

ОСОБЕННОСТИ ПОСТРОЕНИЯ ЭЛЕКТРОМЕХАНИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ ОРИЕНТАЦИИ НАНОСПУТНИКА НА ОСНОВЕ БЕСКОНТАКТНОГО МАГНИТОЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ДВИГАТЕЛЯ

А.Е. Антонов, докт.техн.наук, **К.П. Акинин**, канд.техн.наук, **В.Г. Киреев**, канд.техн.наук
Институт електродинаміки НАН України,
пр. Перемоги, 56, Київ, 03057, Україна. E-mail: aoc@ied.org.ua

Рассмотрены особенности построения магнитоэлектрического беспазового двигателя для маховичной системы пространственной ориентации наноспутника. Изложены принципы выбора параметров двигателя, позволяющие минимизировать массогабаритные показатели, энергопотребление и поля рассеяния, создаваемые магнитной системой возбуждения двигателя. Библ. 13, рис. 2, табл. 1.

Ключевые слова: наноспутник, ориентация спутника, реактивный маховик, бесконтактный электропривод.

Введение. В 90-х годах прошлого столетия в космическом приборостроении начал формироваться новый класс космических аппаратов, названных малыми спутниками. Существует условная классификация таких спутников, в соответствии с которой аппараты массой до одного килограмма отнесены к пикоспутникам, от одного до десяти килограммов – к наноспутникам и от 10 до 100 кг – к микроспутникам. Аппараты массой от 100 до 500 кг называют просто малыми спутниками [7].

Для ориентации наноспутников объемом несколько кубических дециметров применяются как пассивные системы, построенные на основе взаимодействия ферромагнетиков с магнитным полем Земли [12], так и активные, в которых ориентирующие моменты возникают как реакция от взаимодействия неподвижных и подвижных элементов, расположенных на борту спутника. К активным можно отнести также системы, в которых ориентация аппарата происходит путем взаимодействия токового контура, установленного на борту, с магнитным полем Земли. Регулируемый ориентирующий момент при этом действует вплоть до совмещения результирующего вектора магнитного поля контура с направлением магнитных силовых линий Земли. Ориентация в такой системе происходит аналогично тому, как продолговатый ферромагнитный элемент в пассивной системе стремится расположить свою наиболее протяженную сторону вдоль магнитных силовых линий поля Земли. Недостаток таких систем ориентации состоит в зависимости эффективности их действия от углового положения ориентирующего элемента относительно магнитного поля Земли, которая резко снижается при небольших углах отклонения от направления магнитных силовых линий.

Более эффективным является способ управления угловым положением спутника, основанный на создании реактивных моментов при обеспечении режима вращения ротора-маховика. При таком способе управления реактивный момент, прикладываемый к статорным обмоткам двигателя во время разгона ротора, разворачивает спутник в противоположном направлении. Располагая на борту три управляемых маховика, оси вращения которых взаимно ортогональны, можно создавать управляющий момент любого знака и направления независимо от положения аппарата относительно магнитного поля Земли. Маховичная система также не лишена недостатков, главный из которых состоит в том, что при достижении максимальной скорости вращения ротора управляющий момент больше создан быть не может, и требуется разгрузка управляющего устройства путем торможения маховика при одновременной компенсации реактивного момента. В качестве таких компенсаторов применяют либо реактивные двигатели малой тяги, требующие, в свою очередь, расхода рабочего тела, либо токовые контуры с регулируемой величиной тока. Второй недостаток маховичных систем ориентации – более высокая стоимость по сравнению с пассивными или токово-контурными. Тем не менее, маховичные системы применяют, и обусловлено это их лучшим быстродействием и более высокой точностью ориентации.

Маховичные системы ориентации, созданные для спутников различных масс и объемов, существенно отличаются друг от друга по величине развиваемых управляющих моментов, массе, габаритам и энергопотреблению. Очевидно, что в наноспутниках нецелесообразно применять системы, предназначенные для ориентации космических аппаратов с существенно большими массой, габаритами и осевыми моментами инерции. Система ориентации, избыточная по величине развиваемого момента, неоправданно увеличивала бы массу и габариты наноспутника, одновременно требуя и соответствующего увеличения емкости бортовых источников энергоснабжения. Для ориентации нанос-

путников с ограниченным объемом и энергоресурсами должны быть созданы специальные особо миниатюризированные, экономичные и надежные маховичные системы. При небольших величинах моментов инерции наноспутника немаловажным требованием является также плавность регулирования скорости вращения маховика, за счет чего достигается плавная регулировка положения спутника вокруг соответствующей оси.

Хотя при создании маховичной системы ориентации наноспутника может быть применен электропривод любого типа, все же наилучший результат в плане минимизации энергопотребления и габаритов исполнительного электромеханического устройства дает использование магнитоэлектрической схемы построения двигателя, особенность которой состоит в возбуждении магнитного поля ротора постоянными магнитами, что автоматически исключает затраты электроэнергии на его возбуждение. Такая схема построения двигателя в сочетании с использованием современных магнитотвердых материалов позволяет достигать самого высокого КПД среди электромеханических преобразователей других типов [5, 9]. При этом наилучший эффект дает использование в двигателях высококоэрцитивной и энергоемкой интерметаллической композиции NdFeB [13], номенклатура марок и типоразмеров которой сегодня достаточно широка, что позволяет подобрать наиболее подходящий материал и форму заготовки с учетом заданных условий эксплуатации устройства. При возбуждении ротора постоянными магнитами двигатель становится бесконтактным, поскольку отпадает необходимость в щеточно-коллекторном узле для передачи электроэнергии на вращающуюся часть, в результате исчезают и связанные с его работой потери на трение. Возрастает также и надежность работы устройства.

Целью статьи является формулирование принципов построения электромеханических систем ориентации на основе двигателя магнитоэлектрического типа, применение которых позволит сформировать оптимальную структуру системы ориентации наноспутника и получить максимальный эффект в обеспечении оговоренных выше требований.

Основной материал. Для снижения потерь электромагнитной природы в бесконтактном двигателе с постоянными магнитами использована структура [3], в которой отсутствуют взаимно подвижные ферромагнитные элементы ротора и статора, благодаря чему исключаются потери на перемагничивание и гистерезис стали. Отсутствие железа статора – первый важный принцип построения быстроходных двигателей с постоянными магнитами. В структуру такого двигателя (рис. 1) входит n -полюсный магнит 1, установленный на валу 2, который одновременно выполняет функции внутреннего магнитопровода. С валом 2 жестко соединен внешний магнитопровод 3, который одновременно выполняет функции носителя кинетического момента – маховика. Статорные обмотки 4 располагаются в гладком цилиндрическом зазоре между поверхностями магнитов и внутренней поверхностью внешнего магнитопровода. Таким образом, магниты и оба магнитопровода принадлежат ротору, что исключает их взаимное перемещение. Статор в приведенной компоновке не содержит железа, что обеспечивает более высокий, чем в традиционных пазовых конструкциях, коэффициент заполнения воздушного зазора медью и повышает технологичность двигателя.

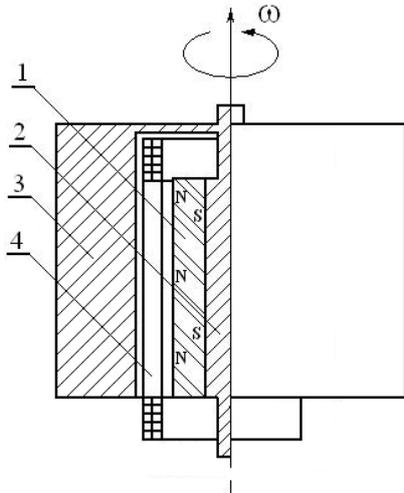


Рис. 1

Другой важный принцип построения магнитоэлектрического двигателя – использование неявнополюсной системы возбуждения ротора. Неявнополюсный ротор в сочетании со статором без железа обеспечивает более плавное вращение даже при малых оборотах благодаря отсутствию реактивных усилий, обусловленных магнитным тяжением полюсов ротора к зубцам статора, которое всегда имеет место в зубцовых и явнополюсных конструкциях двигателей с постоянными магнитами.

Минимизация габаритов маховичного устройства ориентации при заданном кинетическом моменте ротора достигается уменьшением сечения внешнего магнитопровода до величины, определяемой условием его ненасыщенности магнитным потоком и установкой поверх него кольца, выполненного из сплава повышенной плотности, например, сплава ВЖ 7-3 (плотность 17 г/см³). Применение тяжелого сплава приводит к уменьшению площади поверхности ротора, что, в свою очередь, ведет к снижению потерь на аэродинамическое трение, которые имеют место в случае расположения двигателя в герметичной газонаполненной камере. Необходимо отметить, что в беспазовом магнитоэлектрическом двигателе проводники обмотки располага-

ются непосредственно в магнитном поле ротора, что обуславливает потери на вихревые токи в меди проводников. Величина этих потерь при прочих равных условиях пропорциональна четвертой степени диаметра проводника [2], откуда следует, что для снижения потерь на вихревые токи в медном проводе беспазового статора обмотку необходимо выполнять в виде параллельных проводников, сумма сечений которых соответствовала бы требуемому сечению одножильного провода. Технологически такая обмотка изготавливается путем одновременной намотки проводников с нескольких катушек, что реализуется без применения специальной нестандартной оснастки. Изготовление обмотки из нескольких параллельных проводников автоматически приводит и к повышению надежности обмотки, так как обрыв одного или даже нескольких отдельных проводников не приводит к выходу из строя всего устройства ориентации.

Источниками механических потерь в рассматриваемой системе остаются подшипники, а в случае размещения двигателя в герметичном газонаполненном корпусе, – аэродинамическое трение. Снижение потерь в подшипниках достигается выбором типа подшипников, класса их точности и применяемой смазки. Для двигателей, работающих в условиях отсутствия газовой среды, целесообразно применение специальных подшипников без смазки.

Для варианта расположения ротора в газонаполненной камере необходимо принимать меры по снижению аэродинамических потерь. Момент аэродинамического сопротивления вращающегося цилиндрического тела при ламинарном характере пограничного слоя среды определяется при прочих равных условиях четвертой степенью линейных размеров ротора [8]. Поэтому снижение потерь этого вида при сохранении момента инерции ротора связано с уменьшением внешнего диаметра маховика при одновременном увеличении его массы, что и достигается применением для изготовления обода маховика тяжелых сплавов. Минимизация аэродинамических потерь связана также с выбором такой частоты вращения, при которой характер пограничного слоя среды не перейдет из ламинарного в турбулентный, когда аэродинамические потери резко возрастают. Заметим, что герметизация газонаполненной камеры требует введения в конструкцию надежного клапанного устройства во избежание утечки газа из внутренней полости камеры в условиях космического пространства.

Важный принцип построения системы, приводящий к достижению поставленных целей, связан и со структурной минимизацией как двигателя-маховика, так и системы управления вращением ротора. Суть одного из подходов к реализации структурной минимизации исполнительного двигателя состоит в совмещении нескольких, как минимум двух, функций в одном структурном элементе. В приведенном на рис. 1 двигателе-маховике такое совмещение функций выполняет вращающийся магнитопровод системы возбуждения ротора 3, который, будучи выполненным массивным, одновременно является и основным носителем кинетического момента. Второй структурный элемент, совмещающий в себе две функции, – вал двигателя 2, который несет на себе подшипники вращения ротора и одновременно является внутренним магнитопроводом магнитной системы.

Структурная минимизация системы управления может быть проведена за счет отказа от использования датчиков фазных статорных токов и построения датчика положения ротора на базе современных миниатюрных элементов Холла [10]. Применение миниатюрных датчиков Холла, встраиваемых непосредственно в активную зону двигателя, позволяет одновременно минимизировать габариты устройства, повысить технологичность его изготовления и обеспечить высокую надежность работы. При этом оказалось, что в приборных микродвигателях затраты энергии на обеспечение работы датчиков Холла могут быть соизмеримы и даже превышать затраты на создание вращающего момента. Так, при практической реализации маховичной системы ориентации мощность двигателя при максимальной частоте вращения и мощность, потребляемая тремя датчиками Холла при непрерывном их подключении к источнику питания, составили соответственно 68 и 80 мВт. Снижение энергозатрат на обеспечение работы датчиков Холла и увеличение КПД устройства в целом стало возможным благодаря использованию технического решения, суть которого состоит в управлении подключением датчиков Холла к источнику питания и к системе управления по специально созданному алгоритму, причем без потери информации о положении ротора [1]. В результате затраты энергии на работу датчиков Холла удалось снизить не менее, чем на один порядок.

Изложенные выше принципы построения приводного двигателя использованы при создании в ИЭД НАН Украины миниатюрной системы ориентации (рис. 2), предназначенной для использования в космических аппаратах нано-класса. Ее технические характеристики приведены в таблице наряду с характеристиками наиболее близких по параметрам маховичных систем ориентации: SX-WH-03 [4]; NRWA-T005 [6]; МДМ-05 [4]; ЭМИО [4].



Рис. 2

Имеются также данные о маховичных системах ориентации, созданных во ВНИИЭМ (РФ), однако наиболее миниатюрная из них имеет габариты $\varnothing 150 \times 95$ мм при массе 1,4 кг и предназначена для ориентации космических аппаратов другого класса.

Из таблицы следует, что созданный в ИЭД НАН Украины управляемый маховик, соответствуя уровню развития этого вида техники, наилучшим образом подходит для ориентации спутников нано-класса ввиду наименьших среди аналогов габаритов, массы и энергопотребления в номинальном режиме управления. Очевидным его достоинством является также малый шаг коррек-

ции скорости вращения, что обеспечивает плавность регулирования положения спутника. К преимуществам разработанной системы можно отнести и меньший уровень напряжения питания, что также важно для малогабаритных спутников с ограниченной площадью солнечных батарей.

Изложенные в статье принципы построения маховичной системы ориентации универсальны и могут быть применены для аналогичных устройств ориентации любой мощности и габаритов.

	1	2	3	4	5
Тип системы	SX-WH-03	NRWA-T005	МДМ-05	ЭМИО	
Предприятие - разработчик	Компания «СПУТНИКС», РФ	Компания «New Space Systems», ЮАР	АО «Полюс», РФ	АО «Информационные спутниковые системы», РФ	ИЭД НАН Украины
Максимальный момент вращения (Нм)	0,026	0,01	0,015	0,013	0,018
Энергопотребление при максимальном моменте, ВА	23,0	11,2	15	Нет данных	11,2
Энергопотребление в установленном режиме, ВА	2,3	Нет данных	2,0	0,64	0,16
Минимальный шаг коррекции скорости маховика (об/мин)	Нет данных	1,0	Нет данных	Нет данных	0,2
Габаритные размеры (мм) электромеханической части электронного блока	84x86x71	75x75x75 100x100x75	Нет данных	$\varnothing 70 \times 42$ с блоком управления	$\varnothing 58 \times 42$ с блоком управления
Масса устройства (г)	0,3	1,2	1,2	0,32	0,2

Выводы. Определены принципы построения маховичной системы ориентации микроспутника, позволяющие оптимизировать структуру, минимизировать массогабаритные характеристики и энергопотребление устройства при обеспечении плавности регулирования в широком диапазоне частот вращения маховика. Эти принципы формулируются следующим образом: - построение двигателя по магнитоэлектрической схеме; - беспазовая компоновка статора двигателя; - использование неявнополюсного ротора; - структурная минимизация двигателя и системы управления.

На основании этих принципов создана система, которая по сравнению с аналогами обладает меньшими габаритами, массой и существенно меньшим энергопотреблением, что позволяет применять ее на космических аппаратах объемом от одного до нескольких кубических дециметров.

1. Акинін К.П., Антонов О.Є., Кіреєв В.Г. Спосіб підключення дискретних датчиків Холла до системи керування безконтактним двигуном з постійними магнітами. Заявка на патент України а201608818. від 15.08.16 р.

2. Антонов А.Е., Петухов И.С. Потери на вихревые токи в обмотке беспазовой электрической машины // Техн. электродинамика. – 2010. – № 4. – С. 38–42.

3. Антонов О.Є., Кіреєв В.Г. Стомагологічна бормашина. Патент України № 53776.

4. Баландина Т.Н., Баландин Е.А. Электромеханический исполнительный орган на базе бесконтактного электродвигателя постоянного тока с печатной обмоткой на дисковом статоре для малого космического аппарата // Вестник СибГАУ. – 2015. – Т. 16. – № 1. – С. 166–171.

5. Ледовский А.Н. Электрические машины с высококоэрцитивными постоянными магнитами. – М.: Энергоатомиздат, 1985. – 169 с.

6. Маховик NRWA-T005 для системы ориентации микроспутника. Ресурс доступа: <http://www.satserv.co.uk>.

7. О работах в ИПМ им. М.В. Келдыша РАН по анализу динамики, разработке и реализации систем ориентации малогабаритных спутников. Ресурс доступа: http://keldysh.ru/papers/2006/source/prep2006_05.doc.

8. Павлов В.А. Основы проектирования и расчета гироскопических приборов. – Л.: Судостроение, 1967. – С. 146–150.
9. Путников В.В., Путников А.В., Уваров В.Б. Бесконтактные электродвигатели постоянного тока с повышенной наработкой для космических аппаратов // Электротехника. – 2007. – № 2. – С. 18–23.
10. Сысоева С. Датчики магнитного поля // Компоненты и технологии. – 2012. – № 1. – С. 19–32.
11. Управляющий двигатель-маховик МДМ-05. Ресурс доступа: <http://polus.tomsknet.ru>.
12. Bushenkov V.A., Ovchinnikov M.Yu., Smirnov G.V. Attitude Stabilization of a Satellite by Magnetic Coils // Acta Astronautica. – 2002. – Vol. 50. – Issue 12. – Pp. 721–728.
13. Robert C. O'Handley. Modern Magnetic Materials: Principles and Applications. – New York: John Wiley & Sons, 2000. – 768 p.

ОСОБЛИВОСТІ ПОБУДОВИ ЕЛЕКТРОМЕХАНІЧНОЇ СИСТЕМИ ОРІЄНТАЦІЇ НАНО-СУПУТНИКА НА ОСНОВІ БЕЗКОНТАКТНОГО МАГНІТОЕЛЕКТРИЧНОГО ДВИГУНА

О.С. Антонов, докт.техн.наук, Акинін К.П., канд.техн.наук, В.Г.Кіреєв, канд.техн.наук

Інститут електродинаміки НАН України,

пр. Перемоги, 56, Київ, 03057, Україна. E-mail: aoe@ied.org.ua

Розглянуто особливості побудови магнітоелектричного безпазового двигуна для маховичної системи просторової орієнтації наносупутника. Запропоновано принципи вибору параметрів двигуна, що дозволяють мінімізувати масогабаритні показники, енергоспоживання і поля розсіювання, що створюються магнітною системою збудження двигуна. Бібл. 13, рис. 2, табл. 1.

Ключові слова: наносупутник, орієнтація супутника, реактивний маховик, безконтактний електропривод.

CREATION FEATURES OF ELECTROMECHANICAL SYSTEM FOR NANOSATELLITE ORIENTATION ON THE BASIS OF BRUSHLESS MAGNETOELECTRIC MOTOR

A. Antonov, K. Akinin, V. Kireev

Institute of Electrodynamics National Academy of Sciences of Ukraine,

pr. Peremohy, 56, Kyiv, 03057, Ukraine. E-mail: aoe@ied.org.ua

Creation features of the magnetoelectric slotless motor for orientation of the nanosatellite systems are considered. The principles of the selection motor characteristics to minimize the weight and size, power consumption and stray field generated by the magnetic excitation of the engine system are considered. References 13, figures 2, table 1.

Keywords: nanosatellite, satellite orientation, reaction flywheel, brushless electric drive.

1. Akinin K., Antonov A., Kireev V. Connecting method of discrete Hall sensors to control system of brushless motor with permanent magnets. Patent Application of Ukraine a201608818. (Ukr)
2. Antonov A., Petukhov I. The eddy current loss in the winding of the slotless electrical machine // Tekhnichna Elektrodynamika. – 2010. – No 4. – Pp. 38–42. (Rus)
3. Antonov A., Kireev V. Dental Drill. Patent of Ukraine No 53776. (Ukr)
4. Balandina T.N., Balandin E.A. Electromechanical executive body on the basis of the DC brushless motor with a printed winding on the disk stator for small space vehicle // Vestnik Sibirskogo Gosudarstvennogo Aviatsionnogo Universiteta. – 2015. – Vol. 16. – No 1. – Pp. 166–171. (Rus)
5. Ledovsky A. Electrical machines with high-coercivity permanent magnets. – Moskva: Energoatomisdat, 1985. – 169 p. (Rus)
6. The flywheel NRWA-T005 for orientation system of the microsatellite. Available at: <http://satserv.co.uk> (accessed 11.01.2017)
7. About works in the Keldysh IPM of RAS for the analysis of dynamics, design and implementation of small satellite attitude control systems. Available at: http://keldysh.ru/papers/2006/source/prep2006_05.doc. (accessed 12.01.2017)
8. Pavlov V.A. The Basics of design and calculation of gyroscopic devices. – Leningrad: Sudostroenie, 1967. – Pp. 146–150. (Rus)
9. Putnikov V., Putnikov A., Uvarov V. Brushless DC motors with high operating time for space vehicles // Elektrotehnika. – 2007. – No 2. – Pp. 18–23. (Rus)
10. Sysoeva S. Magnetic field sensors // Komponenty i tekhnologii. – 2012. – No 1. – Pp. 19–32. (Rus)
11. Flywheel controller MDM-05. Available at: <http://polus.tomsknet.ru>. (accessed 12.01.2017) (Rus)
12. Bushenkov V.A., Ovchinnikov M.Yu., Smirnov G.V. Attitude Stabilization of a Satellite by Magnetic Coils // Acta Astronautica. – 2002. – Vol. 50. – No 12. – Pp. 721–728. (Rus)
13. Robert C. O'Handley. Modern Magnetic Materials: Principles and Applications. – New York: John Wiley & Sons, 2000. – 768 p.

Надійшла 16.01.2017
Остаточний варіант 20.03.2017