

УДК 621.313

ПРИМЕНЕНИЕ СПОСОБА ИЗМЕРЕНИЯ МАГНИТНОЙ ИНДУКЦИИ ДЛЯ ВХОДНОГО КОНТРОЛЯ МАГНИТОВ, НАМАГНИЧЕННЫХ ПО СХЕМЕ ХАЛЬБАХА, С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ИМИТАТОРА МАГНИТНОЙ СИСТЕМЫ

А. Б. Захаренко, К. С. Осикова

Проведено два расчета магнитной индукции методом конечных элементов: электрической машины с постоянными магнитами, намагниченными по схеме Хальбаха и имитатора магнитной системы данной электрической машины. Проведен сравнительный анализ распределения магнитной индукции в электрической машине и имитаторе магнитной системы данной электрической машины, а также, для сравнения, на графиках приведены зависимости магнитной индукции от длины воздушного зазора. Для того, чтобы осуществить анализ выполненных измерений магнитных полей в электрической машине и имитатора магнитной системы, применена формула коэффициента подобия. Произведен расчет коэффициента подобия, предложена рекомендация по расчету магнитной индукции в электрической машине.

Ключевые слова: электрическая машина, магнитная индукция, способ измерения, постоянный магнит, имитатор магнитной системы, схема Хальбаха.

Существует множество современных исполнений конструкций роторов синхронных электрических машин с постоянными магнитами. Среди них выделяется конструкция ротора с постоянными магнитами, намагниченными по схеме Хальбаха, которую определяет мультинаправленный вектор намагниченности. Особенностью такой схемы намагничивания является концентрация магнитного потока и магнитной индукции. Обычная схема намагничивания (радиальная) также дает синусоидальное распределение магнитной индукции в воздушном зазоре электрической машины, однако преимуществом схемы Хальбаха является то, что она позволяет повысить индукцию в воздушном зазоре до 1,5 Тл и выше, что необходимо для достижения наилучшего соотношения «максимальной полезной мощности» к «массе». В [1] предложена новая конструкция электромашины с ротором, созданным по схеме Хальбаха. Суть патента состоит в том, что полюс ротора предложенной электромашины образован тремя постоянными магнитами.

Эффективным способом входного контроля постоянных магнитов, намагниченных по схеме Хальбаха, является измерение магнитной индукции внутри магнитной системы электрической машины, непосредственно на поверхности постоянных магнитов. Данное измерение необходимо в связи с разницей в характере магнитного поля постоянного магнита внутри магнитной системы и вне ее. В большинстве случаев данное измерение невозможно по таким причинам, как: невозможность внесения щупа тесламетра в узкий воздушный зазор, неполная комплектация электрической машины и из-за необходимости демонтажа ротора (переборки подшипниковых узлов) после неудачного входного контроля.

Для проверки правильного выполнения процесса намагничивания и достижения нужного результата вопрос измерения магнитной индукции постоянных магнитов, намагниченных по схеме Хальбаха, внутри магнитной системы имитатора электрической машины становится весьма **актуальным**. Данное измерение можно произвести с помощью способа измерения магнитной индукции постоянных магнитов [2, 3] на имитаторе магнитной системы.

На рис. 1 представлена конструкция имитатора магнитной системы электрической машины с векторами намагниченности, расположенными по схеме Хальбаха в соответствии с [1].

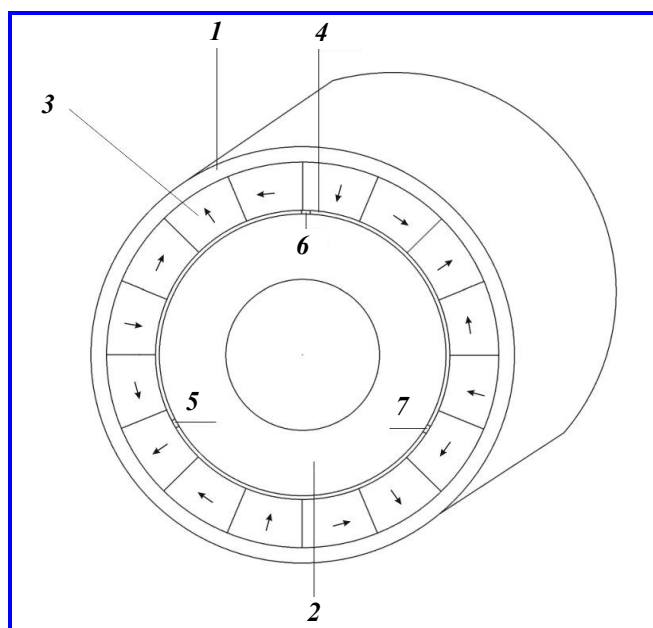


Рис. 1. Конструкция имитатора магнитной системы: 1, 2 – магнитопроводы; 3 – магнит; 4 – воздушный зазор; 5, 6, 7 – немагнитные клинья

С помощью магнитного датчика в воздушном зазоре на поверхности постоянных магнитов, намагниченных по схеме Хальбаха, производится измерение магнитной индукции. Для того, чтобы была возможность внести щуп магнитного датчика и измерить магнитную индукцию непосредственно на поверхности самих постоянных магнитов, воздушный зазор сделан такой величины, которая превышает в два раза величину воздушного зазора в реальной электрической машине. Такая величина воздушного зазора обеспечивается немагнитными клиньями, которые расположены в воздушном зазоре конструкции имитатора под углом 120 градусов друг к другу.

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

Задачами настоящей работы являются:

1. Моделирование магнитного поля электрической машины с помощью метода конечных элементов.
2. Моделирование магнитного поля имитатора магнитной системы с помощью метода конечных элементов.
3. Сравнение результатов моделирования магнитной индукции в электрической машине и имитаторе магнитной системы данной электрической машины, а также определение коэффициента подобия.

Для проведения моделирования магнитного поля была использована модель электрической машины привода направленной антенны космического аппарата. Число зубцов на статоре в электрической машине $z = 15$, где размещена зубцовая обмотка, и соответственно число полюсов ротора $2p = 16$. Воздушный зазор электрической машины составил 1 мм при внешнем диаметре 95 мм.

Коэффициент подобия был определен с целью сравнения магнитных индукций электрической машины и имитатора магнитной системы электрической машины. Проведено моделирование магнитного поля электрической машины с постоянными магнитами, намагниченными по схеме Хальбаха, и имитатора магнитной системы этой же электрической машины. В ходе моделирования использовался метод конечных элементов. Моделирование магнитного поля проводилось с учетом магнитных свойств постоянных магнитов и ферромагнитной стали, при этом индукция насыщения стали не превышает 1,95 Тл. Поперечное сечение конструкции электрической ма-

шины в обоих случаях моделирования является расчетной моделью. Результаты расчета магнитного поля электрической машины с постоянными магнитами, намагниченными по схеме Хальбаха, и имитатора магнитной индукции этой машины представлены на рис. 2 – 3.

Факторы, влияющие на магнитную индукцию, это величина воздушного зазора и длина силовой линии поля в сердечниках статора и ротора. В связи с этим коэффициент подобия определяется следующей формулой:

$$K_{\Pi} = |B_M / B_{\text{очн}}|,$$

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

На рис. 4 и 5 представлены зависимости магнитной индукции в воздушном зазоре от линейной координаты по окружности вдоль воздушного зазора l в электрической машине (рис. 4) и в имитаторе (рис. 5).

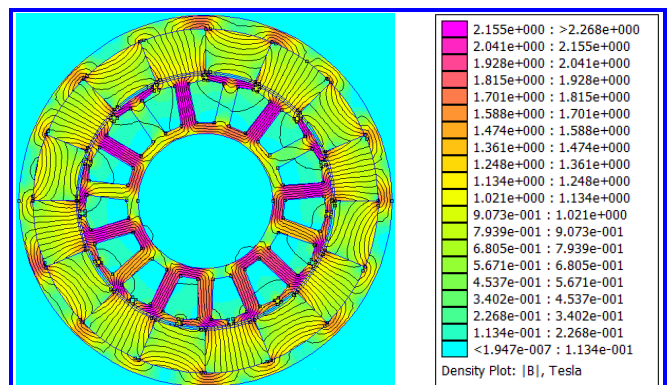


Рис. 2. Распределение магнитной индукции в поперечном сечении электрической машины с постоянными магнитами, намагниченными по схеме Хальбаха

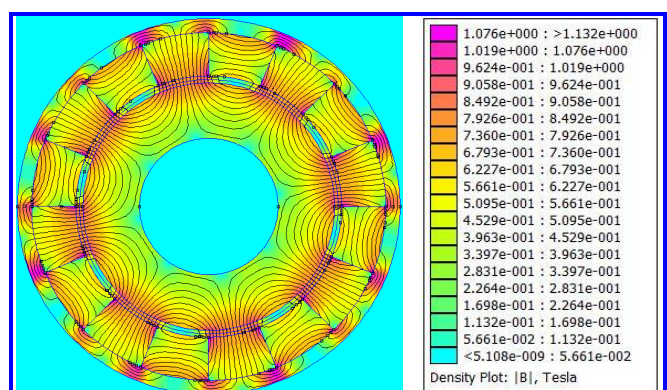


Рис. 3. Распределение магнитной индукции в поперечном сечении имитатора магнитной системы

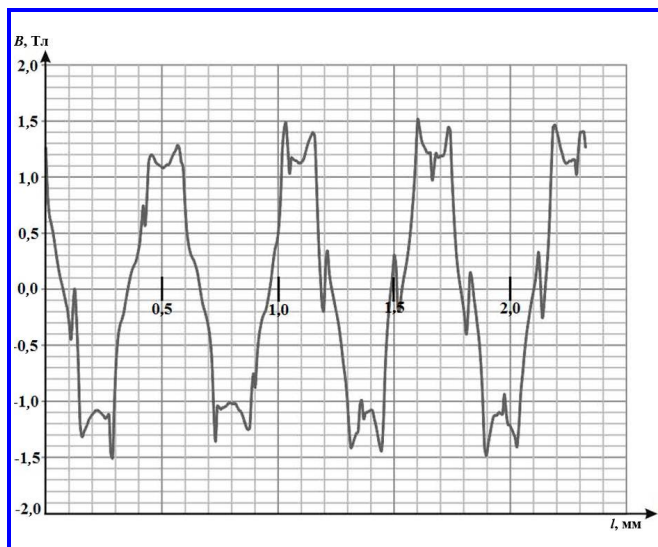


Рис. 4. Зависимость магнитной индукции B в воздушном зазоре электрической машины от координаты l по окружности вдоль воздушного зазора



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

Для проведения исследования и нахождения коэффициента подобия была взята максимальная магнитная индукция в электрической машине с постоянными магнитами, намагниченными по

схеме Хальбаха, которая составила 1,1 Тл, и максимальная магнитная индукция в имитаторе магнитной системы данной электрической машины 1,2 Тл. По формуле, приведенной выше, произведен расчет коэффициента подобия. Полученный результат: $K_p = 0,9$.

Из вышеизложенного следует, что при проведении входного контроля постоянных магнитов измеренную в имитаторе магнитной системы индукцию необходимо умножить на полученный коэффициент подобия K_p , в итоге получается значение индукции в зазоре реальной электрической машины.

Выводы

1. Проведено моделирование магнитного поля электрической машины с постоянными магнитами, намагниченными по схеме Хальбаха, и имитатора магнитной системы данной электрической машины.

2. По результатам моделирования проведен расчет коэффициента подобия K_p . При входном контроле измеренную в имитаторе магнитной системы индукцию необходимо умножить на коэффициент K_p для получения максимальной индукции в реальной электрической машине.

Литература

1. Патент на изобретение № 2720233 Российская Федерация, МПК H02K 21/12(2006.01), H02K 16/02(2006.01), H02K 1/27(2006.01). Электромашинa с ротором, созданным по схеме Хальбаха : № 2019143132 : заявл. 23.12.2019 : опубл. 28.04.2020 / А. Б. Захаренко, А. К. Надкин, К. С. Осикова [и др.]. – Бюл. № 13. – 11 с.
2. Патент на изобретение № 2699235 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 [и др.]. – Бюл. № 25. – 11 с.
3. Измерение магнитной индукции постоянных магнитов на имитаторе магнитной системы / Н. А. Белокурова, К. С. Осикова, А. Б. Захаренко // Тезисы докладов VII международной научно-технической конференции «Актуальные проблемы создания космических систем дистанционного зондирования Земли». – Москва : АО «Корпорация «ВНИИЭМ», 2019 – С. 142 – 144.

Поступила в редакцию 14.06.2020

Андрей Борисович Захаренко, начальник отдела, доктор технических наук, доцент, т. (495) 366-26-44.

Кристина Сергеевна Осикова, аспирант, инженер, т. (495) 366-01-47, E-mail: otde118@mcc.vniiem.ru. (АО «Корпорация «ВНИИЭМ»).

APPLICATION OF MAGNETIC INDUCTION MEASUREMENT METHOD FOR INCOMING INSPECTION OF MAGNETS MAGNETIZED ACCORDING TO HALBACH SCHEME WITH THE USE OF MAGNETIC SYSTEM SIMULATOR

A. B. Zakharenko, K. S. Osikova

Two calculations of magnetic induction have been performed using the finite element method: electrical machine with permanent magnets magnetized according to the Halbach scheme and simulator of magnetic system of this electrical machine. The comparative analysis of magnetic induction distribution in the electrical machine and simulator of magnetic system of this electrical machine has been implemented, and, for comparison, the dependence of magnetic induction on the air gap length has been presented on the plots. In order to perform the analysis of the fulfilled measurements of magnetic fields in the electrical machine and magnetic system simulator, the similarity coefficient formula has been used. The similarity coefficient has been calculated, and recommendations on calculation of magnetic induction in an electrical machine have been made.

Key words: electrical machine, magnetic induction, measurement method, permanent magnet, magnetic system simulator, Halbach scheme.

References

1. Patent of invention No. 2720233 Russian Federation, IPC H02K 21/12(2006.01), H02K 16/02(2006.01), H02K 1/27(2006.01). Electrical machine with a rotor created according to Halbach scheme : No. 2019143132 : appl. 23.12.2019 : publ. 28.04.2020 / A. B. Zakharenko, A. K. Nadkin, K. S. Osikova [et al.]. – Bul. No. 13. – 11 p.
2. Patent of invention No. 2699235 Russian Federation, IPC G01R 33/00(2006.01). Method of measurement of magnetic induction of permanent magnets : No. 2019106771 : appl. 12.03.2019 : publ. 04.09.2019 / N. A. Belokurova, A. B. Zakharenko, K. S. Osikova [et al.]. – Bul. No. 25. – 11 p.
3. Measurement of magnetic induction of permanent magnets on a magnetic system simulator / N. A. Belokurova, K. S. Osikova, A. B. Zakharenko // Abstracts of proceedings of VIIth International Scientific Conference ‘Critical Issues in Designing of Earth Remote Sensing Systems’. – Moscow : ‘VNIEM Corporation’ JC, 2019 – Pp. 142 – 144.

*Andrei Borisovich Zakharenko, Doctor of Technical Sciences (D. Sc.), Head of Department,
Associate Professor, tel.: +7 (495) 366-26-44.*

*Kristina Sergeevna Osikova, PG Student, Engineer, tel. +7 (495) 366-01-47.
E-mail: otde118@mcc.vniem.ru.
(JC «VNIEM Corporation»).*