КОНСТРУКЦИИ, РАСЧЕТ И ИССЛЕДОВАНИЕ МНОГОФУНКЦИОНАЛЬНЫХ МАГНИТНЫХ СИСТЕМ МИНИАТЮРНЫХ КОММУТАТОРОВ

В.Н. Шоффа, д.т.н.*, В.Н. Чичерюкин, к.т.н.** * 111250, Россия, г. Москва, ул. Красноказарменная, 14 Московский энергетический институт (Технический университет) ** 115280, Россия, г. Москва, ул. Автозаводская, 16 Московский государственный индустриальный университет

Рассмотрены конструкции магнитных систем миниатюрных и микроминиатюрных коммутаторов, в которых магнитная система обеспечивает управление маленьким шариком из магнитомягкого материала, выполняющим функции якоря и переключающей контакт-детали. Магнитная система также обеспечивает самовозврат или фиксацию органа управления. Предложена методика расчета магнитного поля и силовых взаимодействий в рассматриваемых магнитных системах. Проведено сравнение результатов расчета и эксперимента.

Designs of magnetic systems of the miniature and microminiature switches in which the magnetic system provides control by means of a small ball made of soft magnetic material, that acts as a an anchor and switches contacts, are studied. The magnetic system also provides self-reset or fixation of the control elements. Methods for calculation of the magnetic field and force interactions in the magnetic systems being investigated have been proposed. Results of the calculation and experiment are compared.

1. Введение

разработка Технологические лостижения последнего времени И новых электротехнических материалов позволяют конструировать электромеханические устройства с высокой степенью миниатюризации и интеграции. К числу таких электромеханических устройств относятся миниатюрные и микроминиатюрные коммутаторы (как сухие, так и жидкосмоченные). В качестве коммутационных элементов в таких коммутаторах могут служить сверхминиатюрные герконы с длиной стеклянного герметизирующего баллона 5-7 мм, изготавливаемые по традиционной технологии [1, 2], а также переключатели на основе микромеханических систем (так называемые MEMS-коммутаторы), объем магнитной системы в которых составляет всего 2-3 мм³ [3, 4, 5]. К последним можно отнести и герконы, изготавливаемые по микромашинной технологии и имеющие размеры 2x1,4x0,75 мм [6]. Фирмой Magnasphere разработаны миниатюрные герметизированные коммутационные элементы в металлическом корпусе с якорем, играющим роль контакт-детали, в виде ферромагнитного шарика диаметром 2-3 мм [7].

В указанных устройствах управление осуществляется либо с помощью обмоток, в том числе планарного исполнения [3], либо перемещающимися постоянными магнитами [6, 7]. В последнем случае для повышения чувствительности устройств и уменьшения их размеров требуется сокращение разности хода управляющего элемента (УЭ), что в основном решается за счет увеличения градиента магнитного поля в направлении перемещения УЭ [1]. Большие градиенты поля, в частности, имеют место вблизи его особых точек, в которых напряженность поля равна нулю [1, 8].

Ниже рассмотрены некоторые магнитные системы, реализующие такое управление миниатюрным коммутационным элементом, в котором якорем и переключающей контактдеталью является маленький шар из магнитомягкого материала. Шар может быть смочен ртутью для улучшения условий контактирования при малых силах контактного нажатия.

2. Магнитные системы

Для анализа поставленной задачи будем рассматривать рабочее тело в виде такого, заранее не намагниченного шара. Если шар имеет малые размеры в сравнении с источником магнитного поля (электромагнит или постоянный магнит), высокую относительную магнитную проницаемость и намагничен однородно внешним полем, то для расчета электромагнитной силы P_z, действующей на него со стороны внешнего поля в направлении оси z, можно воспользоваться выражением [9]

$$P_{z} = \frac{4\pi}{\mu_{0}} R_{III}^{3} \cdot B \cdot \frac{\partial B}{\partial z}, \qquad (1)$$

где μ_0 – магнитная постоянная, R_{III} – радиус шара, B – модуль вектора магнитной индукции \overline{B} в рассматриваемой точке при отсутствии в ней шара.

Из выражения (1) видно, что электромагнитная сила, действующая на шар, направлена в сторону увеличения модуля индукции и равна нулю в точках, где индукция равна нулю или достигает экстремума. Причем в тех точках, где достигается максимум, имеет место устойчивое равновесие шара вдоль оси z, а в точках, где достигается минимум, в том числе нулевой (особая точка), имеет место неустойчивое равновесие шара вдоль этой оси.

Для достижения большей электромагнитной силы P_z необходимо увеличивать модуль или градиент магнитной индукции. Увеличение индукции ограничено насыщением магнитопроводов электромагнитов или магнитной энергией постоянных магнитов. Высокий же градиент может быть достигнут за счет рациональной конструкции магнитной системы.

Такая система должна иметь распределение модуля магнитной индукции вдоль траектории перемещения шара с чередующимися максимумами и минимумами. Она может быть выполнена, например, в виде кольцевого постоянного магнита, намагниченного аксиально (рис. 1) [10].

На рисунке показана кривая B_z , поскольку в осесимметричной системе эта составляющая вдоль оси z равна вектору \overline{B} . Установив магнит 1 так, чтобы шариковый магнитоуправляемый контакт (МК) 2 располагался на оси z, а центр шара 3 – между особой точкой A и одним из максимальных значений модуля магнитной индукции (точки 0 и Б), например, в точке Γ , получим электромагнитную силу, направленную в точку Б. При этом шар сместится вправо и замкнет соответствующую пару контактов 4. Переместив магнит 1 так, чтобы особая точка A сместилась вправо от центра шара, получим электромагнитную силу, направленную в точку O. В этом случае шар скачком сместится влево и замкнет другую пару контактов.

Применение двух кольцевых постоянных магнитов 1 и 5, намагниченных аксиально и установленных соосно и встречно (рис. 2) [11], позволяет увеличить градиент индукции в области шара 3 и дает возможность создать командоаппарат (например, кнопку) без механической возвратной пружины – возвращающая сила создается за счет отталкивания магнитов.





Рис. 1. Управление магнитоуправляемым контактом с помощью одного кольцевого аксиально намагниченного постоянного магнита

Рис. 2. Управление магнитоуправляемым контактом с помощью двух соосно и встречно установленных кольцевых аксиально намагниченных постоянных магнитов

Необходимое распределение модуля магнитной индукции можно получить также с помощью призматических постоянных магнитов. В системе из двух таких магнитов (1 и 5), установленных как показано на рис. 3 [12], распределение модуля магнитной индукции с чередующимися максимумами и минимумами имеет место вдоль оси х. Смещение особой точки из положения А в положение А' осуществляется перемещением постоянного магнита 1 в направлении оси х (показано пунктиром). Под действием электромагнитной силы, направленной в точку Б' с максимальным значением модуля магнитной индукции, шар 3 перемещается влево. При работе такого командоаппарата характер взаимодействия постоянных магнитов 1 и 5 обеспечивает не только скачкообразное перемещение шарика 3, но также скачкообразное перемещение подвижного магнита 1 и его фиксацию в крайних положениях.

На рис. 4 показана магнитная система, в которой за счет оригинальной композиции постоянных магнитов получен высокий градиент индукции в области шара, что повышает электромагнитную силу [13]. Четыре постоянных магнита 1, 2, 6 и 7 установлены по паре с противоположных сторон МК 3 относительно его продольной оси х, причем постоянные магниты в каждой из указанных пар (пара 1 и 2, пара 6 и 7) установлены разноименными полюсами друг навстречу другу, и пары магнитов также установлены разноименными полюсами друг навстречу другу. Пара магнитов 6 и 7 неподвижная, а пара магнитов 1 и 2 имеет возможность перемещения вдоль оси х в обе стороны от поперечной оси z.

В исходном положении обе пары магнитов расположены симметрично относительно оси z. В точке 0 имеет место минимальное (нулевое) значение модуля магнитной индукции (особая точка). Шар 4, не удерживаясь в этой точке неустойчивого равновесия, стремится в одно из крайних положений, например, вправо, в точку Б с максимальной индукцией, замыкая при этом контакты 5.



Рис. 3. Управление магнитоуправляемым контактом с помощью двух призматических постоянных магнитов

Рис. 4. Управление магнитоуправляемым контактом с помощью четырех призматических постоянных магнитов

Если подвижную пару магнитов 1-2 переместить вправо (на рис. 4 показано пунктиром), особая точка (точка 0') оказывается правее центра тяжести шара 4 (точка Г). Электромагнитная сила будет направлена в точку Б' с максимальной индукцией. Шар 4 переместится влево, переключив при этом контакты.

После отпускания подвижной пары магнитов 1-2 она вернется в симметричное положение (многофункциональный привод с двустабильным режимом, поскольку шарик не имеет самовозврата). Однако следует иметь в виду, что перемещение пары магнитов 1 и 2 должно быть меньше размера одного магнита вдоль оси х, иначе самовозврата подвижных магнитов в исходное положение не произойдет.

На рис. 5 показан многоконтактный переключатель [11]. Он состоит из двух подвижных вдоль оси z кольцевых постоянных магнитов 1 и 5 и нескольких неподвижных МК 2, расположенных между указанными магнитами по окружности (см. вид А–А). В этом случае чередование максимумов и минимумов в распределении модуля магнитной индукции имеет место вдоль оси x. Причем ось x – это любая радиальная ось, проходящая через середину зазора между магнитами 1 и 5. Поэтому особые точки A и A', показанные на графике, являются следами от пересечения двух окружностей (даны штрих-пунктиром) плоскостью, перпендикулярной плоскости чертежа. Таким образом, указанные окружности являются геометрическими местами особых точек.

В исходном положении магнитов окружность, соответствующая особой точке A, смещена к оси z от шариков 3, а электромагнитная сила – в противоположную сторону (в сторону максимума модуля магнитной индукции). При сближении магнитов (показано пунктиром) особая точка и окружность, соответствующая ей, перемещаются в положение A' и оказываются с другой стороны от центра шариков. Электромагнитная сила также меняет свое направление, перемещая при этом шарики.



Рис. 5. Управление многоконтактным переключателем с помощью двух соосно и встречно установленных кольцевых аксиально намагниченных постоянных магнитов

С использованием рассмотренного принципа управления шариковым МК можно реализовать также электромагнитное реле [14]. Источником магнитодвижущей силы в этом случае являются обмотки с током, которые могут быть плоскими или объемными. Перемещение особых точек поля в пространстве можно осуществлять, изменяя соотношение токов в обмотках.

Например, на рис. 6 показана конструкция реле, состоящего из двух плоских обмоток 1 и 2, ферромагнитного сердечника 3 (может отсутствовать) и МК 4 с ферромагнитным шариком 5. На графике сплошной кривой показано распределение индукции B_Z вдоль оси z при равенстве МДС в обмотках 1 и 2. В этом случае на шар 5 действует электромагнитная сила в сторону точки 0. Если МДС в обмотке 1 увеличить, а МДС в обмотке 2 оставить неизменной, то кривая распределения изменится, как показано пунктирной линией. При этом особая точка переместится в положение A', а шарик скачком перейдет в крайнее правое положение.

3. Расчет магнитных систем

Для расчета магнитного поля постоянных магнитов используется метод эквивалентного соленоида, основанный на замене поверхностных молекулярных токов намагниченности постоянных магнитов током соленоида, создающего эквивалентное магнитное поле [15]. Далее магнитное поле рассчитывают по законам электродинамики.

Известно [15], что при намагничивании вдоль оси симметрии магниты в виде призм, цилиндров или колец заменяются на тонкие соленоиды с размерами соответственно призмы, цилиндра или на два тонких встречно соединенных соленоида с размерами внешней и внутренней цилиндрической поверхности кольца. Соотношение между МДС F эквивалентного соленоида и намагниченностью M_i равномерно намагниченного магнита определяется как F=M_i 2c, где 2c – размер магнита в направлении намагниченности.





Рис. 6. Управление магнитоуправляемым контактом с помощью двух обмоток с током

 $(-F_1=F_2)(--F_1=1,4F_2)$

Рис. 7. Эквивалентный соленоид призматического постоянного магнита

Для расчета индукции, созданной тонким соленоидом в любой точке пространства, можно использовать закон Био-Савара-Лапласа, в соответствии с которым элемент проводника \overline{dl} с током I создает в точке P(x₀,y₀,z₀) индукцию

$$\overline{dB} = \frac{\mu_0}{4\pi} \frac{I}{r^3} [\overline{dl}, \overline{r}], \qquad (2)$$

где \bar{r} – радиус-вектор, направленный из центра $d\bar{l}$ в точку Р (см. рис. 7); μ_0 – магнитная постоянная.

Интегрируя выражение (2) по всей поверхности эквивалентного соленоида, получим значение индукции \overline{B} . Например, прямоугольный магнит со сторонами 2a, 2b и 2c, намагниченный вдоль оси z (рис. 7), заменяется на эквивалентный соленоид, ток в котором течет по контуру, составленному из граней A, Б, Г и Д.

После двойного интегрирования по поверхности грани А получим следующие аналитические выражения для индукции в любой точке пространства: $B_{x,A} = 0$;

$$B_{y,A} = \frac{\mu_0 \cdot F}{8\pi \cdot c} \cdot \ln \left| \frac{|x_0 - a + \sqrt{(x_0 - a)^2 + (y_0 - b)^2 + (z_0 - c)^2}| \cdot |x_0 + a + \sqrt{(x_0 + a)^2 + (y_0 - b)^2 + (z_0 + c)^2}|}{|x_0 + a + \sqrt{(x_0 + a)^2 + (y_0 - b)^2 + (z_0 - c)^2}| \cdot |x_0 - a + \sqrt{(x_0 - a)^2 + (y_0 - b)^2 + (z_0 + c)^2}|};\right|$$

$$B_{z,A} = \frac{\mu_0 \cdot F}{8\pi \cdot c} \Big[\operatorname{arctg} \frac{(x_0 - a)(z_0 - c)}{(y_0 - b)\sqrt{(x_0 - a)^2 + (y_0 - b)^2 + (z_0 - c)^2}} + \frac{(x_0 - a)(z_0 - c)}{(y_0 - b)\sqrt{(x_0 - a)^2 + (y_0 - b)^2 + (z_0 - c)^2}} \Big] + \frac{(x_0 - a)(z_0 - c)}{(x_0 - a)^2 + (y_0 - b)^2 + (z_0 - c)^2} \Big]$$

$$+ \operatorname{arctg} \frac{(x_0 + a)(z_0 + c)}{(y_0 - b)\sqrt{(x_0 + a)^2 + (y_0 - b)^2 + (z_0 + c)^2}} - \operatorname{arctg} \frac{(x_0 - a)(z_0 + c)}{(y_0 - b)\sqrt{(x_0 - a)^2 + (y_0 - b)^2 + (z_0 + c)^2}}$$

$$- \operatorname{arctg} \frac{(x_0 + a)(z_0 - c)}{(y_0 - b)\sqrt{(x_0 + a)^2 + (y_0 - b)^2 + (z_0 - c)^2}} \Big].$$
 (3)

Для грани Б необходимо в полученных выражениях изменить знак перед b, а для граней Γ и Д поменять местами x_0 и y_0 , а также а и b, учтя то, что эти грани создают составляющую B_x и не создают составляющую B_y . Для расчета индукции от всего соленоида, а также от нескольких соленоидов используется метод наложения.

Цилиндрический магнит с радиусом R и длиной 2с (рис. 8), намагниченный вдоль оси z, заменяется на цилиндрический соленоид, ток в котором течет по его поверхности. В этом случае для точки $P(x_0,y_0,z_0)$, лежащей в плоскости хоz, после двойного интегрирования выражения (2) получим

$$B_{x} = \frac{\mu_{0} \cdot R \cdot F \cdot z_{0}}{\pi} \int_{0}^{\pi} \frac{\cos \varphi \cdot d\varphi}{\sqrt{T_{1} \cdot T_{2}} \cdot (\sqrt{T_{1}} + \sqrt{T_{2}})};$$

$$B_{y} = 0;$$

$$B_{z} = \frac{\mu_{0} \cdot R \cdot F}{4\pi \cdot c} \int_{0}^{\pi} \left(\frac{z_{0} - c}{\sqrt{T_{2}}} - \frac{z_{0} + c}{\sqrt{T_{1}}} \right) \frac{(R - x_{0} \cdot \cos \varphi) d\varphi}{T_{3}},$$
(4)

где $T_1 = R^2 + x_0^2 + (c + z_0)^2 - 2x_0 R \cos\varphi$; $T_2 = R^2 + x_0^2 + (c - z_0)^2 - 2x_0 R \cos\varphi$; $T_3 = R^2 + x_0^2 - 2x_0 R \cos\varphi$.





Рис. 8. Эквивалентный соленоид цилиндрического аксиально намагниченного постоянного магнита

Рис. 9. Эквивалентные соленоиды кольцевого аксиально намагниченного постоянного магнита

Полученные выражения включают интегралы эллиптического вида, которые решаются численно по известным алгоритмам при малых затратах времени.

Кольцевой постоянный магнит, намагниченный аксиально, заменяется на два тонких коаксиальных цилиндрических соленоида с размерами внутренней и внешней образующих поверхностей магнита и с встречным направлением токов (рис. 9). Магнитное поле от двух таких соленоидов (внутренний с радиусом R₁ и внешний с радиусом R₂) рассчитывается с помощью векторного сложения индукции (с учетом направления токов), созданной каждым соленоидом отдельно: $\overline{B} = \overline{B}(R_2, +F) + \overline{B}(R_1, -F)$. При этом МДС F обоих соленоидов

принимаются равными, поскольку намагниченность M_i по всему объему магнита и, следовательно, плотность молекулярных токов намагниченности на наружной и внутренней поверхностях одинакова. Для расчета поля системы нескольких соленоидов также используется метод наложения.

Намагниченности М_i магнитов, и, следовательно, МДС F эквивалентных соленоидов предлагается рассчитывать аналитически с помощью следующего метода, учитывающего кривую размагничивания материала магнитов и их взаимное влияние.

Поскольку внешние поля магнитов и соленоидов эквивалентны, то, используя выражения (3) и (4), можно определить полный поток в каждом магните рассматриваемой системы. Он равен потоку, проходящему через нейтральное сечение магнитов, которое определяется по координате максимума потока. По известному потоку в нейтральном сечении можно определить намагниченность магнитов. Для этого выбирается произвольное значение намагниченности M_{i1} и, используя выражения (3) и (4), определяется среднее по нейтральному сечению магнита значение индукции $B_{Z.CP}=B_{i1}$ задавая различные x_0 и y_0 в пределах нейтрального сечения. Поскольку между величинами M_i , F и B_i линейная зависимость, то справедливо следующее соотношение:

$$M_{i} = B_{i} M_{i1} / B_{i1}, (5)$$

где B_i – средняя индукция в нейтральном сечении магнита, соответствующая M_i.

Связь между намагниченностью, а также индукцией и напряженностью поля внутри магнита определяется известным уравнением

$$\mathbf{M}_{i} = \mathbf{B}_{i} / \boldsymbol{\mu}_{0} + \mathbf{H}_{i}, \tag{6}$$

где H_i – модуль напряженности поля внутри магнита.

Третьим уравнением является уравнение кривой размагничивания материала магнитов, связывающее между собой B_i и H_i для данного магнитного материала. При решении уравнений (5), (6) и уравнения кривой размагничивания находятся три неизвестные – M_i, B_i и H_i.

Поскольку действие магнитов с равномерной намагниченностью можно свести к действию поверхностных молекулярных токов намагниченности, то у таких магнитов силы взаимодействия одинаковы с силами взаимодействия эквивалентных соленоидов, для расчета которых можно воспользоваться законом Ампера

$$\overline{dP}_M = I \cdot \left[\overline{dl}, \overline{B}\right],\tag{7}$$

где \overline{dP}_{M} – сила, действующая на рассматриваемый соленоид; I = F/(2c) – ток, проходящий через элемент \overline{dl} рассматриваемого соленоида; \overline{B} – индукция, созданная всеми соленоидами за исключением рассматриваемого.

Интегрируя выражение (7) по всей поверхности рассматриваемого магнита, где токи намагниченности не равны нулю, получим силу P_M . Индукция \overline{B} и ток I в (7) рассчитываются по изложенной выше методике с использованием выражений (3) и (4).

4. Оценка метода расчета

Предложенный метод расчета магнитных систем командоаппаратов на базе шарикового МК позволяет рассчитывать намагниченность магнитов с учетом их материала и взаимного влияния, внешнее магнитное поле, силу взаимодействия магнитомягкого плунжера в МК с системой постоянных магнитов, а также силу взаимодействия самих магнитов. Для определения точности расчета была произведена экспериментальная проверка полученных расчетных соотношений. Расхождение расчетных и экспериментальных данных при определении намагниченности магнитов и индукции в пространстве не превышало 5 %, а при определении электромагнитных сил составило 10 – 15 %.

Например, на рис. 10 показаны расчетные и экспериментальные кривые распределения индукции B_X и B_Z вдоль оси x для кольцевого аксиально намагниченного постоянного магнита.

На рис. 11 показаны расчетные по формуле (1) и экспериментальные кривые распределения силы P_Z (x), действующей на стальной шарик со стороны призматического магнита.



Рис. 10. Графики распределения индукции B_X и B_Z вдоль оси х для кольцевого аксиально намагниченного постоянного магнита из материала 1БИ с размерами D = 11,5 мм, d = 7,5 мм, h = 4,4 мм при y = 0 и z = 5,2 мм (эксперимент – сплошные кривые, расчет – пунктирные кривые)



Рис. 11. Графики распределения силы P_z , действующей на стальной шарик со стороны призматического магнита из материала 24БА21 с размерами 2a = 2b = 11,5 мм, 2c = 7 мм (эксперимент – сплошные кривые, расчет – пунктирные кривые). Кривые 1 для $R_{III} = 0,5$ мм при z = 5 мм и y = 0, кривые 2 для $R_{III} = 1,6$ мм при z = 6,1 мм и y = 0

Графики построены в относительных единицах P_Z/P_g , где P_g – вес шарика, рассчитанный через его объем и принятую плотность материала 7800 кг/м³. Отношение P_Z/P_g показывает способность коммутатора к виброудароустойчивости.

Литература

- Магнитоуправляемые контакты (герконы) и изделия на их основе: Монография / С.М. Карабанов, Р.М. Майзельс, В.Н. Шоффа, под ред. д.т.н., профессора В.Н. Шоффы. – Долгопрудный: Издательский Дом «Интеллект», 2011.
- Шоффа В.Н. Особенности проектирования и производства миниатюрных и субминиатюрных герконов. Магнитоуправляемые контакты (герконы) и изделия на их основе / Сборник трудов второй Международной научно-практической конференции. 1-3 октября 2008 г. Под ред. д.т.н. С.М. Карабанова. Рязань: Издательство ООО «Полиграф», 2009.
- 3. В. Варадан, К. Виной, К. Джозе. ВЧ МЭМС и их применение. М.: Техносфера, 2004.
- 4. M. Ruan, J. Shen, C. Wheeler. Latching microelectromagnetic relays. Sensors and Actuators A, 2001, 91.

- 5. F. Gueissaz, D. Piguet. The microreed, an ultra-small passive MEMS magnetic proximity sensor designed for portable application. The 14th IEEE International Conference on Micro Electro Mechanical Systems, MEMS 2001.
- 6. Hiroyasu Torasawa, Naokuri Arima. Reed switches developed using micro-machine technology / Oki Technical Review, April 2005, issue 202, vol.72, no.2.
- 7. www.magnasphere.com. Revised 10/24/2007.
- 8. Шоффа В.Н. Анализ полей магнитных систем электрических аппаратов. М.: Издательство МЭИ, 1994.
- 9. Шоффа В.Н., Чичерюкин В.Н. Расчет разомкнутых многофункциональных магнитных систем командоаппаратов методом эквивалентного соленоида. Электричество. 1988, № 4, с. 77-80.
- 10. А.С. 1072131 (СССР). Переключатель / В.Н. Шоффа, В.Н. Чичерюкин. Опубл. в Б.И., 1984, № 5.
- 11. Постоянные магниты. Справочник / Под ред. Ю.М. Пятина. М.: Энергия, 1980. 488с.