

Д.А. ГАБРИЕЛЯН,
канд. техн. наук,
В.В. СЕМЕНОВ,
д-р техн. наук,
А.А. УТЕШЕВ,
аспирант
(МАИ, Москва)
david@gbtl.ru
Semenov@mai.ru
uteshev_aleksei@mail.ru

Моделирование магнитной силы притяжения в магнитотепловом двигателе

Приведены результаты натурных измерений величины магнитной силы притяжения, действующей на стальной шуп, со стороны магнитной системы. Данные расчетов, сделанные в программе ANSYS, сравниваются с результатами эксперимента.

Магнитотепловой двигатель, трехмерный анализ магнитостатики, ANSYS, постоянные магниты, магнитная система

В статье решается проблема создания альтернативных источников электропитания в области энергетического обеспечения функционирования космических систем. Одним из таких источников электропитания может стать магнитотепловой двигатель, использующий для своей работы эффект преобразования магнитотепловой энергии в механическую и/или электрическую [1].

Рассмотрена задача трехмерного анализа магнитостатики в магнитных системах устройства. Создан измерительный стенд, на котором проведены натурные измерения величины силы магнитного притяжения. Проведены тестовые расчеты для выявления соответствия выбранной модели расчета и ее результатов с результатами натурных измерений для дальнейшего моделирования и определения оптимальной геометрии системы.

Развитие магнитотепловой технологии, в частности, технологии магнитного охлаждения напрямую связано с углублением изучения магнитных материалов и улучшением технологии их изготовления [2]. Наибольший уровень магнитного поля у сверхпроводящих электромагнитов, вследствие необходимости в детально разработанной системе охлаждения они могут быть оптимальным выбором для крупномасштабных устройств, к примеру для складских холодильных машин [3, 4]. Для компактных современных устройств и систем основными источниками магнитного поля становятся постоянные магниты.

На рис. 1 представлена принципиальная схема магнитотеплового двигателя. Здесь: 1, 2 – неподвижные диски статора; 3, 4 – диски ротора; 5 – вал; 6 – ферромагнитные рабочие элементы; 7 – полюса постоянных магнитов; 8 – подшипник; 9, 10 – трубки для подвода горячей и холодной [5].

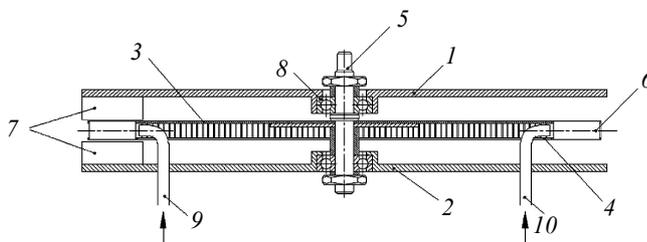


Рис. 1

Основным энергетическим узлом установки является магнитная система 7 – источник постоянного магнитного поля, приводящего роторный диск 3 во вращение. Изучение характеристик магнитного поля системы сегодня является основной задачей, решение которой позволит существенно продвинуться в проектировании и создании эффективной магнитотепловой энергоустановки.

Метод расчета и исходные данные

Все дальнейшие расчеты параметров магнитной системы проводились методом конечных элементов с использованием программного комплекса ANSYS. Данный метод заключается в аппроксимации непрерывной модели, основанной на множестве кусочно-непрерывных функций, которые, в свою очередь, определены на конечном числе подобластей модели.

Математическим описанием непрерывных в пространстве и времени процессов электромагнитного поля являются дифференциальные уравнения в частных производных из преобразования уравнений Максвелла. Зная распределение вектора магнитного потенциала по области моделирования, можно определить результирующее значение вектора магнитной индукции [6, 7].

Исходные параметры расчетной модели и измерительного стенда:

- материал постоянного магнита (ПМ) – Nd – Fe – В (марка № 38);
- коэрцитивная сила ПМ – $H_c = 890$ кА/м;
- остаточная магнитная индукция ПМ – $B_r = 1,24$ Тл;
- намагниченность ПМ аксиальная (по толщине);
- материал конструкционных деталей и щупа – сталь инструментальная Р6 М5-МП (М 2).

На экспериментальном стенде магнитную силу притяжения определяет цифровой механический растяжной динамометр Unigram HSB-7500G. Предельный измеряемый вес – 7500 г. Погрешность показаний при весе 0 – 1000 г составляет 5 г; при 1000 г – 7500 г, погрешность по паспорту изделия – 10 г.

Расчетная модель и измерительный стенд

Геометрия расчетной модели с конечно-элементной сеткой представлена на рис. 2. Здесь: 1 – экран из магнитомягкого материала; 2 – постоянный магнит; 3 – стальной щуп. Расчетная модель представляет собой магнитную систему, состоящую из двух одинаковых постоянных магнитов размерами 40×40×20 мм, расположенных симметрично.

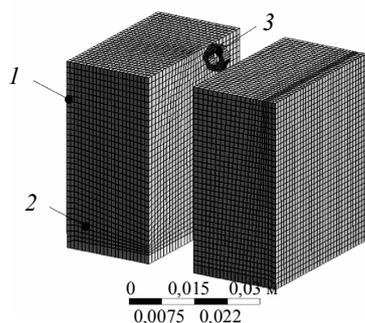


Рис. 2

Металлические уголки необходимы на стенде для установления магнитов и фиксации межполюсного зазора. Они прикреплены к деревянной подставке с помощью винтов. На одном краю подставки с помощью уголка закреплена стойка с перпендикулярной к ней балкой, высоту которой можно регулировать. На конце этой балки подвешен растяжной динамометр, на крючок которого с помощью медной проволоки закреплен щуп в форме шестигранной гайки (рис. 3, в). В середине немагнитной вставки просверлено отверстие для свободного помещения в него зонда.

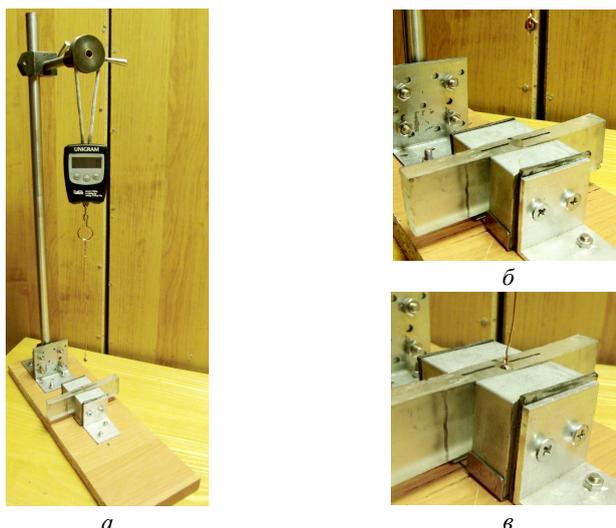


Рис. 3

Магниты располагаются разнополюсно друг к другу на расстоянии 12 мм. Аналогичная магнитная система собрана на измерительном стенде (рис. 3, а). Рабочий зазор в 12 мм выдерживается за счет немагнитной вставки заданной толщины во избежание схлопывания системы (рис. 3, б). Магниты с двух сторон обложены металлическим экраном в виде уголка.

Сравнение результатов расчета и измерения

Величина силы измерялась на выходе из немагнитной вставки, расположенной заподлицо с магнитами. Из-за постоянно действующей силы на зонд, создающей сложность при снятии результата, измерения проводились десять раз (таблица). Среднее значение измерений $F_{\text{ср}} = 2,345$ Н принято за результат измерений, и с ним сравнивается полученное при решении компьютерного моделирования значение $F = 2,2916$ Н.

Номер пробы	Сила F , Н	Номер пробы	Сила F , Н
1	2,30	6	2,55
2	2,20	7	2,30
3	2,35	8	2,35
4	2,35	9	2,35
5	2,45	10	2,25

Разница значений между стендовым измерением и расчетным значением силы магнитного притяжения системой стального зонда составляет 0,0534 Н, что обусловлено погрешностями стендового измерения и трехмерного расчета в среде ANSYS.

Итоги проведения тестовых задач и сравнение их с натурными измерениями показали, что в расчетном пакете ANSYS возможно добиться высокоточных результатов.

Пакет ANSYS в дальнейшем послужит инструментом моделирования силы магнитного притяжения и распределения магнитной индукции в межполюсном зазоре различных магнитных систем. По результатам моделирования будет проводиться выборка оптимальных для конкретной задачи магнитных систем, после экспериментального исследования – окончательный выбор магнитной системы.

Моделирование задач магнитостатики позволяет существенно сократить время поисковых и проекторочных работ, а также способствует накоплению базы данных систем на постоянных магнитах для магнитотепловых энергетических устройств.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Габриелян Д.А. Магнитотепловой двигатель. Перспективы развития магнитотепловой технологии // Научно-технический вестник Поволжья. 2012. № 2. С. 160–166.
2. Bjork R. et al. Review and comparison of magnet designs for magnetic refrigeration // International Journal of Refrigeration. 2010. Vol. 33. Iss. 3. P. 437–448.
3. Bouchekara H.R.E.H. et al. Multiphysics modeling of a magnetic refrigeration system based on superconductors // Progress in Electromagnetics Research M. 2012. Vol. 23. P. 229–247.
4. Vasile C. et al. Energy efficient and environmental safe magnetic cooling system // Proc. of the 7th International Conference, May 22–23, 2008, Vilnius, Lithuania. Vol. 2. P. 886–893.
5. Магнитотепловой двигатель: пат. на полезную модель 118369 Рос. Федерация, № 2012110794/06; заявл. 22.03.2012, опубл. 20.07.2012.
6. Андреева Е.Г., Шамец С.П., Колмогоров Д.В. Расчет стационарных магнитных полей и характеристик электротехнических устройств с помощью программного пакета ANSYS [Электронный ресурс]. URL: http://www.ogbus.ru/authors/Andreeva/Andreeva_1.pdf (дата обращения: 28.05.2014).
7. Буль О.Б. Методы расчета магнитных систем электрических аппаратов. Программа ANSYS. М.: Академия, 2006. 288 с.

Поступила в редакцию 30.05.14

Simulation of Magnetic Attraction Force in the Thermo-Magnetic Engine

D.A. GABRIELIAN, V.V. SEMENOV, AND A.A. UTESHEV

In this paper, the results of experimental measurements of magnetic attractive force acting on a steel probe by the magnetic system are presented. The calculation results obtained using ANSYS software and experimental results are compared.

Thermomagnetic engine, three-dimensional magnetostatic analysis, ANSYS, permanent magnets, magnetic system