

УДК 621.318

КОНСТРУКЦИЯ ОСНАСТКИ ДЛЯ ИЗМЕРЕНИЯ МАГНИТНОЙ ИНДУКЦИИ ПОСТОЯННЫХ МАГНИТОВ ПРИ РАБОЧЕЙ ТЕМПЕРАТУРЕ

А.Б. Захаренко, С.А. Мартынова
(ОАО «Корпорация «ВНИИЭМ»)

Предложена конструкция приспособления (оснастки), имитирующего магнитную систему магнитоэлектрической машины. Приспособление, применяемое в составе стенда, позволяет провести входной контроль постоянных магнитов в части измерения магнитной индукции при рабочей температуре.

Ключевые слова: магнитоэлектрическая машина, приспособление, магнитная индукция, коэффициент подобия.

Введение

В настоящее время для улучшения массогабаритных показателей электроприводов в их составе всё чаще применяют синхронные магнитоэлектрические машины. В наибольшей степени показатели магнитоэлектрических машин определяют характеристики постоянных магнитов: магнитная индукция насыщения и коэрцитивная сила. При этом наблюдается тенденция к увеличению коэффициента использования и электромагнитных нагрузок электрической машины (магнитной индукции и плотности тока), повышаются температурные классы изоляции (в соответствии с [1] до 250°C). Сдерживающим фактором улучшения массогабаритных показателей магнитоэлектрических машин является недостаточно высокая рабочая температура постоянных магнитов.

Спеченные редкоземельные постоянные магниты NdFeB (основные компоненты смеси – неодим, железо, бор), обладают наилучшими магнитными свойствами при невысоких температурах (около 20 ÷ 25 °C) и низкой термостабильностью свойств. Согласно [2], у постоянного магнита, состоящего из редкоземельных элементов (неодим + диспрозий + тербий – 10,0 ÷ 40,0 %), бора (1,0 ÷ 10,0 %) и железа (остальное) температура Кюри составляет лишь около 310°C. Это не позволяет применять его в электромеханизмах, работающих при температурах выше 100°C, что значительно снижает конкурентоспособность этого магнита. Для увеличения термостабильности за счёт повышения температуры Кюри и коэрцитивной силы по намагниченности в состав постоянного магнита кроме неодима, диспрозия, тербия, бора и железа добавляют кобальт, а также легирующие элементы галлий и ниобий. При этом процент содержания кобальта в смеси достаточно высок и составляет 7 ÷ 14 %, галлия 0,75 ÷ 3 % и ниобия 0,75 ÷ 4 %. Это позволяет повысить термостабильность магнитных свойств постоянных магнитов за счёт повышения

температуры Кюри до 450°C и коэрцитивной силы по намагниченности до 1800 кА/м и даёт возможность его использования в магнитоэлектрических машинах с рабочей температурой выше 150°C.

Следует отметить также тенденцию к повышению стоимости редкоземельных постоянных магнитов. Наиболее существенным образом на их стоимость влияют именно кобальт, галлий и ниобий. В связи с этим ряд производителей, особенно зарубежных, уменьшая издержки именно за счёт уменьшения процентного содержания этих 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.

Целью данной работы является определение облика конструкции приспособления (оснастки) для измерения магнитной индукции на поверхности постоянных магнитов при рабочей температуре. Конструкция имитирует магнитную систему электрической машины.

Конструкция приспособления

Одной из наиболее важных электромагнитных нагрузок электрической машины является индукция в воздушном зазоре [3]. Кроме того, возможность обеспечить в натурном эксперименте расчётную величину индукции в воздушном зазоре при рабочей температуре характеризует соответствие характеристик постоянных магнитов требованиям технических условий.

Нагревание постоянных магнитов приводит к ухудшению их магнитных свойств. Во избежание их полного размагничивания необходимо проводить контроль их свойств при рабочей температуре в замкнутой магнитной системе. Входной контроль свойств постоянных магнитов, предназначенных для возбуждения электрической машины, желательно проводить на адекватном имитаторе её магнитной системы, а не в самой машине, поскольку

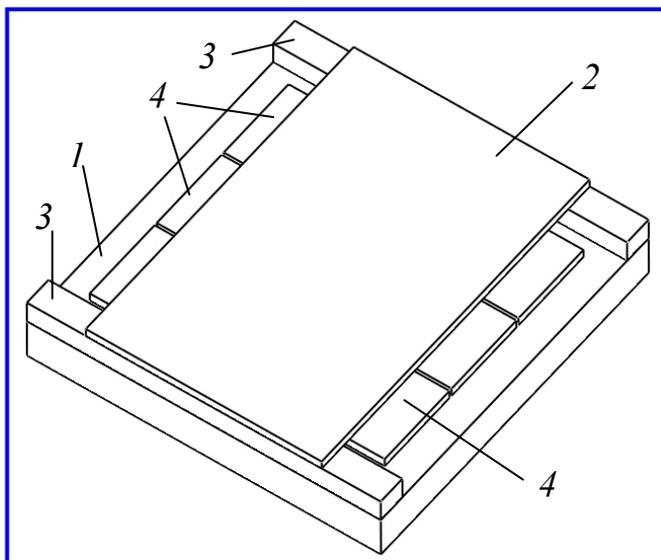


Рис. 1. Конструкция приспособления для измерения магнитной индукции постоянных магнитов при рабочей температуре

для обеспечения возможности выставления рекламации поставщику магнитов постоянные магниты не должны подвергаться приклейке или прикреплению иным крепежом, наносящим повреждения (царапины) на магниты. Конструкция машины не всегда обеспечивает возможность ввода чувствительного элемента тесламетра в её зазор. Габаритные размеры машины часто не позволяют поместить её в имеющуюся муфельную печь, необходимую для обеспечения равномерного нагрева постоянных магнитов до требуемой температуры. Вышеперечисленное определило необходимость создания имитатора магнитной системы электрической машины, позволяющего:

- прикрепить магниты к имитатору без использования крепежа, только при помощи сил магнитного притяжения;
- поместить имитатор в муфельную печь для нагрева до требуемой температуры;
- измерить значение индукции в воздушном зазоре, пересчитываемое в аналогичное значение в реальной машине, легко вводя в зазор имитатора чувствительный элемент тесламетра.

Конструкция такого имитатора – приспособления для измерения магнитной индукции постоянных магнитов при рабочей температуре [4] (рис. 1) – состоит из двух ферромагнитных магнитопроводов 1 и 2 и боковых ферромагнитных пластин 3, по которым замыкается магнитный поток при сборке приспособления с постоянными магнитами 4.

Магнитопроводы 1 и 2, а также пластины 3 выполнены из магнитомягкой низкоуглеродистой стали. Внутрь приспособления помещены три (или более трёх) постоянных магнита 4, зазор между двумя ферромагнитными магнитопроводами 1 и 2 и постоянными магнитами 4 позволяет внести в него чувствительный элемент тесламетра и провести измерение магнитной индукции в точке в середине осевой длины магнита (под сердечником 2) на поверхности центрального постоянного магнита. Вектор намагниченности постоянных магнитов 4 – в направлении наименьшего размера, полярность магнитов чередуется. Целостность приспособления обеспечивается магнитными силами притяжения постоянных магнитов 4.

Расчётная модель и коэффициент подобия

Для выбора размеров приспособления, обеспечивающих его подобие магнитной системе магнитоэлектрической машины, а также для определения коэффициента подобия по магнитной индукции в воздушном зазоре создана расчётная модель (рис. 2), являющаяся поперечным сечением конструкции, изображённой на рис. 1. Решалась двумерная задача магнитоэластики с граничными условиями Дирихле.

Для стали магнитопроводов 1 и 2, а также пластин 3 задана кривая намагничивания для поковок из стали 3 [3]. При заданных свойствах постоянных магнитов из материала 4 NdFeB с использованием метода конечных элементов [5] получено распределение суммарной магнитной индукции в расчётной модели (рис. 2), построена зависимость магнитной индукции в воздушном зазоре от координаты x (рис. 3). Из графика видно, что зависимость

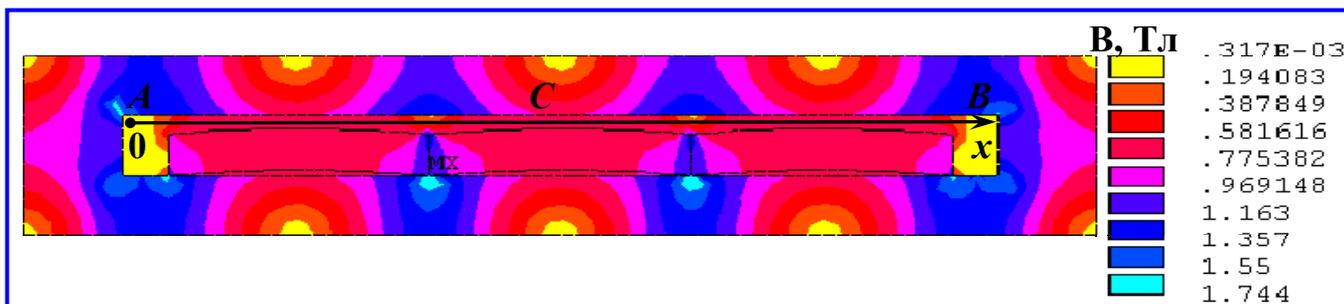


Рис. 2. Распределение суммарной магнитной индукции в расчётной модели

магнитной индукции в воздушном зазоре приспособления от координаты x качественно повторяет аналогичную зависимость в зазоре электрической машины, но у боковых магнитов наблюдаются искажения упомянутой характеристики. Таким образом, для измерения магнитной индукции наиболее пригоден центральный магнит.

Величина зазора между средним магнитом и верхним магнитопроводом 2 выбрана таким образом, чтобы обеспечить измерение магнитной индукции чувствительным элементом тесламетра. У большинства тесламетров этим элементом является тарированный датчик Холла в корпусе, расположенном на длинном шупе. Минимальный размер датчика в корпусе составляет около 1 мм. Для удобства измерений величина упомянутого зазора в приспособлении должна быть не менее 1,5 мм.

Введём коэффициент подобия k_{Π} реальной магнитоэлектрической машины и приспособления:

$$k_{\Pi} = B_{\text{ММ}}/B_{\text{ОСН}}, \quad (1)$$

где $B_{\text{ММ}}$ – расчётная индукция в зазоре реальной магнитоэлектрической машины; $B_{\text{ОСН}}$ – расчётная индукция в зазоре приспособления у центра среднего магнита (точка C на рис. 2 и 3). Для определения k_{Π} необходимо провести расчёт обеих индукций одним и тем же методом, например, конечных элементов, при одних и тех же заданных свойствах постоянных магнитов. В случае ненасыщенных магнитных систем коэффициент подобия

$$k_{\Pi} = \delta_{\text{ММ}}/\delta_{\text{ОСН}},$$

где $\delta_{\text{ММ}}$ – величина зазора в магнитоэлектрической машине; $\delta_{\text{ОСН}}$ – величина зазора в приспособлении. Для получения обоснованного результата измерений размеры приспособления необходимо выбирать исходя из условия обеспечения ненасыщенности его магнитной системы, т. е. например, для магнитопроводов из стали 3 средней индукции не более 1,6 Тл.

Методика контроля

На подготовленном приспособлении размещают не менее трёх постоянных магнитов в соответствии с рис. 1. Приспособление помещают в муфельную печь для нагревания до заданной (рабочей) температуры. После достижения температуры приспособление вынимают из печи и в течение минуты производят измерение индукции в зазоре у центра среднего магнита. Если измеренная индукция в зазоре приспособления $B_{\text{ОСН}}$ отличается от результата соотношения, полученного из (1):

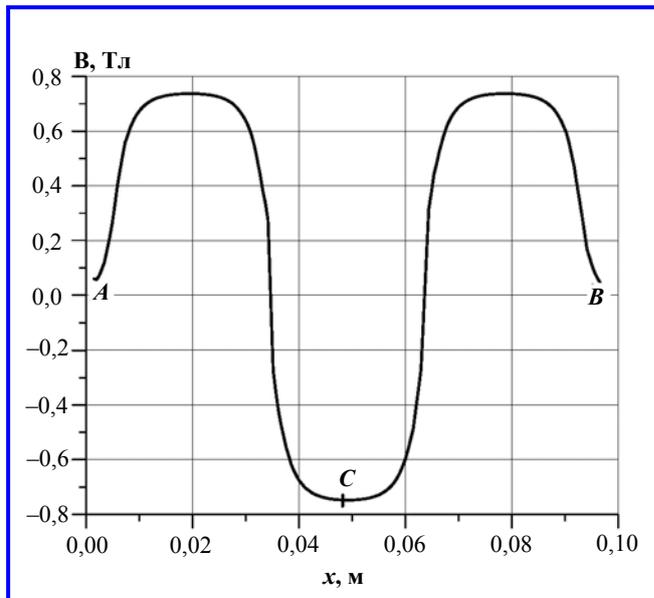


Рис. 3. Зависимость магнитной индукции B в воздушном зазоре приспособления от координаты x

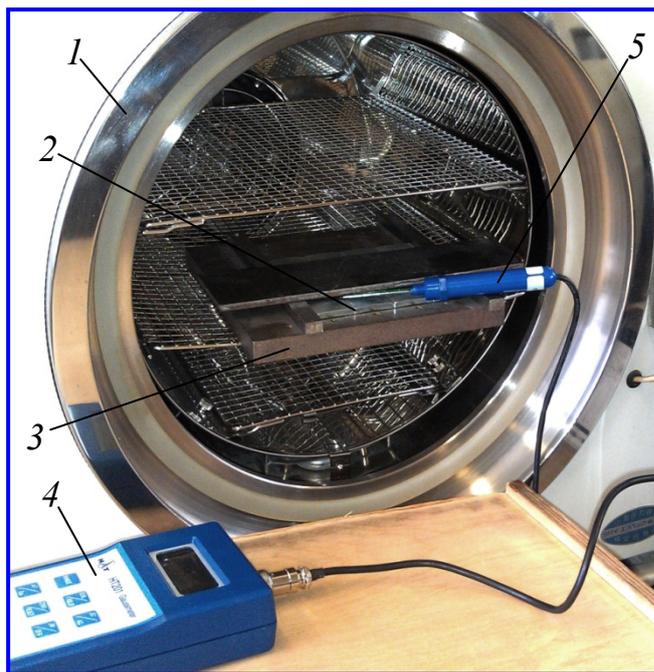


Рис. 4. Стенд для измерения магнитной индукции постоянных магнитов при рабочей температуре

$$B_{\text{ОСН}} = B_{\text{ММ}}/k_{\Pi},$$

не более чем на 5%, то центральный постоянный магнит удовлетворяет предъявляемым требованиям. Его необходимо заменить на следующий подвергаемый контролю магнит и провести измерения.

Внедрение приспособления

Для проведения входного контроля постоянных магнитов магнитоэлектрического двигателя для

макета следящего привода космического назначения создан стенд (рис. 4, где 1 – печь; 2 – постоянные магниты; 3 – магнитная система приспособления; 4 – тесламетр; 5 – щуп с чувствительным элементом тесламетра).

Внедрение приспособления позволило использовать для входного контроля постоянных магнитов имеющуюся компактную печь, позволяющую достаточно быстро с высокой точностью обеспечить заданную (рабочую) температуру и, в конечном итоге, обеспечить качественное проведение входного контроля постоянных магнитов.

Выводы

1. Разработка магнитоэлектрических машин с улучшенными массогабаритными показателями является актуальной задачей. Наибольшее влияние на эти показатели оказывает магнитная индукция в зазоре у постоянного магнита, измеренная при рабочей температуре.

2. Введён коэффициент подобия реальной магнитоэлектрической машины и приспособления, позволяющий обоснованно выбрать размеры оснастки.

3. Предложена конструкция приспособления для контроля магнитной индукции постоянных магнитов при рабочей температуре и методика контроля.

4. Создан и внедрён стенд для измерения магнитной индукции постоянных магнитов при рабочей температуре, позволивший обеспечить качественное проведение входного контроля постоянных магнитов для магнитоэлектрической машины для макета следящего привода.

Литература

1. ГОСТ 8865-93. Системы электрической изоляции. Оценка нагревостойкости и классификация. – Взамен ГОСТ 8865-87; переиздан 2003 – 10; введ. 1995 – 01 – 01. – Минск : Межгос. совет по стандартизации, метрологии и сертификации.
2. Пат. 2021640 Российская Федерация, МПК H01F1/053, C22C38/12 Материал для постоянных магнитов / Г. С. Коротков, А. А. Албутов, Л. С. Яковлев [и др.]. – Оpubл. 15.10.1994. – Патентообладатель Всероссийский научно-исследовательский, проектно-конструкторский и технологический институт релестроения.
3. Проектирование электрических машин: учебник для вузов в двух томах / И. П. Копылов, Б. К. Клоков, В. П. Морозкин [и др.]; под ред. И. П. Копылова. – М. : Высшая школа, 2002.
4. Пат. 138369 Российская Федерация, БИ №7 Конструкция оснастки для измерения магнитной индукции постоянных магнитов при рабочей температуре / А. Б. Захаренко, С. А. Мартынова. – Оpubл. 10.03.2004.
5. ANSYS в руках инженера: практическое руководство / А. Б. Каплун, Е. М. Морозов, М. А. Олферьева. – М. : Едиториал УРСС, 2003. – 272 с. : ил.

Поступила в редакцию 10.02.2014

*Андрей Борисович Захаренко, д-р техн. наук, начальник отдела, т. (495) 366-26 44.
Светлана Андреевна Мартынова, инженер, т. (495) 366-28-22.*