счет уменьшения процентного содержания легирующих элементов, фактически снижают рабочую температуру постоянных магнитов по сравнению с оговоренной в технических условиях. В этой ситуации вопрос входного неразрушающего контроля свойств постоянных магнитов становится особенно актуальным.

Наиболее точным и верным способом входного контроля постоянных магнитов является измерение магнитной индукции на поверхности постоянных магнитов внутри магнитной системы электрической машины, так как характер магнитного поля постоянного магнита вне магнитной системы – существенно иной. Но в большинстве случаев данное измерение невозможно по нескольким причинам:

– щуп (чувствительный элемент) тесламетра невозможно поместить внутрь машины из-за малой величины воздушного зазора;

– на этапе входного контроля магнитная система электрической машины обычно не укомплектована в связи с отсутствием всех компонентов;

– в связи с необходимостью переборки подшипниковых узлов, из-за необходимости демонтировать ротор после неудачного входного контроля. Данная переборка может сократить срок службы подшипников.

В вышеперечисленных ситуациях вопрос измерения магнитной индукции постоянных магнитов внутри магнитной системы имитатора электрической машины становится актуальным.

Проблему можно решить с помощью нового способа измерения магнитной индукции постоянных магнитов [2, 3] на имитаторе магнитной системы.

Измерение магнитной индукции на поверхности постоянных магнитов проводится на имитаторе магнитной системы магнитоэлектрической машины (ЭМ) с помощью датчика магнитного поля 3, магнитное поле постоянных магнитов 1 и 2 измеряется в воздушном зазоре магнитной системы, которая имитирует реальную ЭМ. Конструкция имитатора магнитной системы ЭМ состоит из внутреннего магнитопровода 4, в котором находятся постоянные магниты 1, 2, и внешнего магнитопровода 5. Воздушный зазор между двумя магнитопроводами 4 и 5 такой величины, которая может позволить внести туда щуп тесламетра 3 и провести измерение магнитной индукции непосредственно внутри магнитной системы. Величина воздушного зазора обеспечивается немагнитными клиньями 6, которые расположены в воздушном зазоре конструкции имитатора под углом 120 градусов друг к другу.

Целью настоящей работы является определение коэффициента подобия K_n по магнитной индукции магнитных систем реальной магнитоэлектрической машины и её имитатора, необходимый для грамотной организации измерений.

Задачами настоящей работы являются:

1. Расчет магнитного поля реальной магнитоэлектрической машины с помощью метода конечных элементов (например, программы Femm);

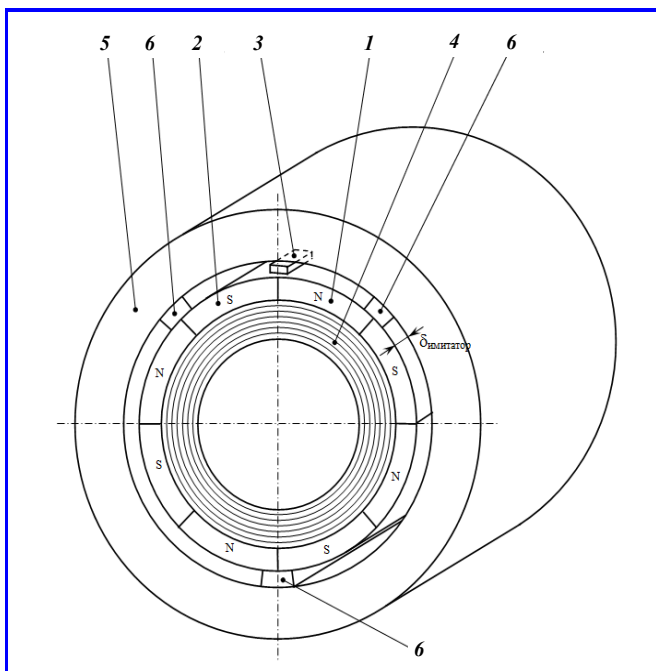


Рис. 1. Конструкция имитатора магнитной системы

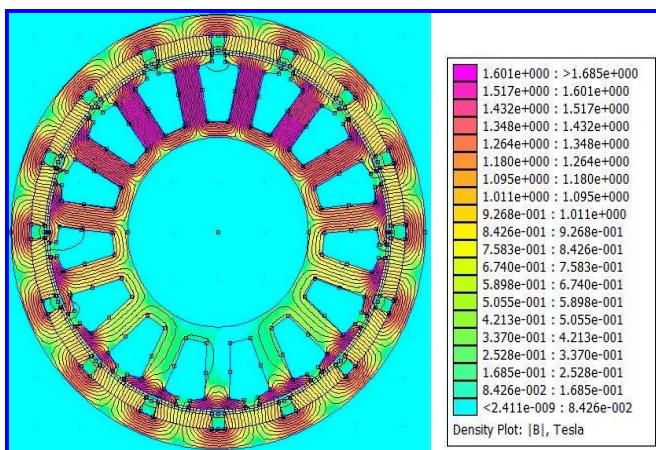


Рис. 2. Распределение магнитной индукции в поперечном сечении электрической машины

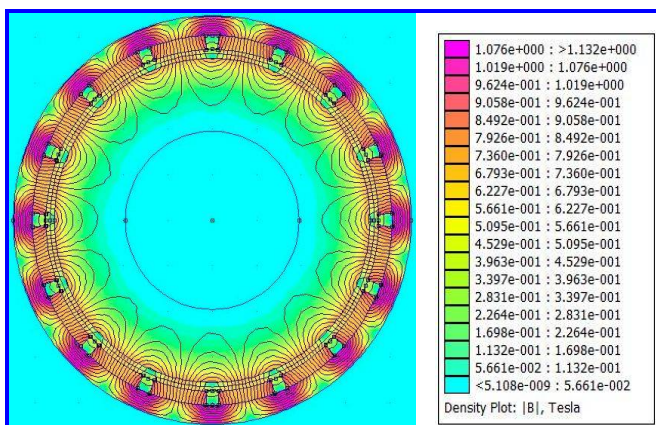


Рис. 3. Распределение магнитной индукции в поперечном сечении имитатора магнитной системы

2. Расчет магнитного поля имитатора магнитной системы также с помощью метода конечных элементов;

3. Сравнение результатов расчетов магнитной индукции ЭМ и имитатора магнитной системы, определение коэффициента подобия.

Модельная задача решена на примере магнитоэлектрической машины привода направленной антенны космического аппарата с числом зубцов $z = 15$ на статоре, где размещена зубцовая обмотка, и числом полюсов ротора $2p = 16$. Внешний диаметр машины составляет 95 мм при величине воздушного зазора 1 мм.

Величина воздушного зазора в имитаторе магнитной системы электрической машины составляет 2 мм. Такая величина была выбрана для того, чтобы в зазор можно было внести щуп тесламетра (минимальный размер которого составляет 1 мм) и измерить магнитную индукцию непосредственно на поверхности постоянных магнитов.

Чтобы выявить соотношение магнитных индукций электрической машины и имитатора магнитной системы электрической машины, необходимо определить коэффициент подобия K_{Π} . В связи с этим было проведено моделирование магнитного поля электрической машины и имитатора магнитной системы электрической машины с помощью программы Femm. В процессе моделирования использовался метод конечных элементов. На внешней границе области заданы граничные условия Неймана. Расчет магнитного поля проводился с учетом магнитных свойств постоянных магнитов и ферромагнитной стали, при этом индукция насыщения стали не превышает 1,95 Тл. В обоих случаях моделью для расчета является поперечное сечение конструкции. Результаты расчета магнитного поля электрической машины и имитатора магнитной индукции представлены на рис. 2 – 3.

Так как на магнитную индукцию влияет величина воздушного зазора и длина силовой линии поля в сердечниках статора и ротора, коэффициент подобия определяется следующей формулой:

$$K_{\Pi} = |B_M / B_{\text{очн}}|,$$

где B_M – максимальная индукция в зазоре магнитоэлектрической машины при расчете; $B_{\text{очн}}$ – максимальная индукция в зазоре имитатора магнитной системы магнитоэлектрической машины при расчете.

По результатам расчетов построены зависимости магнитной индукции в воздушном зазоре от линейной координаты по окружности вдоль воздушного зазора l (рис. 4 и 5).

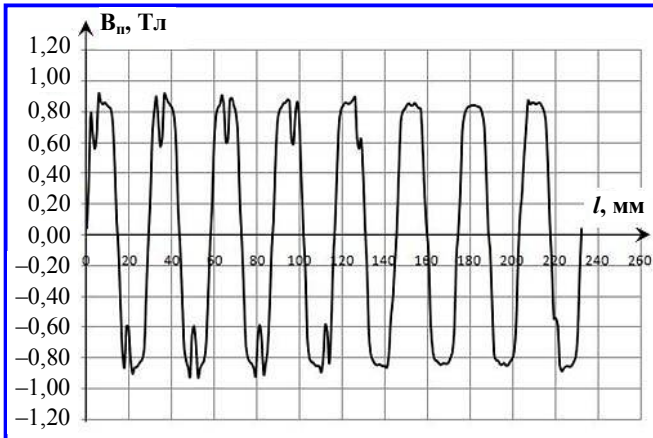


Рис. 4. Зависимость магнитной индукции B в воздушном зазоре электрической машины от координаты l по окружности вдоль воздушного зазора

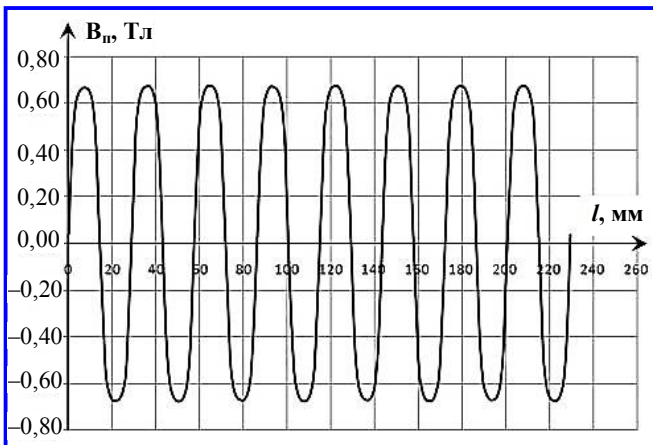


Рис. 5. Зависимость магнитной индукции B в воздушном зазоре имитатора магнитной индукции от координаты l

В данном исследовании для нахождения коэффициента подобия была взята максимальная магнитная индукция в ЭМ 0,9 Тл и максимальная магнитная индукция в имитаторе магнитной системы 0,68 Тл. В соответствии с формулой

произведен расчет коэффициента подобия и получено значение: $K_n = 1,32$.

Таким образом, при входном контроле постоянных магнитов измеренную в имитаторе магнитной системы индукцию необходимо умножить на коэффициент K_n для получения индукции в зазоре реальной ЭМ.

Выводы

1. Предложен новый способ измерения магнитной индукции постоянных магнитов на имитаторе магнитной системы магнитоэлектрической машины. Способ защищен патентом на изобретение РФ № 2699235 [1].

2. Проведено моделирование магнитного поля электрической машины и имитатора магнитной системы магнитоэлектрической машины.

3. По результатам моделирования проведен расчет коэффициента подобия K_n . При входном контроле максимальную измеренную в имитаторе магнитной системы индукцию необходимо умножить на коэффициент K_n для получения максимальной индукции в магнитоэлектрической машине.

Литература

1. Постоянные магниты: справочник / А. Б. Альтман, А. Н. Герберг, П. А. Гладышев [и др.]; под ред. Ю. М. Пятинина. – 2-е изд., перераб. и доп. – М.: Энергия, 1980. – 488 с., ил.
2. Патент на изобретение № 2699235 С1 Российская Федерация, МПК G01R 33/00 (2006.01). Способ измерения магнитной индукции постоянных магнитов: № 2019106771 : заявл. 12.03.2019 : опубл. 04.09.2019 / Н. А. Белокурова, А. Б. Захаренко, К. С. Осикова, М. Е. Решетников. – 11 с.: ил.
3. Осикова К. С., Захаренко А. Б. Входной контроль постоянных магнитов с использованием имитатора магнитной системы // Тезисы докладов 18-й Международной конференции «Авиация и космонавтика – 2019». – Москва, 2019 – С. 102.

Поступила в редакцию 14.10.2019

Андрей Борисович Захаренко, начальник отдела, доктор технических наук, доцент, (495) 366-26-44, otdel18@mcc.vniiem.ru.

Кристина Сергеевна Осикова, инженер, аспирант, (495) 366-54-24, lab188@mcc.vniiem.ru. (АО «Корпорация «ВНИИЭМ»).

METHOD OF MEASURING MAGNETIC INDUCTION USING ELELECTRICAL MACHINE MAGNETIC SYSTEM SIMULATOR FOR INCOMING INSPECTION OF PERMANENT MAGNETS

A. B. Zakharenko, K. S. Osikova

The article describes the structure of magneto-electrical machine magnetic system simulator and a new method of measuring magnetic induction using the magneto-electrical machine magnetic system simulator. Two finite element method magnetic induction calculations have been

performed (for a real magneto-electric machine and for magneto-electric machine magnetic system simulator). A similarity coefficient formula allowing the application of the results received as a result of measurements of magnetic system simulator magnetic field for the analysis of induction of permanent magnets within a real magneto-electrical machine is presented in the article. The calculation of similarity coefficient is performed, and the recommendations for calculation of magnetic induction in a magneto-electrical machine based on the value received as a result of measurement performed on the magnetic system simulator are provided in the article.

Key words: magneto-electric machine, magnetic induction, measurement method, permanent magnet, magnetic system simulator.

References

1. Patent for invention No. 2699235 C1, Russian federation, International Patent Classification G01R 33/00 (2006.01). Method of measurement of magnetic induction in permanent magnets: No. 2019106771 : application of March 12, 2019: published on September 04, 2019 / N. A. Belokurova, A. B. Zakharenko, K. S. Osikova, M. E. Reshetnikov. – p.11: ill.
2. Osikova K. S., Zakharenko A. B. Incoming inspection of permanent magnets with application of magnetic system simulator // Abstracts of reports for the 18th International Conference ‘Aviation and Cosmonautics’ 2019. – Moscow, 2019 – P. 102.

*Andrei Borisovich Zakharenko, Head of General Scientific and Technical Research Department,
Doctor of Technical Sciences (D. Sc.), Associate Professor,
tel.: +7 (495) 366-26-44, otde118@mcc.vniiem.ru.*

*Kristina Sergeevna Osikova, Engineer, Ph. D. Student, tel.: +7 (495) 366-54-24,
e-mail: lab188@mcc.vniiem.ru.
(JC «VNIEM Corporation»).*