

УДК 629.78.03:621.313.29

**ЭЛЕКТРОМЕХАНИЧЕСКИЙ  
ИСПОЛНИТЕЛЬНЫЙ ОРГАН НА БАЗЕ  
БЕСКОНТАКТНОГО ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЯ  
ПОСТОЯННОГО ТОКА С ПЕЧАТНОЙ ОБМОТКОЙ  
НА СТАТОРЕ ДЛЯ МАЛОГО КОСМИЧЕСКОГО  
АППАРАТА**

Т.Н. Баландина

Томский политехнический университет

E-mail: [error.balandina@yandex.ru](mailto:error.balandina@yandex.ru)

**Баландина Татьяна Николаевна**, магистрант кафедры точного приборостроения Института неразрушающего контроля ТПУ.

E-mail:

[error.balandina@yandex.ru](mailto:error.balandina@yandex.ru)

Область научных интересов: системы управления космическими аппаратами.

Создание нового электромеханического исполнительного органа на базе управляемого по скорости двигателя-маховика для системы ориентации космического аппарата с улучшенными массогабаритными характеристиками позволит экономить потребителям деньги при запуске космических аппаратов. Требование минимальной массы является одним из главных, предъявляемых к электромеханическим исполнительным органам. Целью исследования является расчет параметров и разработка конструкции электромеханического исполнительного органа на базе бесконтактного двигателя постоянного тока с улучшенными массогабаритными характеристиками. Это достигается за счет применения плоского статора, выполненного в виде печатного монтажа, при длине статора цилиндрической формы десятки миллиметров сокращаются до 1,5–2,0 мм, что влечет уменьшение размеров силовой части корпуса исполнительного органа, а соответственно, и массы всего двигателя-маховика. Результатом выполненной работы является разработанная конструкция двигателя-маховика на базе бесконтактного двигателя постоянного тока с печатной обмоткой на дисковом статоре.

**Ключевые слова:**

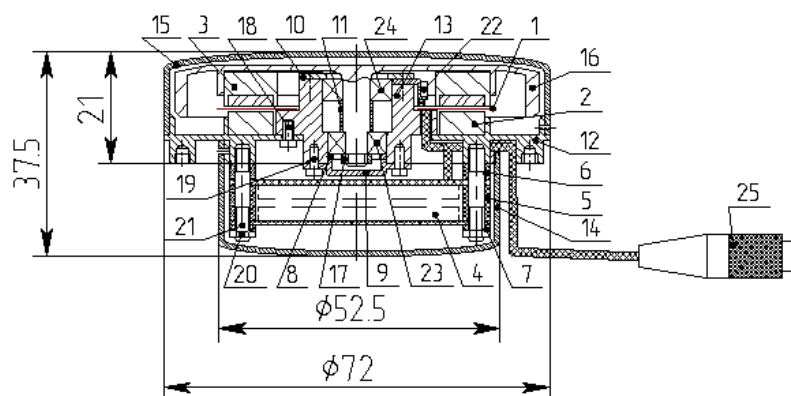
Электромеханический исполнительный орган, управляемый по скорости двигатель-маховик, космический аппарат, бесконтактный двигатель постоянного тока с печатной обмоткой, кинетический момент, момент управления.

В настоящее время в электромеханических исполнительных органах (ЭМИО) космических аппаратов наибольшее применение находят бесконтактные двигатели постоянного тока (БДПТ). Отсутствие щеточно-коллекторного узла у данного вида двигателя увеличивает надежность и долговечность, повышает коэффициент полезного действия. Такой вид электродвигателя может работать в условиях широкого диапазона температур, в вакууме [1–2].

Научно-технической новизной данной конструкции является то, что данный тип электродвигателя по анализу доступных публикаций не имеет аналогов применения в космической области.

В данной статье рассматривается конструкция ЭМИО на базе бесконтактного электродвигателя постоянного тока с печатной обмоткой на якоре, мощностью 5 Вт и напряжением питания 12 В, кинетическим моментом 0,3 Нм, угловой скоростью 628 рад/с. Применение плоского статора с печатной обмоткой для ЭМИО является оригинальным новшеством.

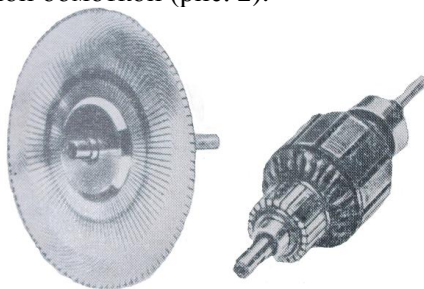
Конструкция ЭМИО на базе бесконтактного электродвигателя постоянного тока с печатной обмоткой на статоре вместе с блоком управления приведена на рис. 1.



**Рис. 1.** Конструкция ЭМИО на базе бесконтактного электродвигателя постоянного тока с печатной обмоткой на статоре с блоком управления и его габариты

Ротор 3 включает в себя кольцевой магнитопровод из магнитомягкого материала, в пазах которого установлены литые постоянные магниты квадратной формы. Крепление постоянных магнитов в пазах магнитопровода осуществляется приклеиванием. Кольцо 2 является второй частью магнитопровода. Поверхности кольца 2 и самих полюсов, образующие торцевой воздушный зазор, тщательно обработаны для обеспечения одинаковых величин зазора магнитной индукции под каждым полюсом. Магнитная система встраивается в корпус 12 и диафрагму маховика 16 из немагнитного материала. Через отверстие в корпусе 12 подводятся провода питания (от разъема 25) к трехфазному статору 1, блоку управления 4 и датчикам положения 22, установленным на пластинах, которые при помощи резьбового соединения крепятся в пазах втулки-держателя 13. Статор 1 приклеивается к втулке-держателю 13. Блок управления 4 крепится к корпусу 12 при помощи шпилек 21. Вся конструкция ЭМИО закрывается верхним 15 и нижним 14 кожухами. Отверстия в кожухах и корпусе заливаются компаундом. Для установки ЭМИО на борту малого космического аппарата используются ножки корпуса.

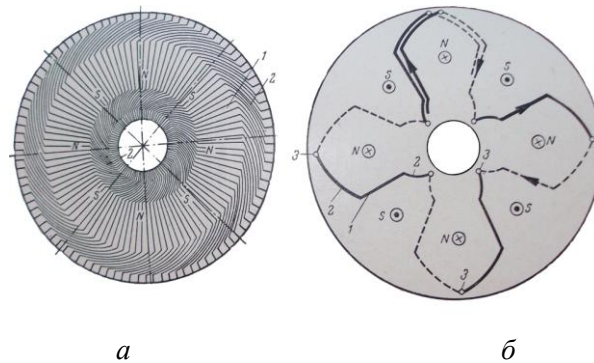
Отличительной чертой конструкции данного электродвигателя является плоская форма тонкого диска статора с печатной обмоткой (рис. 2).



**Рис. 2.** Печатный дисковый якорь (слева) и якорь обычного исполнения (справа) двигателей постоянного тока одинаковой мощности [3]

Статор бесконтактного двигателя постоянного тока с печатной обмоткой (рис. 3) представляет собой тонкий диск из механически прочного и нагревостойкого изоляционного материала.

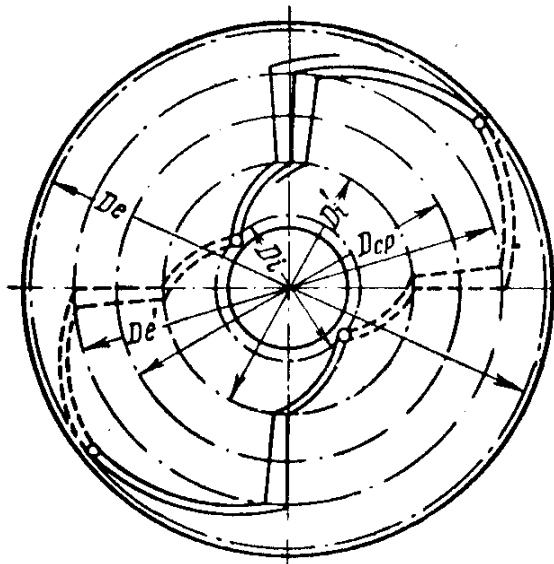
На обеих сторонах диска напечатаны плоские тонкие медные проводники обмотки. Радиальные участки 1 проводников (рис. 3) образуют активную зону обмотки. Изогнутые по эвольвенте части 2 проводников вблизи кромки и центра дискового статора необходимы для соединения активных проводников 1 и называются лобовыми частями обмотки. Лобовые части, напечатанные на противоположных сторонах диска, соединяются между собой через гальванизированные отверстия 3 (гальванические заклепки). На внутреннем диаметре гальванизированные переходы 3 часто располагаются в два ряда в шахматном порядке.



**Рис. 3.** Схема восьмиполюсной волновой печатной обмотки дискового статора [3]: *a* – обмотка на диске статора; *б* – схема соединения печатных проводников на обеих сторонах диска статора

Ниже приведен расчет основных параметров статора с печатной обмоткой и маховика.

$D_{cp}$  – оптимальный средний диаметр статора (рис. 4).



**Рис. 4.** Размеры печатной обмотки дискового статора [3]

Внутренний диаметр обмотки [3]:  $D_i = \frac{N \cdot t_y}{2 \cdot \pi \cdot \gamma} = \frac{34 \cdot 0,074}{2 \cdot 3,14 \cdot 0,77} = 1,6(\text{см})$ , где

$t_y$  – минимальный шаг печатной обмотки;  $\gamma$  – отношение минимального шага печатной обмотки  $t_y$  к минимальному шагу на внутреннем диаметре  $t_i$ .

Внешний диаметр обмотки [3]:  $D_e = D_e' + \frac{\pi \cdot \gamma \cdot D_i}{2 \cdot p} = 3,6 + \frac{3,14 \cdot 0,77 \cdot 1,6}{2 \cdot 3} = 4,3(\text{см})$ , где

$D_e'$  – внутренний диаметр внешних лобовых частей (рис. 4). Но, исходя из рациональной комплектации всего ЭМИО, приняты следующие значения диаметров обмотки (с сохранением пропорций): внутренний диаметр обмотки 2,26 см, внешний – 5,2 см.

Для данной магнитной системы выбраны неодимовые магниты марки N35. Допустимая магнитная индукция магнитов:  $B_c = 1,9 \cdot 10^{-4} (\text{вб} / \text{см}^2)$  коэрцитивная сила:  $H_c = 87\ 600 (\text{А} / \text{см})$ .

Воздушный зазор [3]:  $\delta = 0,03 \cdot D_{cp} = 0,03 \cdot 3 = 0,09 (\text{см})$ .

Выражение ширины полюса:  $b_m = \frac{\sigma \cdot B_{cp}}{B_c} \cdot \tau = \frac{1,37 \cdot 0,001}{0,00019} \cdot 1,57 = 1,14(\text{см})$ , где  $\sigma$  – коэффициент рассеяния;  $B_{cp}$  – средняя индукция в воздушном зазоре. Длина полюса:

$l_m = 0.268 \cdot D_{cp} = 0.268 \cdot 3 = 0.81$  (см), высота полюса:

$$h_m = \frac{B_r \cdot B_{cp} \cdot \delta}{H_c \cdot B_c \cdot \mu_0 \cdot \alpha_\delta} = \frac{0.000145 \cdot 0.0001 \cdot 0.09}{87600 \cdot 0.00019 \cdot 1.26 \cdot 10^{-8} \cdot 0.9} \approx 0.2 \text{ (см)}.$$

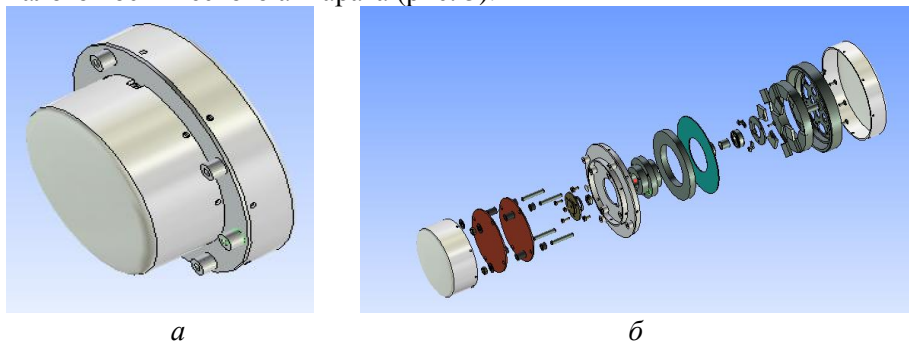
Момент инерции маховой массы и ротора 3 [4]:  $J = \frac{H}{\Omega} = \frac{0.3}{628} = 0.00047$  (кг·м<sup>2</sup>). Момент инерции ротора составляет 0,00023 (кг·м<sup>2</sup>), то момент инерции обода маховика равен 0,00024 (кг·м<sup>2</sup>). Так как размеры маховика выбираются таким образом, чтобы фактический момент инерции был равен или несколько больше требуемого момента инерции, для дальнейших расчетов принимаем значение момента инерции, равное 0,0003 (кг·м<sup>2</sup>).

Используя выражение момента инерции маховой массы [4]  $J = \frac{\pi \cdot \gamma \cdot h}{2} \cdot (R^4 - r^4)$ , где  $h = 0,007$  (м) – высота обода;  $\gamma = 77\,500$  Н/м<sup>3</sup> – удельная масса материала (сталь марки 14X17H2);  $R = 0,033$  (м) – наружный радиус маховика;  $r$  – внутренний радиус маховика, м. Определим внутренний радиус обода маховика:

$$r = \sqrt[4]{R^4 - \frac{2 \cdot J}{\pi \cdot h \cdot \gamma}} = \sqrt[4]{0.033^4 - \frac{2 \cdot 0.0003}{3.14 \cdot 0.007 \cdot 7500}} = 0.031 \text{ (м)}.$$

Масса обода маховика равна 0,043 кг, масса ротора 0,055 кг, то масса ротора и обода маховика равна 0,098 кг.

Разработанный ЭМИО предназначен для пространственной ориентации и стабилизации положения малого космического аппарата (рис. 5).



**Рис. 5.** 3D-модель исполнительного органа: *а* – в собранном виде; *б* – в разобранном виде

Основными компонентами разработанной конструкции исполнительного органа являются: двигатель – маховик, датчики положения ротора, блок управления.

Разработанный исполнительный орган генерирует переменный кинетический момент  $H = \pm 0,3$  (Нмс).

Двигатель-маховик включает в себя:

1. БДПТ с печатной обмоткой на дисковом статоре вращающий маховик с переменной угловой скоростью  $\Omega = \pm 6000$  (об / мин).
2. Маховик представляет собой массивный ротор с явно выраженным ободом.
3. Датчики положения ротора, реализованные на датчиках Холла.

В табл. 1 приведены основные технические характеристики разработанного ЭМИО.

**Таблица 1.** Технические характеристики разработанного ЭМИО

Технические параметры	Значение
Кинетический момент, Нмс	0,3
Максимальный управляющий момент, Н·м	0,01
Максимальная потребляемая мощность, Вт	5
Ресурс, ч/лет	81613/9
Масса УДМ/БА, кг	0,21/0,11
Габаритные размеры, мм	УДМ=70×21; БА=52×19

Проведенные расчеты конструкции ЭМИО на базе бесконтактного электродвигателя постоянного тока с печатной обмоткой на статоре показывают, что данная конструкция имеет меньшие размеры (почти в два раза), чем ЭМИО с классическим бесконтактным двигателем. К недостаткам рассматриваемой конструкции ЭМИО относится то, что при несимметричном расположении полюсов магнитное рассеяние значительно больше, чем при симметричном. Однако в маломощных двигателях с дисковым статором применяют все же несимметричное расположение полюсов, имеющее ряд конструктивных достоинств, а именно:

- почти в 2 раза меньшее количество деталей;
- несимметричная магнитная система более технологична.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Алексеев К.Б., Бебенин Г.Г. Управление космическими летательными аппаратами. – М.: Машиностроение, 1974. – 343 с.
2. Дмитриев В.С. Электромеханические исполнительные органы систем ориентации космических аппаратов. Ч. 1 / В.С. Дмитриев, Т.Г. Костюченко, Г.Н. Гладышев: учеб. пособие. – Томск: Изд-во ТПУ, 2013. – 208 с.
3. Казанский В.М., Основич Л.Д. Малоинерционные электродвигатели постоянного тока с печатной обмоткой на якоре. – М.: Энергия, 1965. – 96 с.
4. Гладышев Г.Н. Системы управления космическими аппаратами / Г.Н. Гладышев, В.С. Дмитриев, В.И. Копытов: учеб. пособие. – Томск: Изд-во ТПУ, 2000. – 207 с.

Поступила 12.05.2014 г.