

Физические установки и аппаратура

УДК 629.7.051.062.2

Оптимизация параметров электромагнитного устройства

М. П. Шальнов, В. А. Шувалов, А. А. Яковлев

Центральный научно-исследовательский институт машиностроения, г. Королев, Россия

Выполнены исследования параметров цилиндрического электромагнита и показано, что при заданном магнитном моменте выбор его конструкции в виде связки стержней-электромагнитов с параллельными осями снижает массу катушки и электропотребление устройства более чем на 20 %. Экспериментально определена степень взаимного влияния магнитных полей стержней электромагнитов друг на друга. Показано, что наибольшее влияние наблюдается в условиях максимального сближения стержней (при параллельных осях стержней-электромагнитов), при этом суммарный магнитный момент сборной конструкции снижается не более чем на 6 % по сравнению с алгебраической суммой магнитных моментов всех составляющих элементов конструкции электромагнита.

Оптимизация проектных параметров любого электромагнитного устройства направлена, как правило, на снижение массы, габаритных размеров, электропотребления и т. д. при сохранении заданной характеристики системы — магнитного момента. Для крупных устройств оптимизация приводит к экономии энергии, металла и других показателей. Это особенно важно для электромагнитов, применяемых на космических аппаратах (КА), где высокая стоимость доставки груза на орбиту заставляет разработчиков использовать любую возможность снижения массы выводимого устройства.

Одна из актуальных задач функционирования крупногабаритных космических объектов — компенсация (или сброс) накопленного кинетического момента [1]. Она решается различными способами (реактивными двигателями, «гравитационной разгрузкой» и т. д.), в том числе и с помощью магнитных систем. Конструктивно магнитный исполнительный орган системы разгрузки выполняется обычно в классической форме цилиндрического электромагнита (соленоид с ферромагнитным сердечником).

В процессе проектирования, исходя из заданного магнитного момента, оптимизируют электротехнические характеристики катушки (плотность тока, количество слоев обмотки, состав компаунда и др.), оставляя сердечник монолитом. Однако заданную величину магнитного момента можно получить путем объединения длинных элементарных стержней-электромагнитов в единую наборную цилиндрическую конструкцию. Здесь каждый элементарный электромагнит будет представлять автономную конструкцию с оптимальными характеристиками.

Причем второй вариант приводит к заметному снижению массы и суммарного энергопотребления устройства и может быть рекомендован в качестве магнитного исполнительного органа системы управления КА. Для чего выполним расчет параметров электромагнитов, опираясь на методику, изложенную в работе [2].

Основными параметрами электромагнита можно считать массу устройства, его габаритные размеры и энергопотребление. Причем, полная масса складывается из массы сердечника, изготовленного из магнитомягкого ферромагнетика, и массы медной (подмагничивающей) катушки. Очевидно, что с точки зрения минимизации массы сердечника ферромагнетик должен находиться в состоянии максимальной намагниченности, т. е. масса сердечника будет определяться заданным магнитным моментом M . Промышленность в настоящее время изготавливает магнитомягкие материалы с величиной намагниченности насыщения $I_S = 1,9 \cdot 10^6$ А/м, что соответствует $B = 2,4$ Тл. Опыт показывает, что наиболее распространенной формой электромагнита является цилиндр. При этом для системы разгрузки кинетического момента объекта типа «Мир» магнитный момент должен соответствовать величине порядка $M = 2 \cdot 10^4$ А·м² [1]. В расчетах будем исходить из указанных данных, а также из более низкого значения максимальной намагниченности насыщения $I_S = 1,7 \cdot 10^6$ А/м, которая достигается при напряженности намагничивающего поля $H_0 = 10^6$ А/м [3]. Это состояние ферромагнетика соответствует изгибу кривой намагниченности пермалоя.

В цилиндрическом сердечнике максимальная намагниченность I_M наблюдается в центре цилиндра, на его оси. Однако средняя по сечению намагниченность I_C будет меньше. Согласно экспериментальным исследованиям [4, 5], ее можно определить из соотношения

$$I_C = 0,79 I_M.$$

Вычислив среднюю намагниченность сердечника, можно определить его объем V и массу m из соотношений:

$$M = I_C V; m = \gamma_{\phi} V,$$

где $\gamma_{\phi} = 8 \cdot 10^3$ кг/м³ — плотность ферромагнетика.

Тогда, учитывая исходные данные

$M = 2 \cdot 10^4$ А·м², $I_M = 1,7 \cdot 10^6$ А/м, получим среднюю намагниченность $I_C = 1,34 \cdot 10^6$ А/м, объем сердечника $V = 1,5 \cdot 10^{-2}$ м³ и его массу $m = 120$ кг.

Пусть длина электромагнита l , тогда диаметр цилиндрического сердечника будет

$$d_c = (4V/\pi l)^{1/2}.$$

Если положить $l = 2$ м, то $d_c = 9,8 \cdot 10^{-2}$ м.

Таким образом, при заданном магнитном моменте, выбранном материале и его рабочей точке габаритные и массовые характеристики сердечника определяются однозначно.

Дальнейшая оптимизация параметров электромагнита может быть сведена к оптимизации массы и энергопотребления подмагничивающей катушки. Выполним расчет ее параметров. Требуемое подмагничивающее поле H_k катушки определяется выражением

$$H_k = H_0 + I_M N_0, \quad (1)$$

где H_0 — поле внутри катушки;

N_0 — размагничивающий фактор, который для цилиндра определяется эмпирическим соотношением [2] в зависимости от удлинения сердечника

$$N_0 = 0,93(l/d_c)^{-1,7}. \quad (2)$$

В нашей задаче с учетом исходных параметров $N_0 = 5,52 \cdot 10^{-3}$ и, следовательно, $H_k = 10^4$ А/м. Внешний диаметр катушки, намотанной на сердечник, будет равен

$$d_k = d_c + 2H_k/K_3j, \quad (3)$$

где K_3 — коэффициент заполнения катушки;

j — допустимая плотность тока в ней.

Расчетную оценку параметров катушки выполним для $j = 2 \cdot 10^6$ А/м², $K_3 = 0,5$. Оба параметра выбраны далеко некритичными, так как плотность тока может быть увеличена до $j = 3 \cdot 10^6$ А/м² и коэффициент заполнения — до 0,8.

Таким образом, внешний диаметр катушки будет равен $d_k = 11,8 \cdot 10^{-2}$ м, т. е. на сердечник необходимо намотать с учетом компаунда 2 см медного провода.

Потребляемая электрическая мощность W такой катушки определяется соотношением

$$W = \frac{\pi}{4} l \rho_M j^2 K_3 (d_k^2 - d_c^2), \quad (4)$$

где $\rho_M = 1,8 \cdot 10^{-8}$ Ом·м — удельная электропроводность меди, а ее масса, с учетом того, что плотность компаунда близка к плотности меди,

$$m_k = \frac{\pi}{4} l \gamma_M (d_k^2 - d_c^2), \quad (5)$$

где $\gamma_M = 9 \cdot 10^3$ кг/м³ — плотность меди.

Подставляя в эти выражения вычисленные и заданные параметры, получим

$$W = 244 \text{ Вт}; m_k = 60 \text{ кг}.$$

Анализируя соотношения (3)—(5), можно сделать вывод, что снижение электропотребления и массы подмагничивающей катушки связано с уменьшением внешнего диаметра и величины подмагничивающего поля H_k . Чтобы реализовать это в конструкции, необходимо разбить монолитный сердечник на отдельные цилиндры, каждый из которых будет снабжен собственной подмагничивающей катушкой. Причем, заданный объем сердечника и его длина остаются неизменными.

Таким образом, конструкция электромагнита с заданным магнитным моментом будет представлять собой связку длинных тонких цилиндрических стержней-электромагнитов с параллельно уложенными осями. Тогда, выбирая величину H_k , можно определить количество стержней в данном объеме. Решая (1) и (2) относительно диаметра стержня, получим

$$d_{1c} = l \left(\frac{H_k - H_0}{0,93J_{jb}} \right)^{\frac{1}{1,7}}.$$

Отсюда при $l = 2$ м и положив $H_k = 2H_0$, находим диаметр стержня $d_{1c} = 2,63 \cdot 10^{-2}$ м и его объем $V_{1c} = 1,09 \cdot 10^{-3}$ м³. Учитывая заданный магнитный момент электромагнита $M = 2 \cdot 10^4$ А·м² и вычисленный объем его сердечника $V = 1,5 \cdot 10^{-2}$ м³, получим, что потребуется 14 стержней (отдельных электромагнитов). Из выражений (3)—(5) получаем электропотребление и массу каждой

катушки элементарного электромагнита: $W_1 = 12,8$ Вт; $M_{1к} = 3,2$ кг. Суммарное электропотребление и масса медных катушек всего устройства будут равны, соответственно

$$W_2 = 180 \text{ Вт}; m_2 = 45 \text{ кг}.$$

Таким образом, разбиение монолитного сердечника на 14 отдельных стержней и снабжение каждого стержня катушкой позволило снизить энергопотребление всего электромагнита и суммарную массу подмагничивающей катушки на 25 %. В предлагаемой методике построения электромагнита необходимо оценить взаимное влияние отдельных элементов, которое может привести к снижению суммарного магнитного момента всей установки.

В работе [5] выполнены теоретические исследования взаимного влияния двух протяженных ферромагнитных стержней в однородном магнитном поле. Показано, что на расстоянии, равном диаметру, суммарный магнитный момент снижается на 10 %. Однако в нашей задаче необходимо оценить взаимное влияние стержней с подмагничивающими катушками. Для оценки степени снижения суммарного магнитного момента были проведены экспериментальные исследования взаимного влияния на двух протяженных электромагнитах в зависимости от расстояния между ними.

Сердечники экспериментальных моделей были выполнены из конструкционной стали диаметром 10 мм и длиной 1120 мм. На них были намотаны подмагничивающие катушки по 836 витков из медного провода диаметром 1 мм. Предварительно вычислили параметры электромагнитов по рассмотренной выше методике. Для конструкционной стали намагниченность насыщения $B_S = 1,75$ Тл, удлинение стержня $\rho = 112$. Таким образом, намагниченности в центре сердечника и средняя, соответственно, равны $J_{ц} = 1,28 \cdot 10^6$ А/м; $J_c = 1,01 \cdot 10^6$ А/м. Объем стального стержня равен $V_{1с} = 87,92$ м³. Тогда ожидаемый магнитный момент такого электромагнита в состоянии насыщения материала будет 88,8 А·м, а поле H_k подмагничивающей катушки определится из выражения (1), где H_0 для конструкционной стали примерно 2700 А/м.

Коэффициент размагничивания для цилиндра с удлинением $\rho = 112$ будет $N_{ц} = 3,71 \cdot 10^{-3}$. Тогда требуемая величина подмагничивающего поля определится из соотношения (1), $H_{к, \text{треб}} = 7461$ А/м. Напряженность магнитного поля подмагничивающей катушки можно определить из выражения

$$H_k = I n / l,$$

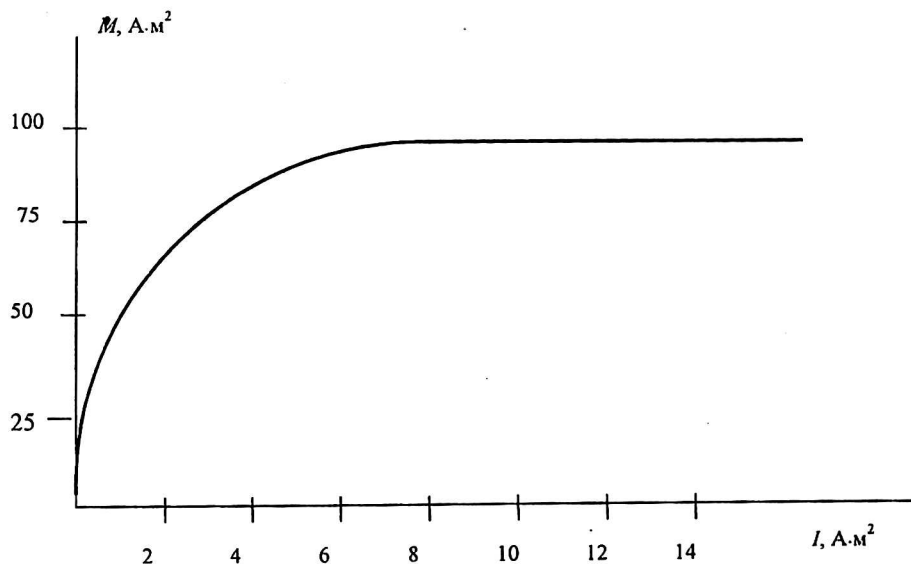
где I — ток в катушке;

n — число витков;

l — длина катушки.

Поскольку число витков, длина и требуемое подмагничивающее поле известны, из приведенного выражения можно определить, что ток $I = 5$ А создает напряженность в катушке, при которой сердечник будет находиться в насыщении.

На рисунке представлена экспериментальная кривая зависимости величины магнитного момента рассматриваемой конструкции электромагнита от подмагничивающего тока. Видно, что насыщение материала наступает примерно при токе 5 А, что полностью согласуется с расчетной оценкой. При этом величина магнитного момента также соответствует расчетам, что подтверждает обоснованность методики. Для экспериментов использованы два таких электромагнита.



Экспериментальная зависимость магнитного момента от подмагничивающего тока

Результаты физического моделирования показали, что взаимное влияние двух стержней-электромагнитов, практически на предельной их близости, не превосходит 6 %. Если расстояние между стержнями в многостержневом электромагните будет порядка двух диаметров, то можно утверждать, что реальное снижение величины магнитного момента такой конструкции составит 4 % по сравнению с алгебраической суммой магнитных моментов от каждого элементарного электромагнита.

Таким образом, предлагаемая методика оптимизации конструкции электромагнита заключается в том, что он выполняется в виде связки автономных стержней-электромагнитов с параллельными осями, причем удлинение электромагнита целесообразно выбирать максимально возможное в условиях конкретной задачи. Такая концепция построения позволяет более чем на 20 % уменьшить массу и энергопотребление подмагничивающей катушки по отношению к цельному классическому электромагниту.

Однако несмотря на то, что полная масса расщепленного электромагнита (с учетом массы сердечника) понизится только на 8–10 %, уменьшение мощности энергопотребления на 20 % имеет важное значение для объектов космической техники.

Литература

1. Григорьев Ю. И., Ханов Г. Г., Кошелев В. А., Никонов А. А., Медников Б. А. и др. Способ и устройство магнитной разгрузки ИИО КА: Пат. 2070148 С1, Россия, 1995.
2. Коваленко А. П. Магнитные системы управления космическими летательными аппаратами. — М.: Машиностроение, 1975.
3. Мишин Д. Д. Магнитные материалы. — М.: Высш. шк., 1991.
4. Сливинская А. Г. Электромагниты и постоянные магниты. — М.: Энергия, 1972.
5. Ушаков И. А. Намагничивание тел конечной длины. — Рязань: Рязанский политехнический ин-т, 1978.

Optimisation of the electromagnetic device parameters

M. P. Shalnov, V. A. Shuvalov, A. A. Yakovlev

Central scientific and research institute of machine building,
Korolev, Russia

The research of a cylinder shaped electric magnet parameters was carried out and it was shown that at the present magnetic moment the design of an electric magnet as a bunch of core-electromagnets with parallel axis allows to reduce the weight of the coil and to reduce the power consumption of the device by 20 percent. The level of mutual influence of the magnetic fields of the cores of electromagnets was determined during experiments. It is shown that the greatest influence is observed when there is the minimum distance between the cores (provided that their axis are parallel). In this case the total magnetic moment of the composite construction was reduced by 6 percent at most as compared to the algebraic sum of the magnetic moments of all components of the electric magnet.