

Аналитические методы расчета магнитного поля постоянных магнитов**П. В. Платонов**¹*Институт Проблем Механики РАН им. А.Ю. Ишлинского*²*Московский физико-технический институт (государственный университет)*

Магнитные устройства используются в электротехнике, инженерии, медицине и во многих других областях. Эти устройства, такие как магнитные муфты, сепараторы, трансформаторы, генераторы переменного тока, используют постоянные магниты или катушки. Одним из таких устройств является пеннинговский источник ионов [1], работающий на принципах разряда Пеннинга. В типичной конфигурации этого источника анодное кольцо находится между двумя электродами. Осевое магнитное поле используется для ограничения электронов так, чтобы они осциллировали между катодами и внутри кольца. Различают три основных вида магнитов и катушек для большинства этих приборов: цилиндрические, кольцевые и магниты в форме параллелепипеда. Вычисление магнитных полей таких магнитов и катушек является одной из задач магнитостатики. В задачах магнитостатики рассматриваются системы дифференциальных уравнений в частных производных, либо интегральных уравнений. Уравнения магнитостатики являются следствием уравнений Максвелла [2] и имеют следующий общий вид (в дифференциальной форме):

$$\operatorname{rot} \vec{H} = \frac{4\pi}{c} \vec{j},$$

$$\operatorname{div} \vec{H} = 0.$$

Для практического расчета магнитного поля различных систем применяются различные подходы и методы: используется фундаментальный закон Био-Савара-Лапласа, рассматриваются уравнения магнитостатики для векторного потенциала и для скалярного потенциала [3], используется кулоновский подход и др.

В общем случае задача о нахождении магнитного поля постоянного магнита решается численно, но для систем, где магниты имеют простую форму (кольцо, цилиндр, параллелепипед), можно найти аналитическое решение данной задачи. Множество аналитических подходов в последние годы практикуется различными авторами для вычисления магнитных полей таких магнитов. В работах [4-5] представлен аналитический расчет магнитного поля, созданного постоянными магнитными кольцами, используя кулоновский подход. Для осевого кольцевого магнита дается вывод радиальных и осевых компонент. В работе [6] используется формула Кельвина для расчета силы, действующей на постоянный магнит в присутствии внешнего магнитного поля от второго постоянного магнита. В [7] представлены аналитические выражения магнитной индукции поля, созданного цилиндрическими постоянными магнитами. На основе работ [4-7] будет реализована программа, позволяющая рассчитывать магнитное поле кольцевого магнита. Результаты будут сравнены с результатами работ [4-7].

Литература

1. *Joshua L. Rovey, Brandon P. Ruzic, T. J. Houlahan . Simple Penning ion source for laboratory research and development applications*
2. *Хижняк Н.А.* Интегральные уравнения макроскопической электродинамики. Киев. Наук. Думка. 1986. 280с.
3. *Коген-Дален В.В., Комаров Е.В.* Расчет и испытание систем с постоянными магнитами. М.: Энергия. 1977. 248с.
4. *Babic S. I.* Improvement in the analytical calculation of the magnetic field produced by permanent magnet rings. Progress In Electromagnetics Research C, Vol. 5, 71–82, 2008
5. *Ravaud R. , Lemarquand G. , Lemarquand V., Depollier C.* Analytical Calculation of the Magnetic Field Created by Permanent-Magnet Rings. IEEE transactions on magnetic, VOL. 44, NO. 8, August 2008
6. *Janhavi S., Agashe, Arnold D. P.* A study of scaling and geometry effects on the forces between cuboidal and cylindrical magnets using analytical force solutions. 2008 *J. Phys. D: Appl. Phys.* **41** 10500
7. *Ravaud R., Lemarquand G., Babic S., Lemarquand V., Akyel C.* Cylindrical magnets and coils: fields, forces, and inductances. IEEE transactions on magnetic, Vol. 46, no. 9, September 2010.