

И.А. Дорош, С.В. Тарасов, М.Г. Снегирев

РАЗРАБОТКА АЛГОРИТМА И ПРОГРАММНОГО СРЕДСТВА ДЛЯ РАСЧЕТА ПАРАМЕТРОВ МАГНИТНОГО ПОЛЯ МАГНИТНОГО ПОДВЕСА ЭНЕРГЕТИЧЕСКОЙ УСТАНОВКИ

Аннотация. Работа посвящена разработке алгоритма и созданию программного средства для расчета параметров магнитного поля в системе подвеса ротора для вертикально-осевой ветроэлектрической установки с Н-ротором Дарье.

Ключевые слова: магнитный подвес, ветроэлектрическая установка, Н-ротор Дарье, магнитостатический подвес, магнитная решетка Хальбаха, программное средство.

Постановка проблемы

Эффективным способом снижения моментов сопротивления в опорно-поворотных узлах ВЭУ с Н-ротором Дарье, одновременно приводящим к существенному упрощению их кинематических схем, является применение систем подвешивания на постоянных магнитах.

В работе рассматривается магнитостатический подвес, принцип действия которого основан на взаимодействии между источниками постоянных магнитных полей. В качестве источников магнитных полей предлагается использовать постоянные магниты.

В зазоре между постоянными магнитами концентрируется магнитное поле, от величины которого зависят отталкивающие или притягивающие усилия.

Одним из способов увеличить магнитное поле, и как следствие, силу взаимодействия, является магнитная решетка Хальбаха [1], представляющая собой систему постоянных магнитов, расположенных по особой схеме, в соответствии с которой вектор индукции каждого последующего магнита повернут на определенный угол по отношению к предыдущему. При этом поле с одной стороны полученного массива становится существенно больше чем с другой.

В этом случае актуальной становится задача определения параметров магнитного поля в зазоре магнитного подвеса, в том числе и

визуализации картины распределения магнитной индукции для систем постоянных магнитов.

К основным вычисляемым параметрам относится трёхмерное распределение величины магнитной индукции, значения силы и момента сил взаимодействия массивов постоянных магнитов.

Таким образом, в работе предлагается методика количественной оценки магнитной индукции, силы взаимодействия массивов постоянных магнитов и визуализации результатов.

Анализ последних достижений

Применение современных компьютерных технологий позволяют значительной мере упростить изучение магнитных свойств магнитных систем.

В настоящее время для решения задач магнитостатики разработан ряд программных комплексов, однако особенности конфигурации исследуемой системы требуют задания особых граничных условий, которые сложно, а иногда и невозможно реализовать существующими программными средствами.

Формулировка цели

Целью работы является разработка алгоритма и создание программного средства для определения параметров магнитного поля в магнитостатическом подвесе, а также для визуализации полученных результатов.

Основная часть

В работе разработан алгоритм и программное средство для расчета параметров магнитного поля массива постоянных магнитов. Особенность программы заключается в возможности расчета таких конфигураций массивов магнитов, в которых векторы магнитного поля магнитов направлены в разные стороны. Примером такой конфигурации магнитного массива с изменяющимся направлением магнитного поля может служить магнитная решетка Хальбаха.

Алгоритм разработанного программного средства базируется на дипольном представлении элементов постоянного магнита [2] (рис. 1). Каждый постоянный магнит массива рассматривается как совокупность некоторого набора магнитных диполей.

Сила, действующая на второй диполь со стороны первого можно представить как отношения потенциальной энергии к перемещению, т.е. радиус-вектору.

$$\vec{F} = -\frac{\partial U}{\partial \vec{R}} \quad (1)$$

где ∂U – изменение энергии; \vec{R} – радиус-вектор соединяющий центры диполей.

Диполь во внешнем магнитном поле имеет потенциальную энергию равную

$$U = -\vec{m} \cdot \vec{B} \quad (2)$$

где \vec{m} – вектор магнитного дипольного момента; \vec{B} – величина магнитной индукции системы диполей.

Выражение магнитного поля одиночного диполя имеет вид

$$\vec{B} = \frac{1}{4\pi\epsilon_0 c^2} \frac{3(\vec{m} \cdot \vec{R})\vec{R} - \vec{m} R^2}{R^5} \quad (3)$$

где ϵ_0 – диэлектрическая проницаемость вакуума, c – скорость света в вакууме.

С учетом (1) и (2) выражение для силы взаимодействия двух элементарных магнитных диполей с векторными дипольными моментами \vec{m}_1 и \vec{m}_2 можно записать в виде

$$\vec{F} = \frac{3}{4\pi\epsilon_0 c^2} \frac{1}{R^5} \left(\vec{m}_1(\vec{m}_2 \cdot \vec{R}) + \vec{m}_2(\vec{m}_1 \cdot \vec{R}) + \vec{R} \left((\vec{m}_1 \cdot \vec{m}_2) - 5 \frac{(\vec{m}_1 \cdot \vec{R})(\vec{m}_2 \cdot \vec{R})}{R^2} \right) \right) \quad (4)$$

Таким образом, сила взаимодействия массивов в магнитостатическом подвесе определяется как суперпозиция взаимодействий элементарных диполей, принадлежащих разным магнитным системам. На рисунке 1 показана такая система, состоящая из двух массивов Хальбаха.

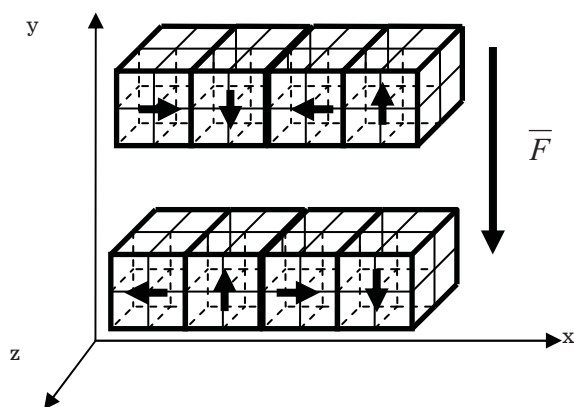


Рисунок 1 – Дипольное представление массивов постоянных магнитов

Магниты, входящие в массив представляются как набор элементарных элементов-диполей, поле каждого из которых описывается уравнением (5). Позиция каждого элемента в представленном массиве определяется выражениями

$$\begin{aligned} X &= X_0 + (k - 1)(d_x / n_x) + d_x / 2n_x \\ Y &= Y_0 + (k - 1)(d_y / n_y) + d_y / 2n_y \\ Z &= Z_0 + (k - 1)(d_z / n_z) + d_z / 2n_z \end{aligned} \quad (5)$$

где X, Y, Z – координаты искомого элемента; X_0, Y_0, Z_0 – координаты первого элемента первого магнита в массиве; k – номер искомого элемента; d – длина соответствующей стороны магнита; n – количество элементов-разбиений в магните.

Разработанный алгоритм реализован в программном средстве, которое использует возможности среды MATLAB.

Для получения результатов необходимо задать начальные условия, а именно: размеры элементов массивов (геометрические размеры постоянного магнита); количество разбиений элемента массива; расстояние между системы магнитов до точки (плоскости), в которой необходимо вычислить магнитное поле; направление магнитного поля элементов массива; величина магнитной индукции материала постоянного магнита; начальные координаты массивов постоянных магнитов. Параметры можно ввести в специальном окне (рис. 2).

На рисунке 2 приведено окно программного средства, в котором указаны начальные условия.

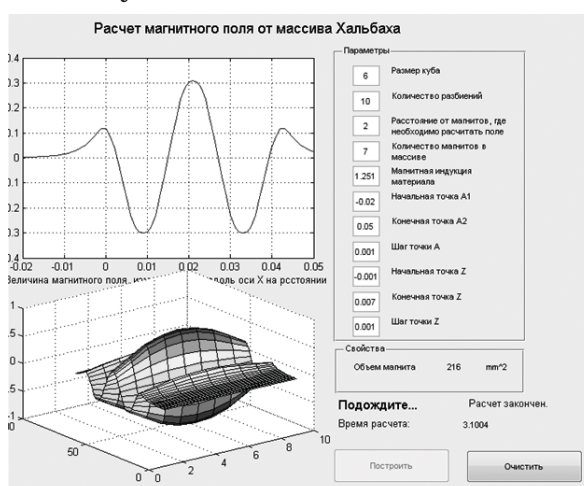


Рисунок 2 – Интерфейс программы

Программное средство позволяет также визуализировать распределение магнитной индукции вблизи массива постоянных магнитов в виде 2D- и 3D-графиков.

Графики изменения одной из компонент магнитного поля вдоль массива постоянных магнитов с различной ориентацией направления магнитного поля показаны на рисунке 3. На рисунке 3а приведен результат моделирования поля постоянных магнитов, магнитные поля каждого из которых ориентированы в одном направлении. На рисунке 3б показаны результаты моделирования магнитного поля магнитной решетки Хальбаха, полученная зависимость близка к синусоидальной.

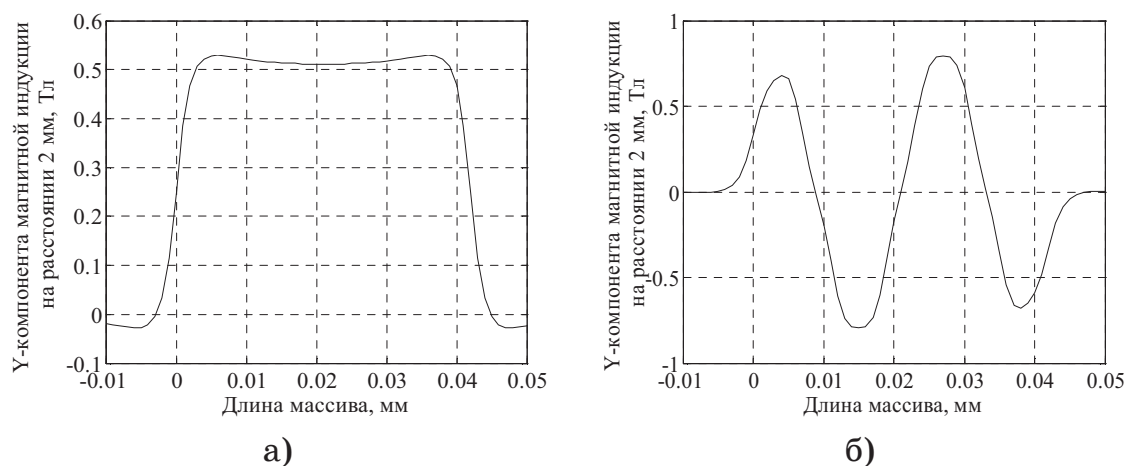


Рисунок 3 – Графики изменения Y-компоненты магнитного поля вдоль массива магнитов

На рисунке 4 представлен трёхмерный вид распределения Y-компоненты магнитного поля на плоскости, отстоящей на расстоянии 2 мм от массива Хальбаха.

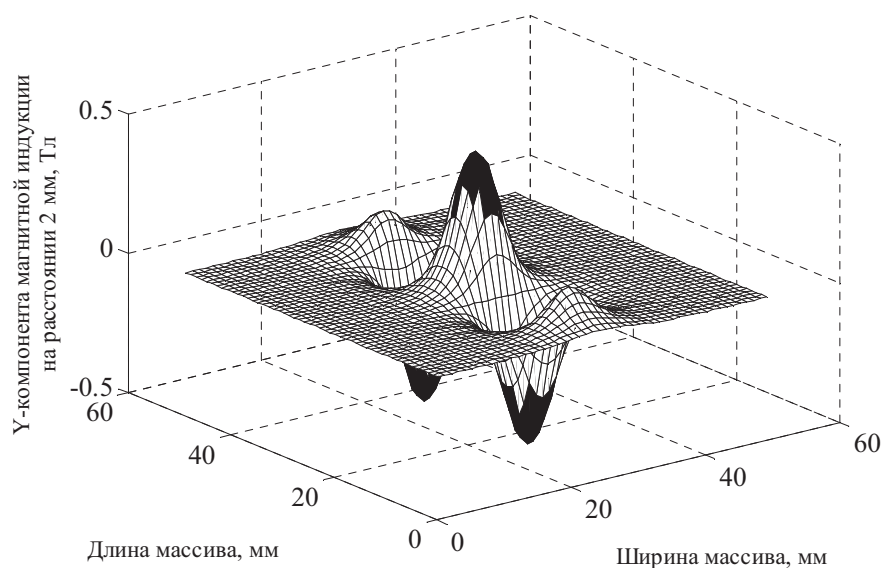


Рисунок 4 – Нормальная составляющая магнитного поля массива Хальбаха

На рисунках 5, 6 приведены результаты определения возникающего подъемного усилия применительно к подвесу на постоянных магнитах на базе массивов Хальбаха, для которого характерно изменение направления магнитной индукции каждого следующего постоянного магнита по отношению к предыдущему. График на рисунке 5 соответствует расчетам силы взаимодействия двух массивов, когда направления вращения векторов магнитной индукции совпадают. График на рисунке 6 показывает силы взаимодействия двух массивов, когда направления вращения векторов магнитной индукции противоположны.

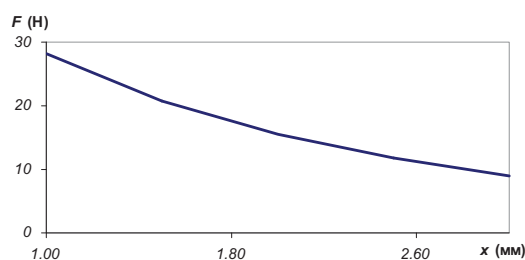


Рисунок 5 – Результаты расчета силы взаимодействия двух массивов, когда направления вращения векторов магнитной индукции совпадают

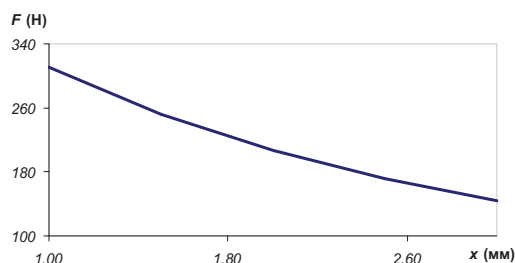


Рисунок 6 – Результаты расчета силы взаимодействия двух массивов, когда направления вращения векторов магнитной индукции противоположны

Сравнительный анализ результатов, приведенных на этих графиках, показывает, что при использовании двух массивов Хальбаха, сила взаимодействия больше для массива постоянных магнитов той конфигурации, у которой направления вращения векторов магнитной индукции противоположны.

Наиболее перспективной конфигурацией в плане достижения более высоких значений магнитного поля в зазоре является массив Хальбаха. Исследование массивов Хальбаха с четырьмя и восемью сегментами в виде геометрически идентичных постоянных магнитов

показало, что на малых расстояниях от их поверхности магнитное поле у восьмисегментного массива меньше по сравнению с четырехсегментным, но с увеличением расстояния результаты меняются на противоположные. При этом восьмисегментный массив Хальбаха создает высокое магнитное поле в области $0.5d$ и $0.7d$ (d – толщина магнита) и менее низкое его значение в области $0.25d$ и $0.1d$, чем четырехсегментный. Таким образом, в зависимости от поставленной задачи может применяться необходимая конфигурация массива Хальбаха.

Выводы

Разработаны алгоритм и программное средство для изучения магнитных свойств систем, состоящих из массивов постоянных магнитов. Использовано дипольное представление постоянного магнита, учитываются магниты различной геометрической формы, рассматриваются массивы, магниты которых имеют различное направление вектора магнитной индукции.

С использованием разработанного программного средства проведены расчеты силы взаимодействия в магнитостатическом подвесе на постоянных магнитах при различных конфигурациях направления вектора магнитной индукции магнита.

Предлагаемое программное средство, позволяет определить параметры магнитного поля, которые необходимы для выбора оптимальной с точки зрения требуемых значений магнитной индукции, конфигурации постоянных магнитов в подвесах различного конструктивного исполнения. Кроме того, оно может быть использовано при оценке способности магнитостатического подвеса на постоянных магнитах создавать необходимые по величине магнитные усилия, достаточные для обеспечения магнитной левитации роторов вертикально-осевых ветроэлектрических установок с Н-ротором Дарье. Программа имеет возможность для ее дальнейшего расширения для расчетов магнитных полей и сил от магнитных систем более сложных конфигураций.

ЛИТЕРАТУРА

1. Тарасов С.В. Магнитолевитирующий подвес роторов вертикально-осевых ветроэлектрических установок с Н-ротором Дарье на базе массива Хальбаха / С.В. Тарасов, М.Г. Снегирев, И.А. Дорош // Техническая механика. – 2010. – №1. – с. 94-103.
2. Ландау Л.Д. Теоретическая физика. Учебное пособие. Том II. Теория поля – 7-ое издание / Л.Д. Ландау, Е. М. Лифшиц. – М. : Наука, 1988. – 512 стр.