

## РАСЧЕТ СТАТИЧЕСКИХ СИЛ СРЕДИ ПОСТОЯННЫХ. МАГНИТЫ В МАССИВЕ ХАЛЬБАХА

Губарь В.М., Прохорович С.С.

Белорусский национальный технический университет  
Минск, Республика Беларусь

В последние годы были разработаны плоские актуаторы на магнитной подвеске [1], [2] в качестве альтернативы приводам, состоящим из сложенных друг на друга линейных приводов для таких требовательных применений, как этапы изготовления пластин.

Плоские приводы с подвижным магнитом демонстрируют многообещающие характеристики, однако они еще не обеспечивают требуемой точности позиционирования. Для достижения более высокой точности позиционирования необходимо выполнить несколько шагов. Одним из таких шагов является моделирование гибких режимов транслятора, который состоит из алюминиевой пластины, на которой установлена матрица постоянных магнитов Хальбаха. С этой целью необходимо понимание силы взаимодействия между постоянными магнитами в массиве Хальбаха.

Показанная матрица Хальбаха состоит из 2X2 постоянных магнитов, намагниченных в -направлении, и показана на рис. 1. Постоянный неодим-железо-бор (NdFeB)

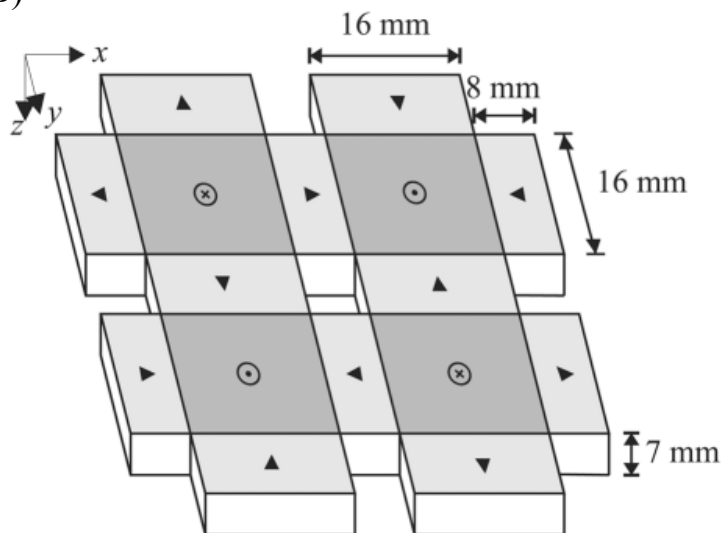


Рисунок 1. 2X2 матрица Хальбаха из постоянных магнитов.  
Направление каждого указано стрелками.

Механическая конструкция, на которой установлен массив постоянных магнитов, будет деформироваться из-за магнитных сил, которые постоянные магниты оказывают друг на друга. Эта деформация была рассчитана с помощью механического моделирования FEM[5], для которого было сделано несколько допущений и упрощений:

Во-первых, магнитная пластина, на которой установлена матрица Хальбаха, цельная и изготовлена из изотропного алюминия с модулем Юнга 60 ГПа, плотностью 2600 кг/м и толщиной 5 мм.

Во-вторых, рассматриваются только силы, действующие в  $z$ -направлении, поскольку эти силовые составляющие являются доминирующими при деформации, и предполагается, что эти силы действуют на поверхность магнитной пластины непосредственно над центром постоянного магнита.

В-третьих, из-за ненулевого расстояния между магнитами и низкой жесткости клея по сравнению с алюминием в общей жесткости магнитного узла преобладает алюминиевая пластина, а влиянием магнитов и клея пренебрегают.

В-четвертых, магнитная пластина закреплена в угловых точках и сила реакции на этих закрепленных границах равна нулю (проверено, что аналогичные результаты получены и для других граничных условий).

Схематический вид поперечного сечения алюминиевой пластины с магнитами представлен на рис. 2. Размеры элементов сетки в  $(x,y,z)$ -направлении  $2 \times 2 \times 1$  мм

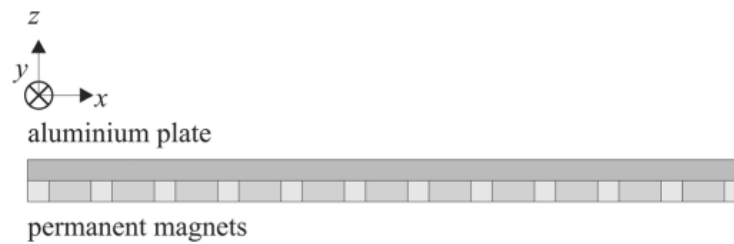


Рисунок 2. Сечение алюминиевой пластины с постоянными магнитами.

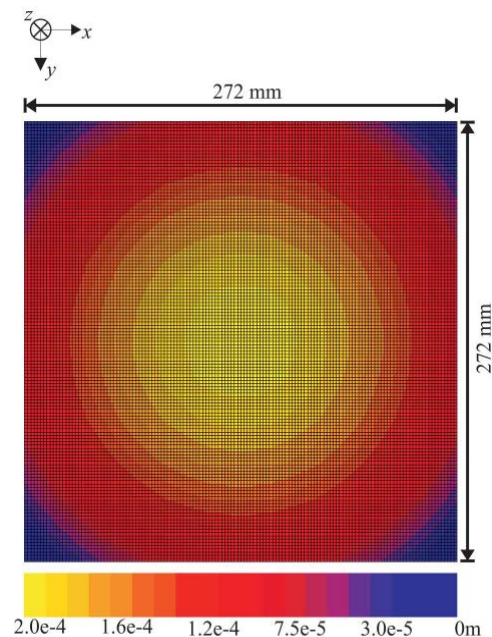


Рисунок 3. Деформация магнитной пластины. Легенда указывает на локальное смещение  $z$ -направление.

Результаты на рис. 3 показывают, что внешние края магнитной пластины имеют тенденцию изгибаться вниз примерно на 0,2 мм по отношению к центру магнитной пластины. Это важно, учитывая точность, требуемую приложениями, для которых разрабатываются эти типы плоских приводов. На практике отклонение в 0,1 мм в Воздушном зазоре приводит к изменению на 1,8% силы, создаваемой плоским приводом представленным в [1].

#### **Вывод:**

результаты используются для выполнения механического моделирования методом конечных элементов механической конструкции, на которой установлен массив Хальбаха, чтобы определить, до какой степени механическая конструкция деформируется магнитными силами, генерируемыми массивом Хальбаха. Результаты показывают, что конструкция существенно деформирована.

1. Дж. В. Янсен, К. М. ван Лироп, Е. А. Ломонова и А. Я. Ванденпут, «Безжелезный магнитно-левитирующий плоский привод», Дж. Прил. Физ., том. 103, нет. 7, 2008.
2. Ж. де Бой, Э. Ломонова и Ж. Дуарте, «Бесконтактный плоский привод с манипулятором: система движения без кабелей и физического контакта между двигателем и неподвижным миром», в Учеб. IEEE ИАС, 2008, стр. 1–8.
3. Г. Акун и Ж.-П. Йонне, «3D-аналитический расчет сил, действующих между двумя кубовидными магнитами», IEEE Trans, Магн., том. МАГ-20, нет. 5, стр. 1962–1964, октябрь 1984 г.
4. Дж. Янссен, Дж. Паулидес, Э. Ломонова, Ф. Белони, А. Тунци и Ф. Пириу, «Аналитический расчет силы взаимодействия между ортогонально намагниченными постоянными магнитами», в сб. Учеб. Конференция EMSA., 2008, стр. 88–.
5. Руководство пользователя Flux3D 10.2, 2008 г. Мейлан, Франция, Cedrat Group.