

## ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПАРАМЕТРОВ РЕГУЛИРОВАНИЯ ВЕКТОРА МАГНИТНОГО МОМЕНТА СВЕРХПРОВОДЯЩЕЙ СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ КОСМИЧЕСКОГО АППАРАТА

**В.А. Шувалов, А.А. Яковлев**  
(ФГУП ЦНИИ машиностроения)

*Разработан сверхпроводящий исполнительный орган управления угловым движением КА. Приводятся описание экспериментальной модели и результаты исследования пределов регулирования магнитного момента сверхпроводящей системы.*  
**Ключевые слова:** магнитный момент, сверхпроводимость, ориентация КА.

### Введение

Магнитные системы управления стали применяться на борту уже первых космических аппаратов (КА) [1]. В качестве исполнительных органов этих систем (ориентации, стабилизации) использовались, как правило, электромагниты (соленоиды) с медной обмоткой, замкнутой на источник электропитания. Таких соленоидов, установленных на одной платформе, могло быть несколько.

Интегральной характеристикой магнитного исполнительного органа является магнитный момент  $\overline{M}$ , который определяется произведением тока в обмотке  $J$  на векторную площадь витка  $\overline{S}$  и количество витков  $n$ :

$$\overline{M} = nJ\overline{S}.$$

Взаимодействие электромагнита с внешним полем  $\overline{H}$  (Земли) создает механический момент

$$\overline{N} = [\overline{M}, \overline{H}],$$

который и является управляющим воздействием на КА.

Как видно из приведенных выражений, величина управляющего момента  $\overline{N}$  может регулироваться за счёт изменения тока  $J$  в соленоиде с помощью источника электропитания. Этот способ регулирования  $\overline{N}$  получил широкое практическое применение преимущественно на малых КА как грубая система ориентации и предварительного успокоения (точность ориентации составляла несколько градусов).

Применение сверхпроводников позволяет по новому подойти к решению этой задачи – регулированию момента  $\overline{M}$  и, следовательно, изменению

управляющего момента  $\overline{N}$ . Однако при построении сверхпроводящего магнитного исполнительного органа управление КА будет организовано на иных принципах.

### Некоторые особенности взаимодействия сверхпроводящих контуров

Характерным свойством сверхпроводника является полное отсутствие омического сопротивления. Ток в замкнутом контуре из такого материала может циркулировать сколь угодно долго без энергисточника. Известно [2], что полный магнитный поток, связанный с таким контуром, будет сохраняться постоянным:

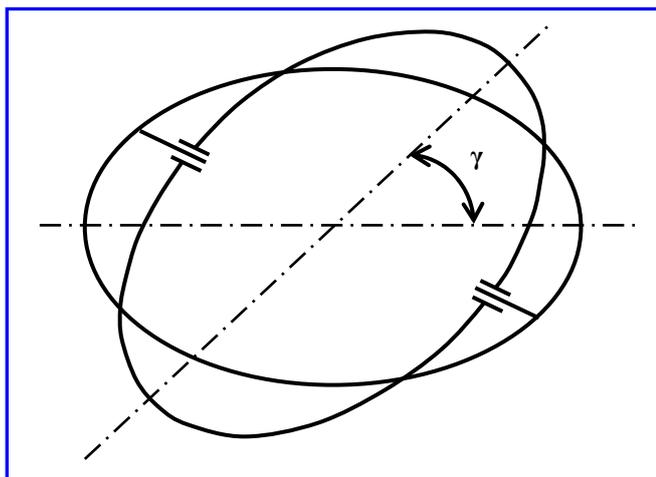
$$IL = JL + \Phi_v = \text{const}, \quad (1)$$

где  $\Phi_v$  – магнитный поток внешнего поля через контур;  $I$  – начальный (транспортный) ток в контуре;  $J$  – полный ток в контуре;  $L$  – индуктивность контура.

Следовательно, изменение внешнего магнитного поля приводит к изменению тока в сверхпроводящем контуре и его магнитного момента  $\overline{M}$  (аналогичная ситуация и при изменении взаимного расположения двух и более сверхпроводящих контуров).

### Сверхпроводящая магнитная система с переменным моментом

Схема системы позволяет изменять вектор магнитного момента как по величине, так и по направлению и не требует изменения токов в электромагнитах (рис. 1). Она состоит из двух соосных сверхпроводящих электромагнитов. Одна из катушек жёстко закреплена с корпусом КА, а вторая имеет возможность проворачиваться относительно неё на некоторый угол  $\gamma$ .



**Рис. 1. Схема системы с переменным магнитным моментом**

Как было указано выше, одним из свойств замкнутых сверхпроводящих контуров является сохранение полного магнитного потока.

Условие (1) при наличии двух сверхпроводящих контуров можно записать следующим образом:

$$\begin{cases} I_1 L_1 = J_1 L_1 + k J_2 \sqrt{L_1 L_2}; \\ I_2 L_2 = J_2 L_2 + k J_1 \sqrt{L_1 L_2}, \end{cases} \quad (2)$$

где  $k = L_{12} / \sqrt{L_1 L_2}$  – коэффициент взаимной индукции;  $L_{12}$  – взаимная индуктивность.

Система уравнений (2), решённая относительно  $J_1$  и  $J_2$ , примет вид

$$\begin{cases} J_1 = \frac{I_1 - I_2 k \sqrt{L_2 / L_1}}{1 - k^2}; \\ J_2 = \frac{I_2 - I_1 k \sqrt{L_1 / L_2}}{1 - k^2}. \end{cases} \quad (3)$$

Из уравнений системы (3) видно, что полные токи в сверхпроводящих контурах являются функцией коэффициента взаимной индукции  $k$ , значение которого зависит от взаимного распо-

ложения катушек, т. е. угла рассогласования. Таким образом, путём механического изменения взаимного расположения сверхпроводящих контуров, т. е. значения  $k$ , можно изменять в них полные токи, а следовательно, и суммарный магнитный момент системы.

Для наиболее глубокого изменения магнитного момента (вплоть до нулевого значения) необходимо, чтобы оси контуров совпадали, а полные токи имели противоположные направления:

$$M_{\Sigma} = J_1 n_1 S_1 + J_2 n_2 S_2 = 0,$$

где  $n_1, n_2$  – число витков в сверхпроводящих электромагнитах;  $S_1, S_2$  – площади витков катушек.

Кроме того, в этом положении в катушках будут значительно возрастать полные токи в сравнении с транспортными. Если принять, что имеются катушки с одинаковыми параметрами ( $I, L, n, S$ ), то тогда, в соответствии с (3), полные токи в катушках определяются выражением

$$J = \frac{I}{1 - k}.$$

При коэффициенте взаимной индукции  $k = 0,8$  полный ток возрастёт относительно транспортного в пять раз.

### Физическое моделирование сверхпроводящей магнитной системы с переменным моментом

Для подтверждения теоретических расчётов были проведены экспериментальные исследования двухконтурной сверхпроводящей магнитной системы. Для этого была создана лабораторная модель устройства (рис. 2), состоящая из двух катушек, намотанных из ниобий-титанового провода диаметром 0,33 мм с параметрами, представленными в таблице.

Эксперимент проводился в криостате КГ 300/60 при температуре жидкого гелия. Внутренняя (подвижная) катушка была снабжена ручным приводом из теплой зоны, позволяющим производить её разворот на 180°.

Параметры	Катушка	
	Внешняя	Внутренняя
Средние диаметры катушек, мм	195	190
Число витков	50	200
Индуктивность, мГн	1,8	30,7
Максимальный коэффициент взаимной индукции	0,81	

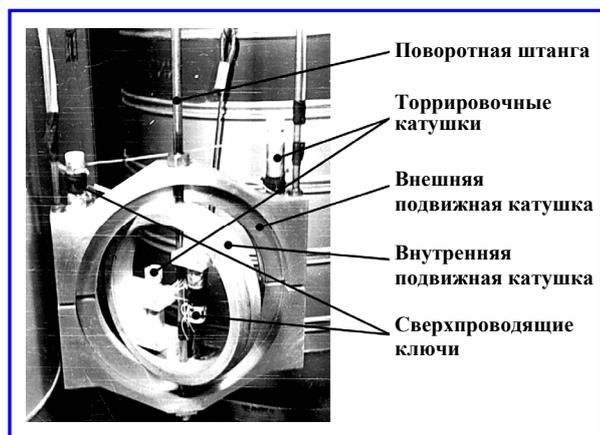


Рис. 2. Экспериментальная модель

Магнитный момент системы двух катушек регистрировался при помощи трехкомпонентных датчиков Холла, размещённых вне криостата. Токи в катушках также измерялись при помощи датчиков Холла, установленных в торрировочных катушках (однослойные, диаметр 15 мм, длина 55 мм), намотанных тем же проводом, что и исследуемые. Запитка катушек осуществлялась при помощи тепловых ключей с нагревателем из манганиновой проволоки сопротивлением 140 Ом.

Эксперимент проводился по следующей схеме. Катушки устанавливались с максимальным коэффициентом индукции – соосно. Размыкались оба ключа, и проводилась запитка внешней катушки, после чего – внутренняя, током противоположного направления.

Вводимый ток контролировался при помощи датчиков Холла, установленных в торрировочных катушках и вне криостата. Ток увеличивали до тех пор, пока суммарный магнитный момент (внешнее магнитное поле) не становился нулевым.

После этого ключ внутренней катушки замыкался (переводился в сверхпроводящее состояние), и производился разворот подвижной катушки на  $180^\circ$  при постоянной регистрации изменений полных токов в катушках и суммарного магнитного момента датчиками Холла. Усредненные результаты экспериментов представлены на рис. 3.

Полученные зависимости близки к расчётным. Максимальный магнитный момент  $M_\Sigma$  разработанного устройства достигается при коэффициенте взаимной индукции  $0,55 k$ . Эксперимент показал, что при практической реализации такой

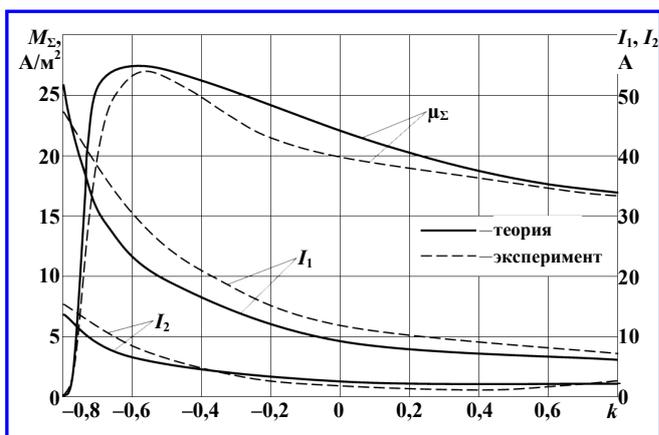


Рис. 3. Зависимости токов в катушках и суммарного магнитного момента от угла рассогласования

сверхпроводящей магнитной системы с переменным моментом, угол рассогласования между катушками можно ограничить значениями от  $0^\circ$  до  $45 - 50^\circ$ , что в нашем случае соответствует значениям  $k$  от 0,8 до 0,55.

### Заключение

Выполненные исследования показали, что сверхпроводниковые технологии позволяют реализовать исполнительный орган магнитной системы ориентации / стабилизации КА, состоящий из двух соосных короткозамкнутых катушек, при эксплуатации которого не требуется регулировать токи в электромагнитах.

Управление вектором магнитного момента как по величине, так и по направлению осуществляется за счёт изменения угла рассогласования катушек. Проведённые экспериментальные исследования макета устройства подтвердили предложенную математическую модель. Кроме того, физическое моделирование показало возможность регулирования магнитного момента  $\overline{M}$  в широких пределах при ограниченном угле рассогласования сверхпроводящих катушек.

Сложность реализации сверхпроводящего исполнительного органа системы управления угловым движением КА определяется необходимостью криостатирования устройства на уровне температур жидкого гелия.

Однако успехи в развитии технологий высокотемпературной сверхпроводимости позволяют надеяться на создание исполнительных уст-

ройств, функционирующих при температурах жидкого азота и выше. Переход с гелиевых к азотным температурам позволит существенно снизить технологические трудности и повысит надёжность в реализации и эксплуатации сверхпроводящих систем на борту КА.

*Поступила в редакцию 31.03.2011*

### **Литература**

1. Коваленко А. П. Магнитные системы управления космическими летательными аппаратами / А. П. Коваленко. – М. : Машиностроение, 1975. – 248 с.
2. Роуз-инс А. Введение в физику сверхпроводимости / А. Роуз-инс, Е. Родерик. – М. : Мир, 1972. – 286 с.

***Вячеслав Александрович Шувалов**, канд. техн. наук, начальник лаборатории,  
т. 513-48-55, e-mail: s5134146@yandex.ru.*  
***Александр Александрович Яковлев**, канд. техн. наук, ведущий научн. сотрудник,  
т. 513-47-44, e-mail: s5134146@yandex.ru; aakuzmin@yandex.ru.*