

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

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ТОЧНОГО ВИДА ПОТЕНЦИАЛОВ И МАГНИТНЫХ ПОЛЕЙ ДЛЯ ПЕРИОДИЧЕСКИХ МАГНИТНЫХ СИСТЕМ

Аннотация. В работе приводятся результаты анализа известных программных комплексов вычисления полей магнитных систем, анализируются их недостатки. Описывается программа для точного вычисления магнитных полей и потенциалов осесимметричных периодических магнитных систем, основанная на альтернативном алгоритме определения полей методом магнитных токов и зарядов. Приводятся преимущества и недостатки данной программы.

Ключевые слова. Системы магнитного подвешивания, периодические магнитные системы, моделирование, программное средство.

Применение компьютерных инженерных программных комплексов компьютерного моделирования позволяют существенно повысить производительность расчетов полей магнитных систем и определение сил и моментов их взаимодействия, существенно сократить время требуемое на построение моделируемой магнитной системы и определение её свойств. С другой стороны, проведенные как нами, так и сторонними исследователями [1-3] тесты показывают, что данные комплексы по-прежнему требуют верификацию полученных в них промежуточных и конечных результатов.

Особенно ярко проблемы с точностью вычисления полей магнитных систем проявляются в области определения характеристикборок постоянных магнитов с малым шагом периодичности, применяемых в качестве элементов систем магнитного подвеса [4]. Автоматические алгоритмы генерации пространственной сетки для основной массы коммерческих программ, таких как Ansys, Maxwell3D, SolidWorks достаточно плохо справляются с задачей генерации адекватной сетки для быстпропеременных магнитных систем. Анализ результатов проведенных тестов некоторых известных программных комплексов, предназначенных для определения магнитного поля систем по-

стоянных магнитов, показывает, что для адекватного воспроизведения полей периодических магнитных структур, они требуют существенной настройки под конкретную конфигурацию системы (параметров интегрирования, формы и размеров сетки, и т.п.). Без такой настройки распределение магнитного поля зачастую далеко от реального. Ещё более велики отличия пространственных производных магнитного поля, играющих важную роль в верном вычислении сил и моментов в индукционных системах подвеса. Более того, для магнитных структур со сложной конфигурацией, например периодических магнитных систем с цилиндрической симметрией, в некоторых случаях, без наличия априорной информации об истинной конфигурации магнитного поля, затруднительно даже судить в какой мере полученное распределение поля отвечает истинному, а в какой – является погрешностью работы алгоритма программы моделирования. В качестве примера на рис. 1 показано сравнение графиков точного значения (линия 1) модуля магнитного поля цилиндрического периодического массива Хальбаха, и значений модуля магнитного поля, вычисленного в одном из пакетов конечно-элементного анализа магнитных систем (линия 2).

Проведенные тесты показывают, что для сложных быстропериодических конфигураций источников поля, вычисленные сеточными методами поля могут иметь среднеквадратичное отклонение в 20-40% от теоретических значений полей, локальные отклонения значений полей могут превышать 150-200%, а погрешности градиентов магнитных полей – существенно изменять характер изменения подъёмной силы магнитных подвесов от скорости относительного вращения.

Также, эти программные комплексы, зачастую не дают информации о распределении скалярного магнитного потенциала или вектор-потенциала магнитного поля, требующихся для определённых схем расчёта сил и моментов магнитодинамического подвеса.

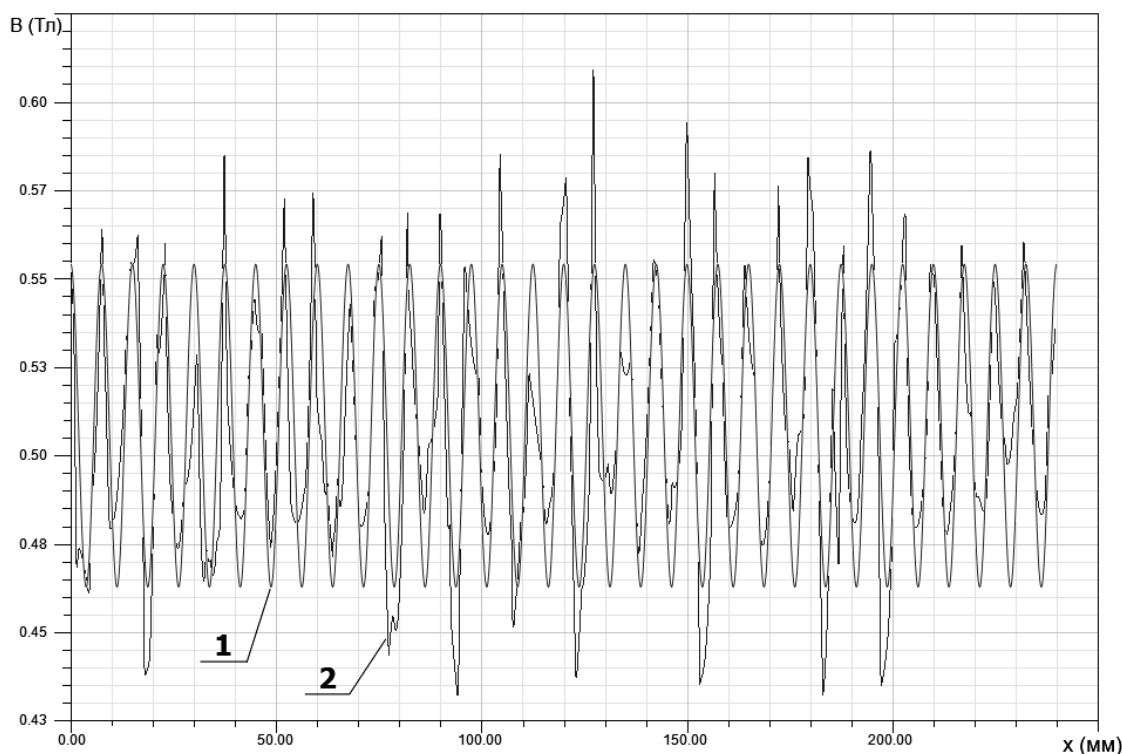


Рисунок 1 – Пример погрешностей определения модуля магнитного поля от периодической системы в виде массива Хальбаха, связанные с линейной интерполяцией результатов на излишне крупной автоматической расчетной сетке

Кроме того, известно довольно много методов и расчетных схем приближенного вычисления распределения магнитного поля периодических систем [5-7]. Без информации о реальном, не приближенном распределении магнитного поля зачастую трудно судить о правомочности того или иного приближения и возникающих при его применении погрешностях. Особенно сравнить результаты можно, используя примитивные фигуры.

Всё это поднимает вопрос о необходимости создания методики и программы определения точных распределений магнитного поля и потенциалов периодических магнитных структур, применяемых в системах магнитного подвеса.

В качестве таковой, была разработана программа для определения точных значений скалярного потенциала, векторного потенциала и компонент вектора магнитного поля линейных периодических магнитных структур с использованием методов поверхностных магнитных зарядов и токов.

С помощью данных методов можно описать внешнее поле и потенциалы объема ферромагнетика с постоянной величиной вектора намагниченности как поле зарядов, распределённых по его поверхности (метод магнитных зарядов), или поле токов, текущих по его поверхности (метод поверхностных токов).

Таким образом, применительно к рассматриваемой проблеме, определение магнитного поля системы сводится к определению суммарного поля от системы прямоугольных поверхностей.

Алгоритм вычисления полей и потенциалов включает в себя автоматическое разбиение синтезированной магнитной структуры на набор поверхностей, определение значений полей и потенциалов от отдельной произвольно ориентированной поверхности и суммирование вкладов таких поверхностей. Отдельную вычислительную проблему создаёт тот факт, что в системах с цилиндрической симметрией поля и потенциалы от большинства простых составляющих элементов (сектор круга, часть цилиндра, и т.п.) не могут быть вычислены аналитически. Поэтому, для определения вклада двумерных поверхностей используются аналитически вычисленные выражения для одномерных интегралов полей и потенциалов, а второй интеграл вычисляется численно. Взятие одномерных интегралов в аналитическом виде ускоряет вычисления и сильно упрощает проблему контроля точности численного интегрирования. В некоторых случаях, при возможности, использует аналитические выражения полей элемента двумерных элементов.

Анализ результатов вычислений показал, что программа может определять конфигурацию потенциалов и компонент магнитного поля с любой требуемой точностью за время сравнимое, хотя и несколько большее, времени вычисления сеточными методами, с существенно меньшими затратами оперативной памяти.

Также, были рассчитаны поля и потенциалы однородных систем постоянных магнитов линейной и цилиндрической формы. Эти данные использовались для верификации сторонних программных продуктов, предназначенных для вычисления полей постоянных магнитов.

В качестве примера, на рис. 2 - 3 представлены трехмерные графики магнитного поля системы типа широкого массива Хальбаха с периодом периодичности 4 и количеством элементов равным 17.

Отношение ширины элемента массива к длине и высоте составляет 6:1:1. Графики нормированы на значение поля $B_{int} = 1$ Тл.

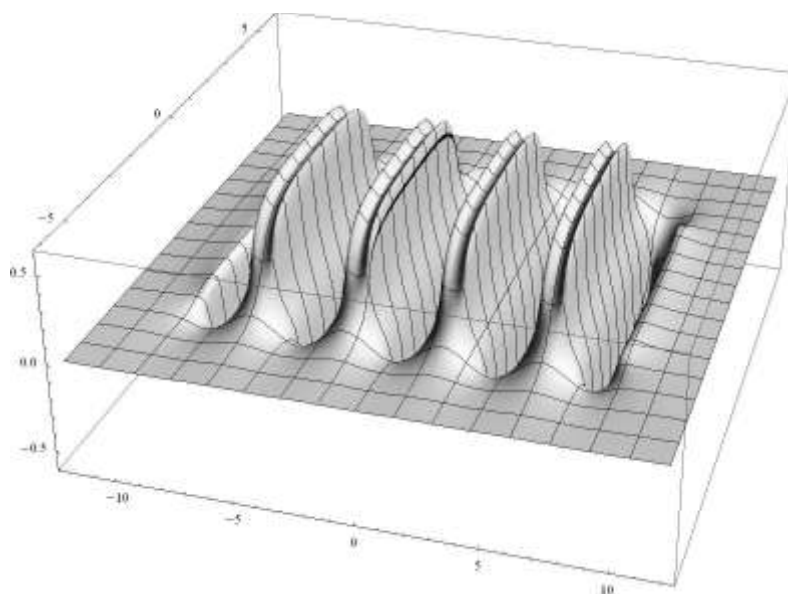


Рисунок 2 – Трехмерное распределение нормальной компоненты B_y магнитного поля линейной периодической структуры Хальбаха из 17 элементов на расстоянии 0.025 шага периодичности

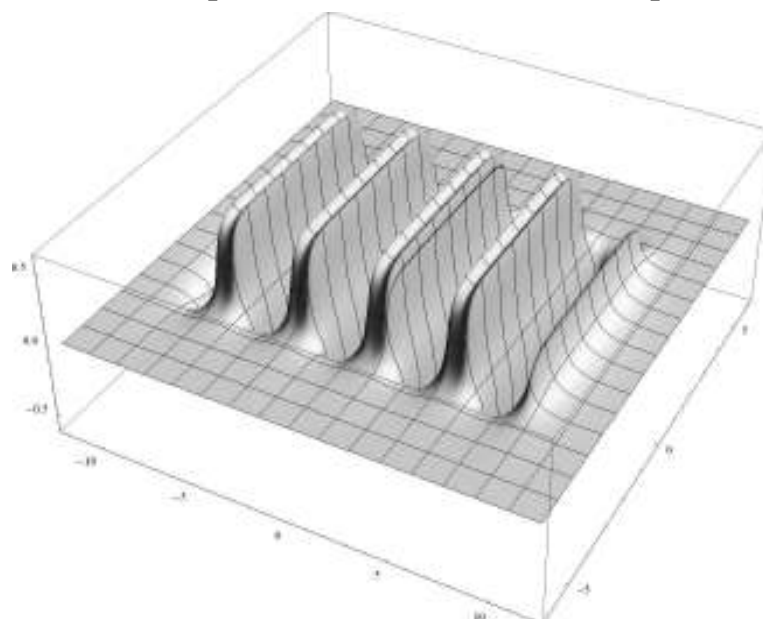


Рисунок 3 – Трехмерное распределение продольной компоненты B_x магнитного поля линейной периодической структуры Хальбаха из 17 элементов на расстоянии 0.025 шага периодичности

Некоторым недостатком разработанной программы является то, что подлежащая определению параметров магнитная система может включать в себя только широкий, но ограниченный набор биб-

лиотечных магнитных элементов. Однако, полученные расчетные схемы в целом позволяют определить поля и потенциалы от широкого класса периодических магнитных структур, включающих в себя большинство структур, используемых в системах магнитостатического и магнитодинамического подвеса.

Созданный расчетный комплекс позволил провести анализ большого числа периодических магнитных структур, представляющих интерес для систем магнитостатического и магнитодинамического подвеса, в том числе аксиально-симметричных и линейных периодических структур типа массива Хальбаха и знакопеременных магнитных массивов, а также позволяет определять конфигурацию потенциалов и компонент магнитного поля.

ЛИТЕРАТУРА

1. G. Wimmer, T. Steinmetz, M. Clemens, Reuse, Recycle, Reduce (3R) – strategies for the calculation of transient magnetic fields, *Applied Numerical Mathematics - J APPL NUMER MATH*, vol. 59, no. 3, pp. 830-844, 2009
2. Mark Oxborrow, Ex-house 2D finite-element simulation of the whispering-gallery modes of axisymmetric electromagnetic resonators, arXiv:quant-ph/0607156, 2007
3. A. Bonito, R.A. DeVore, [R.H. Nochetto](#), Adaptive Finite Element Methods for Elliptic Problems with Discontinuous Coefficients, arXiv:1301.3203
4. 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.
5. Development and Testing of an Axial Halbach Magnetic Bearing / National Aeronautics and Space Administration John H. Glenn Research Center at Lewis Field: Dennis J. Eichenberg, Christopher A. Gallo, and William K. Thompson – Cleveland, Ohio, July 2006. – p.30. – Report number E-15632.
6. F. Gluck, Axisymmetric magnetic field calculation with zonal harmonic expansion, *Progress In Electromagnetics Research B*, Vol. 32, 351-388, 2011.
7. G. Wimmer, M. Clemens, J. Lang, Calculation of Magnetic Fields with Finite Elements, Bergische Universität, 2007