

УДК 621.318.2

## ВЫБОР РАЗМЕРОВ ОСНАСТКИ И РАСЧЁТ КОЭФФИЦИЕНТА ПОДОБИЯ МАГНИТНОЙ СИСТЕМЫ СИНХРОННОЙ МАГНИТОЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ МАШИНЫ И ОСНАСТКИ ДЛЯ ИЗМЕРЕНИЯ МАГНИТНОЙ ИНДУКЦИИ ПРИ РАБОЧЕЙ ТЕМПЕРАТУРЕ

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

*Предложены рекомендации по выбору размеров оснастки для измерения магнитной индукции постоянных магнитов при рабочей температуре для синхронных магнитоэлектрических машин, а также по расчёту коэффициента подобия по магнитной индукции магнитоэлектрической машины и оснастки.*

**Ключевые слова:** оснастка, магнитная индукция, коэффициент подобия.

В настоящее время широко применяются редкоземельные постоянные магниты с повышенной температурой Кюри (до  $450^{\circ}\text{C}$ ) и коэрцитивной силой по намагниченности до  $1800\text{ кА/м}$ , обладающие повышенной термостабильностью магнитных свойств за счёт специальных легирующих элементов, что даёт возможность их использования в магнитоэлектрических машинах с рабочей температурой выше  $150^{\circ}\text{C}$ .

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

Конструкция оснастки (или приспособления) для измерения магнитной индукции постоянных магнитов при рабочей температуре, предназначенных для возбуждения магнитоэлектрической машины, подробно описана в работах [1, 2]. Она состоит из двух ферромагнитных магнитопроводов 1 и 2 (рис. 1) 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. Внутри приспособления помещены три постоянных магнита 4, зазор между двумя ферромагнитными магнитопроводами 1 и 2 и постоянными магнитами 4 позволяет внести в него чувствитель-

ный элемент тесламетра и провести измерение магнитной индукции в точке 5 (на рис. не показано) 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.

Целями настоящей работы является:

- 1) определение размеров оснастки для проведения измерений магнитной индукции на поверхности постоянных магнитов;
- 2) расчёт коэффициента подобия по магнитной индукции  $k_n$  магнитоэлектрической машины и оснастки.

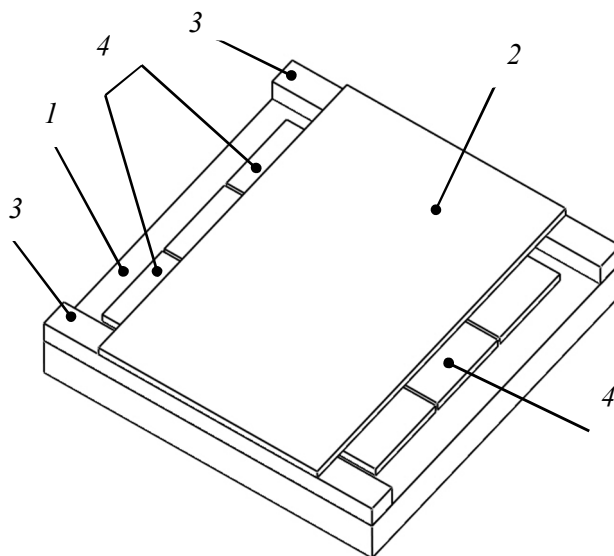


Рис. 1. Конструкция оснастки для измерения магнитной индукции постоянных магнитов при рабочей температуре

Для определения размеров и массы оснастки будем учитывать, что оснастка используется для входного контроля магнитной индукции постоянных магнитов макетного образца магнитоэлектрической машины с числом зубцов  $z = 27$  на статоре, где размещена трёхфазная силовая обмотка, и числом пар полюсов  $p=12$ , с максимальным моментом 350 Н·м [3]. При внешнем диаметре 0,5 м и активной длине магнитоэлектрической машины 0,1 м её масса составила 56 кг.

Выбор размеров пластин оснастки 1 и 2 был проведён, исходя из размеров постоянных магнитов (рис. 1). Величина зазора между исследуемыми магнитами 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. Исходя из величины воздушного зазора и радиальной высоты постоянных магнитов выбирается высота пластин 3 оснастки. При габаритных размерах оснастки 0,12 м × 0,12 м × 0,03 м масса оснастки составила 4,8 кг. Таким образом, оснастку существенно проще разместить в муфельной печи, чем ротор магнитоэлектрической машины. Измерение магнитной индукции также упрощается.

Для определения коэффициента подобия необходимо провести расчёт магнитного поля магнитоэлектрической машины и оснастки одним и тем же методом, например, конечных элементов, при одних и тех же заданных свойствах постоянных магнитов. Коэффициент подобия  $k_n$  магнито-

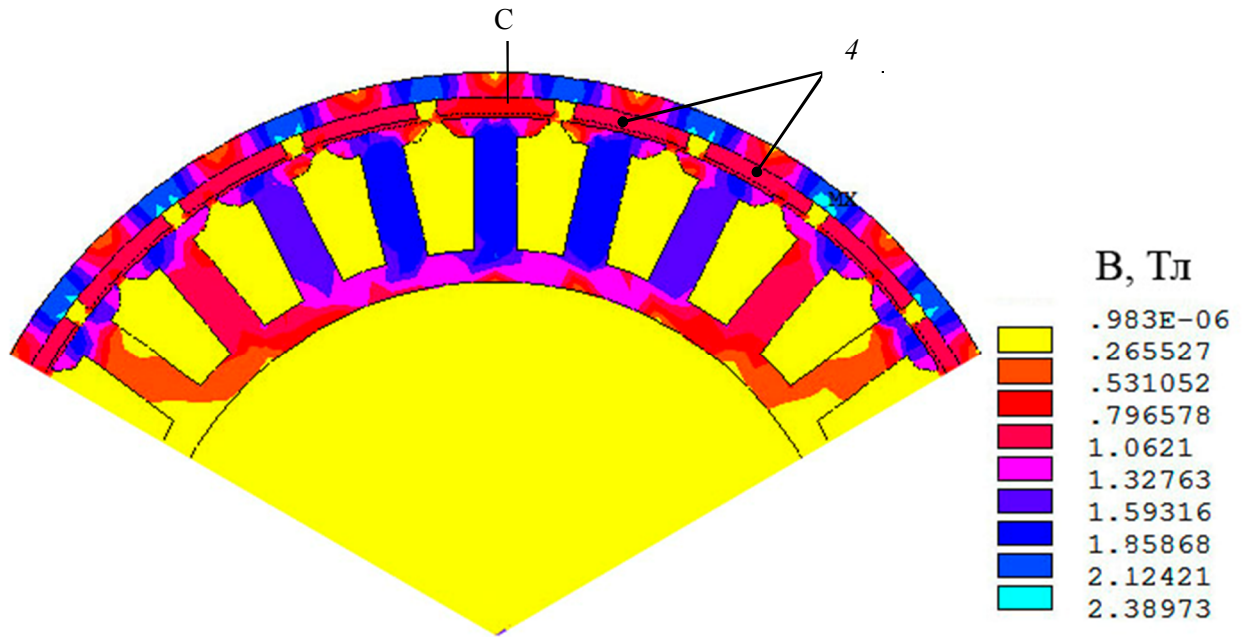


Рис. 2. Распределение суммарной магнитной индукции в симметричной части расчётной модели магнитоэлектрической машины

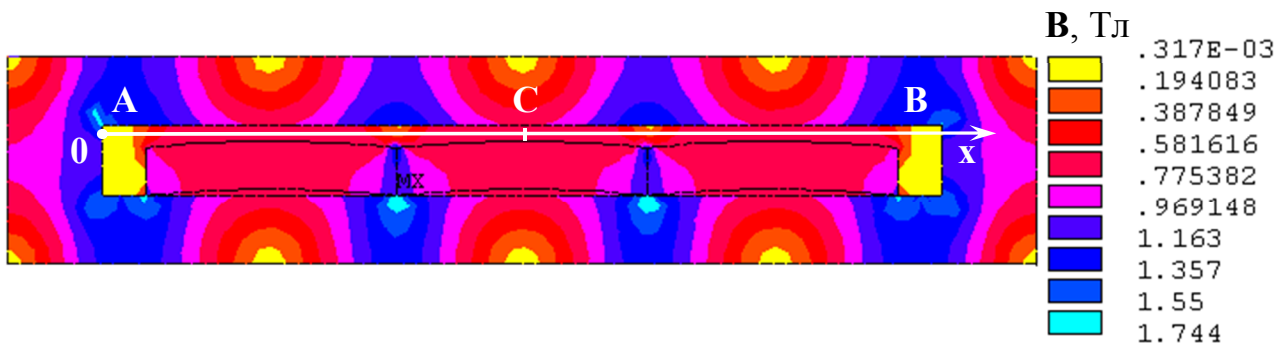


Рис. 3. Распределение суммарной магнитной индукции в расчётной модели оснастки

электрической машины и оснастки определяется формулой, приведённой в [1]:

$$k_n = |B_{MM}/B_{OCH}|, \quad (1)$$

где  $B_{MM}$  – расчётная максимальная индукция в зазоре магнитоэлектрической машины;  $B_{OCH}$  – расчётная максимальная индукция в зазоре приспособления у центра среднего магнита (точка С на рис. 2 и 3).

Проведём расчёт магнитного поля упомянутой машины и оснастки (рис. 2 и 3). При этом максимальная индукция в магнитной системе оснастки не должна существенно превышать индукцию насыщения стали пластин 1, 2 и 3. В обоих случаях расчётная модель являлась поперечным сечением конструкции. Решалась двумерная задача магнито-статика с граничными условиями Дирихле. При этом на рис. 2 представлена лишь симметричная третья часть расчётной модели в виде сектора. Обе расчётные модели были возбуждены от радиально намагниченных постоянных магнитов 4 с идентичными свойствами. Для стали магнитопроводов 1 и 2, а также пластин 3 оснастки была задана кривая намагничивания для поковок из стали 3, что примерно соответствует применяемой в реальной оснастке конструкционной стали. При заданных свойствах постоянных магнитов с использованием метода конечных элементов получено распределение суммарной магнитной индукции в расчётных моделях (рис. 2 и 3), и построены зависимости магнитной индукции в воздушном зазоре от линейной координаты по окружности вдоль воздушного зазора (рис. 4) и координаты  $x$  (рис. 5).

Из графиков (рис. 4 и 5) видно, что зависимость магнитной индукции в воздушном зазоре оснастки от координаты  $x$  качественно повторяет аналогичную зависимость в зазоре магнитоэлектрической машины для трёх центральных постоянных магнитов. При этом у боковых магнитов оснастки наблюдаются искажения упомянутой характеристики. Таким образом, для измерения магнитной индукции наиболее пригоден центральный магнит, в формулу (1) следует подставлять максимальные индукции, обусловленные центральными постоянными магнитами. В рассматриваемом примере в соответствии с формулой (1)  $k_n = 1,2$ .

С использованием вычисленного коэффициента подобия можно, измерив магнитную индукцию от центрального магнита оснастки при рабочей температуре, вычислить магнитную индукцию в зазоре магнитоэлектрической машины, провести расчёт характеристик магнитоэлектрической машины,

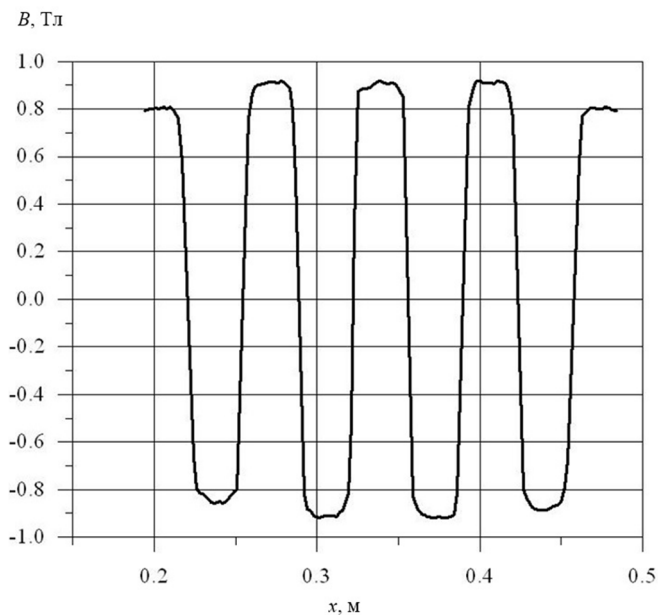


Рис. 4. Расчётная зависимость магнитной индукции  $B$  в воздушном зазоре магнитоэлектрической машины от координаты по окружности вдоль воздушного зазора для симметричной части расчётной модели

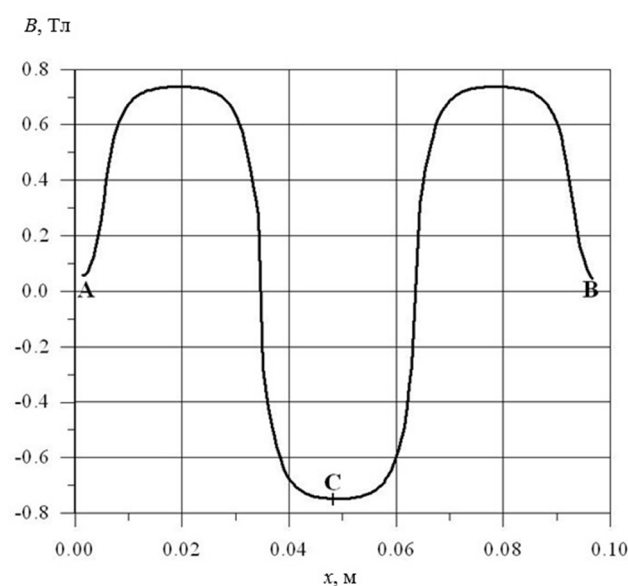


Рис. 5. Расчётная зависимость магнитной индукции  $B$  в воздушном зазоре оснастки (приспособления) от координаты  $x$

согласно [4] и, в конечном итоге, проанализировать возможность выполнения предъявляемых к машине требований.

### Выводы

1. Предложены рекомендации по выбору размеров оснастки для измерения магнитной индукции постоянных магнитов при рабочей температуре для синхронных магнитоэлектрических машин. Полученная в результате масса оснастки существенным образом (на порядок) меньше массы магнитоэлектрической машины.

2. Предложены рекомендации по расчёту коэффициента подобия по магнитной индукции магнитоэлектрической машины и оснастки. Проведён расчёт коэффициента подобия. При его использовании можно, измерив магнитную индукцию от центрального магнита оснастки при рабочей температуре, вычислить магнитную индукцию в зазоре магнитоэлектрической машины.

### Литература

1. Захаренко А. Б., Мартынова С. А. Конструкция оснастки для измерения магнитной индукции постоянных магнитов при рабочей температуре // Вопросы электромеханики. Труды ВНИИЭМ. – 2014. – Т. 138. – № 1. – С. 3 – 6.
2. Захаренко А. Б., Мартынова С. А. Конструкция оснастки для измерения магнитной индукции постоянных магнитов при рабочей температуре. Патент на полезную модель РФ № 138369 по заявке № 2013151851, опубликовано 10.03.2014, бюллетень № 7, 2 с.
3. Захаренко А. Б., Мартынова С. А. Выбор основных конструктивных соотношений в активной части электрических машин с электромагнитной редукцией // Вопросы электромеханики. Труды ВНИИЭМ. – 2014. – Т. 142.
4. Мартынова С. А., Захаренко А. Б. Методика поверочного расчёта синхронных электрических машин с электромагнитной редукцией // Вопросы электромеханики. Труды ВНИИЭМ. – 2014. – Т. 142.

Поступила в редакцию 17.12.2014

*Андрей Борисович Захаренко, д-р техн. наук, начальник отдела,  
т. (495) 366-26-44.*

*Светлана Андреевна Мартынова, аспирант, научн. сотрудник,  
т. (495) 366-28-22.*

*E-mail: vniiem@vniiem.ru.*