

Методы расчета плоских магнитных катушек для систем ориентации малых космических аппаратов

А.А. Кумарин
Самарский национальный
исследовательский университет им.
академика С.П. Королева
Самара, Россия
alky_samara@mail.ru

А.Н. Соборницкая
Самарский национальный
исследовательский университет им.
академика С.П. Королева
Самара, Россия
altSobor@yandex.ru

И.А. Кудрявцев
Самарский национальный
исследовательский университет им.
академика С.П. Королева
Самара, Россия
rtf@ssau.ru

Аннотация—Для обеспечения ориентации малых космических аппаратов применяются компактные магнитные катушки на основе печатной платы. В данной работе предлагается методика расчета геометрии таких катушек исходя из доступного пространства на печатной плате, а также методика расчета параметров полученных катушек. Приведены примеры расчетов и показано, что использование сложной геометрии может давать существенную прибавку магнитного момента в сравнении с круглыми катушками на той же печатной плате.

Ключевые слова— плоские магнитные катушки, CubeSat, PocketCube, расчет магнитного момента, произвольная форма катушки.

1. ВВЕДЕНИЕ

Современные малые космические аппараты имеют тенденцию к миниатюризации. Это проявляется, например, в появлении стандарта CubeSat, а затем и PocketCube. Эти классы спутников сейчас решают задачи дистанционного зондирования Земли (ДЗЗ), которые раньше решались только более тяжелыми аппаратами. Для многих миссий требуется обеспечение ориентации спутника, например, для наведения камеры. При этом не всегда возможно применение маховиков в виду большой массы, габаритов и энергопотребления. Альтернативой является применение систем на основе магнитных катушек [1]. Однако, катушки с сердечниками также могут иметь относительно большие габариты, что затрудняет их применение.

Одним из вариантов катушек, обладающих повышенной компактностью и удобством размещения на аппаратах с плоскими гранями, является катушка в виде печатной платы [2]. Она изготавливается по тому же техпроцессу, что и обычные печатные платы бортовых систем, что упрощает производство спутника. Основной задачей становится проектирование такой катушки и расчет ее параметров.

Данная работа посвящена разработке методики расчета подобных плоских катушек для системы ориентации малых космических аппаратов ДЗЗ исходя из массогабаритных характеристик спутника и доступных габаритов печатной платы.

2. ОЦЕНКА ВЕЛИЧИНЫ ТРЕБУЕМОГО МОМЕНТА

Для того, чтобы реализовать поворот с помощью магнитной катушки необходимо, чтобы магнитный момент превышал сумму аэродинамического (M_a) и гравитационного момента (M_g) [3]:

$$M_g = -\frac{3k(I_x - I_z)}{2(R+h)^3} \sin(2\alpha),$$

$$M_a(\alpha) = -c_{xa} \left(|\cos \alpha| + \frac{b}{a} \frac{4}{\pi} |\sin \alpha| \right) a^3 \Delta x \rho \frac{v^2}{2} \sin \alpha$$

Формулы приведены для аппарата с соотношением сторон 1:1:2, например, CubeSat-2U, PocketCube-2P.

Необходимый дипольный момент катушки с учетом запаса в 20 раз:

$$M_{mag} = \frac{20 \cdot M_{сум}}{B_{min}}$$

Для случая PocketCube-2P массой 0,5 кг на орбите 400 км момент составляет порядка 4 мАм².

3. ГЕНЕРАЦИЯ ГЕОМЕТРИИ КАТУШКИ

Для работы с геометрией в работе взята полярная система координат. Сетка координат по углу имеет постоянный шаг $\Delta\phi$. Индексация идет по двум индексам – по углам и по номеру оборота. Первым оборотом сохраняется информация о границе области, в которой будет располагаться печатная катушка.

Процесс генерации производится по точкам начиная со стартового угла. Основа генерации геометрии катушки – соблюдение заданного отступа d_{clr} от уже имеющейся геометрии. Поскольку форма катушки может быть в общем случае любая, в крайнем случае для каждой точки требуется анализ расстояния до всех точек предыдущего оборота и части точек предшествующего ему. Однако в большинстве случаев достаточно анализа небольшой окрестности предыдущего оборота с тем же углом, что и в текущей точке.

Для нахождения радиус-вектора текущей точки сначала составляется список точек для проверки. Затем находятся радиусы векторов, при которых расстояние до исследуемой точки равно заданному d_{clr} . Такие радиус-векторы при их существовании находятся из теоремы косинусов.

$$x^2 - 2r_i x \cos(|\phi_i - \phi|) + r_i^2 - r_{clr}^2 = 0$$

Среди найденных положительных решений берется минимальное.

4. ВЫЧИСЛЕНИЕ МАГНИТНОГО МОМЕНТА

Вычисление магнитного момента на основе площадей витков не представляется возможным, поскольку форма

витка может быть произвольной. Поэтому, расчет ведется на основании общей формулы, которая упрощается за счет того, что ток в любой части витка одинаков:

$$m = \frac{1}{2} \int_V [\mathbf{r}, \mathbf{j}] dV = \frac{I}{2} \int_{\varphi} r^2 \sin \alpha d\varphi$$

где α – угол между радиус-вектором точки и направлением тока в данной точке.

Синус угла возможно аппроксимировать различными способами. В данной работе он находился из геометрии для вектора посередине между текущим и предыдущим:

$$AO = 0.5(r_i + r_{i-1}) \cos \frac{\Delta\varphi}{2}$$

$$AC = AO \tan \frac{\Delta\varphi}{2}$$

$$AB^2 = r_i^2 + AO^2 - 2r_i AO \cos \frac{\varphi}{2}$$

$$\sin \alpha = \frac{AC^2 + AB^2 - \left(\frac{r_i - r_{i-1}}{2}\right)^3}{2AC \cdot AB}$$

При достаточно малых шагах по углу данные формулы возможно упростить.

5. РЕЗУЛЬТАТ

Пример катушки для параметров $r_{\text{сф}}=1$ мм, размера катушки 45x45мм (плата для спутника формата PocketCube), количества витков 10, $\Delta\varphi=\pi/1000$, начало в $\varphi=0$, представлен на рисунке 1.

Видно, что происходит попытка повторения заданного контура, который в данном случае был квадратом. В окрестности нулевого угла виден переходный участок с витка на виток.

Аналогично получены результаты для контура в виде окружности. Они представлены на рисунке 2.

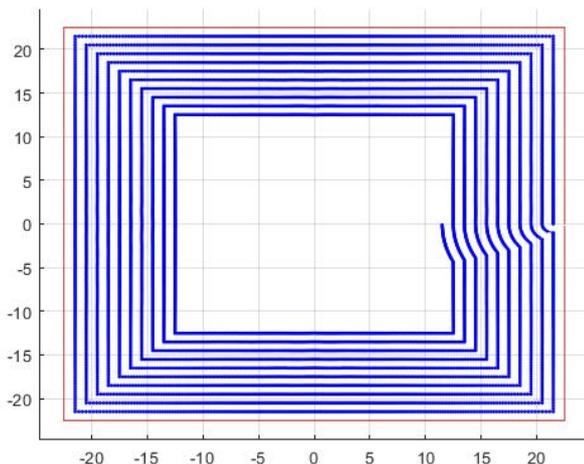


Рис. 1. Пример квадратной катушки

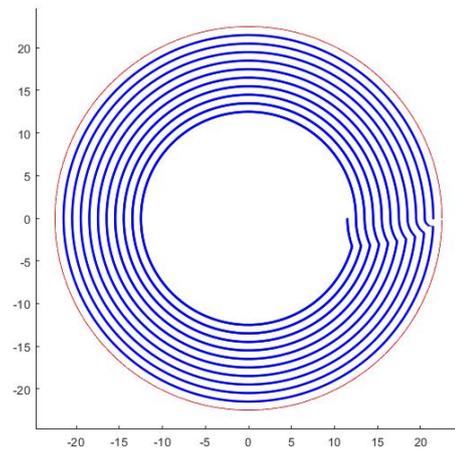


Рис. 2. Пример круглой катушки

Картина аналогична случаю с квадратным контуром.

Значения моментов для тока 1 А составили 10,4 и 9,3 мАм² соответственно.

6. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В работе разработан алгоритм расчета магнитных катушек для систем ориентации малых космических аппаратов ДЗЗ. Представлены формулы и уравнения для произведения расчета. Форма катушки определяется формой задаваемого ограничивающего контура. На практике этот контур определяется границами печатной платы и ее крепежными отверстиями.

Полученная методика позволяет проводить расчет для катушек произвольной формы. На приведенных примерах видно, что выигрыш может составлять более 10 % от стандартной круглой катушки. В частности, для квадрата выигрыш составляет около 12%.

Результаты работы могут быть применены при расчете магнитных катушек для перспективных аппаратов формата CubeSat и PocketCube, поскольку на них предъявляются повышенные требования к компактности бортовых систем и применение катушек на сердечниках не всегда возможно.

Исходный код программы расчета является открытым и опубликован в репозитории [4].

ЛИТЕРАТУРА

- [1] Leonov, A.I. Providing Nanosatellite Triaxial Gravitational Orientation Using Magnetic Actuators / A.I. Leonov, P.N. Nikolaev // IOP Conference Series Material Science Engineering. – 2022. – Vol. 1215. – P. 1-9.
- [2] Shakhmatov, E. SSAU Project of the Nanosatellite SamSat-QB50 for Monitoring the Earth's Thermosphere Parameters / E. Shakhmatov, I. Timbai, I. Belokonov, E. Ustiugov // Procedia Engineering. – 2015. – Vol. 104. – P. 139-146.
- [3] Белоконов? И.В. Движение наноспутника относительно центра масс на околоземных орбитах / И.В. Белоконов, И.А. Тимбай // Изд. Самарского университета. – 2020. – 126 с.
- [4] Исходный код программы [Электронный ресурс]. – Режим доступа: https://github.com/alkysamarapublic/planar_magnetic_actuator/ (08.02.2022).