

УДК 531.383 + 629.782.05

## **СИЛОВЫЕ ГИРОСТАБИЛИЗАТОРЫ (ГИРОДИНЫ) С БЕСКОНТАКТНЫМ СВЕРХПРОВОДЯЩИМ ПОДВЕСОМ МАХОВИКА ДЛЯ КОСМИЧЕСКИХ ЛЕТАТЕЛЬНЫХ АППАРАТОВ**

*Н.И. Смоленцев, А.Н. Лысов, А.М. Казанцев*

В работе рассмотрены вопросы, связанные с применением сверхпроводящего бесконтактного подвеса в электромеханических устройствах стабилизации космических аппаратов (КА). Рассмотрены известные устройства стабилизации на основе гиросtabilизаторов (гиродинов) и двигателей-маховиков (ДМ), в частности, шаровой двигатель-маховик (ШДМ) с активным электромагнитным подвесом ротора-маховика. Недостатком ШДМ является необходимость постоянного электропитания системы электромагнитного подвеса, что увеличивает энергопотребление. По результатам разработки сверхпроводящего электрокинетического накопителя энергии (СПЭНЭ-1) в рамках проведения НИР по Соглашению о предоставлении субсидии № 14.577.21.0069 от 05.06.2014 г. (RFMEFI57714X0069), заказчик – Министерство образования и науки Российской Федерации, предлагается применение пассивного сверхпроводящего подвеса ротора гиродинов и ДМ.

Ключевые слова: гиросtabilизатор (гиродин), высокотемпературная сверхпроводимость (ВТСП), сверхпроводящий бесконтактный подвес, космические аппараты.

Электромеханические устройства находят широкое применение в космических аппаратах и ракетах-носителях. За последние десятилетия освоения космического пространства в нашей стране и за рубежом созданы различные типы таких устройств, например, преобразователи машинные для питания аппаратуры управления ракет, преобразователи статические, коммутационная аппаратура, гистерезисные и синхронные машины для управления и электропривода, коллекторные микродвигатели постоянного тока, бесконтактные двигатели постоянного тока, одноосные двигатели-маховики, шаровые двигатели маховики, кольцевые двигатели-маховики, гиродины, автономные турбогенераторные источники питания ракетносителя и многое другое [1].

Особое внимание уделяется электромеханическим устройствам для стабилизации и ориентации космических аппаратов (КА), а также их бортовых систем (антенны, солнечные батареи и т.п.). Такие электромеханические устройства, например, двигатели-маховики, силовые гироскопы (гиродины) должны удовлетворять целому ряду особых требований, в частности, высокой точности, надёжности, малому энергопотреблению.

Задачу стабилизации КА и их бортовых систем решают с помощью гиростабилизаторов и двигателей-маховиков. По принципу стабилизации гиростабилизаторы делят на гироскопы непосредственного типа, гиростабилизаторы силового типа, гиростабилизаторы индикаторно-силового типа, гиростабилизаторы индикаторного типа [2, 3].

Основным элементом непосредственного гиростабилизатора (гиродина) является гироблок, содержащий гироскоп с датчиками моментов, углов и токоподводы. Схема гиродина приведена на рис. 1 [4]. Здесь  $OZ$  – ось стабилизации,  $OY$  – ось кинетического момента  $H$ , зависящего от скорости вращения ротора гироскопа  $\Omega$  и его осевого момента инерции  $J_0$ . При воздействии на КА возмущающего момента  $M_1$  оси  $OZ$ , гироскоп поворачивается с угловой скоростью прецессии  $\dot{\beta} = \frac{M_1}{H}$ , где  $\dot{\beta}$  угловая скорость прецессии. Возникающий гироскопический момент  $M_{\Gamma} = H \cdot \dot{\beta}$  по величине равен внешнему моменту:

$$M_{\Gamma} = H \cdot \dot{\beta} = H \cdot \frac{M_1}{H} = M_1. \quad (1)$$

Суммарное действие моментов на КА равно  $\Delta M = M_1 - M_{\Gamma} = 0$ , т.е. происходит его силовая стабилизация.

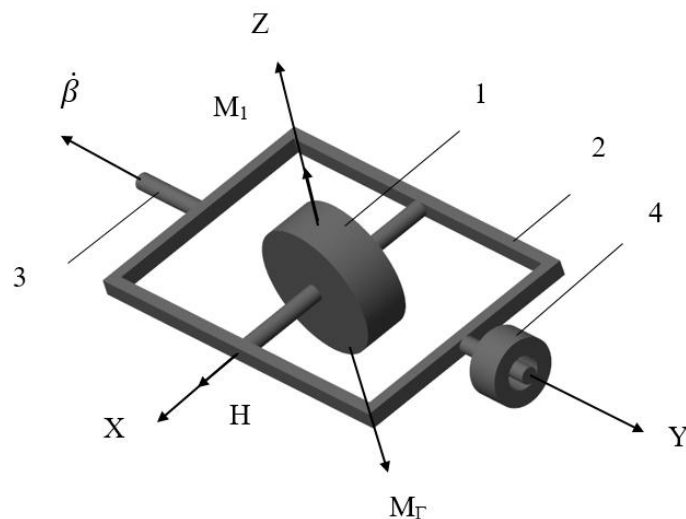


Рис. 1. Схема гиростабилизатора (гиродина)  
1 – ротор гироскопа, 2 – рамка, 3 – подшипники рамки,  
4 – датчик момента системы разворота КА

Таким образом, осуществляется стабилизация КА по одной из осей. Для стабилизации по остальным осям КА необходимы аналогичные устройства.

К гироскопам гиростабилизаторов КА предъявляется целый ряд специальных требований, в том числе:

- большой кинетический момент;

- высокая точность;
- низкое энергопотребление.

Для стабилизации малых космических аппаратов массой менее 500 кг применяют преимущественно двигатели-маховики. ДМ представляет собой электрический двигатель, на валу которого установлен массивный маховик. Управление ориентацией КА производят в соответствии уравнением [3, 4].

$$J_{\text{ка}} \cdot \frac{d\omega}{dt} = J_0 \cdot \frac{d\Omega}{dt}, \quad (2)$$

где  $J_{\text{ка}}$  – момент инерции КА,  $J_0$  – осевой момент инерции маховика,  $\Omega$  – угловая скорость вращения маховика,  $\omega$  – угловая скорость вращения КА. На рис. 2 приведена схема, поясняющая принцип стабилизации с помощью момента, развиваемого двигателем гиромаховика.

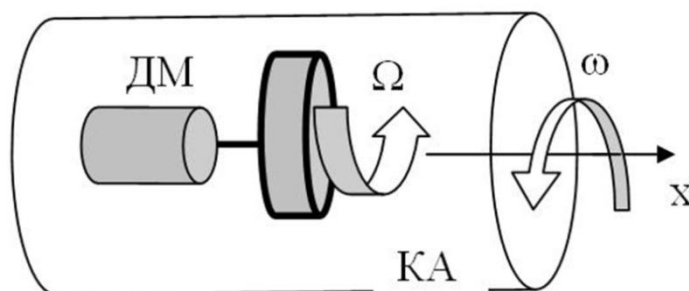


Рис. 2. Схема стабилизации КА с помощью двигателя-маховика:  
ДМ – двигатель-маховик, OX – ось стабилизации,  
КА – космический аппарат,  $\omega$  – угловая скорость вращения КА  
в результате возмущающих моментов,  $\Omega$  – скорость вращения маховика

Достоинством ДМ является простота конструкции, относительно небольшие габариты и масса. Недостатком является высокое энергопотребление и необходимость резервирования ДМ.

Для решения этих проблем применяют шаровой двигатель-маховик, в котором маховик выполнен в виде полого шара, удерживаемого внутри вакуумированного корпуса с помощью шести электромагнитов, управляемых индуктивными датчиками перемещения. Один ШДМ заменяет систему трёходноосных ДМ. Однако бесконтактный подвес полого шара-маховика реализуется с помощью шестиканальной системы управления, постоянно требующей электропитания, что увеличивает энергопотребление.

Для снижения энергопотребления в системах ориентации КА предлагается использовать высокотемпературный сверхпроводящий бесконтактный подвес в системах подвеса роторов гироскопов (гиродинов) и двигателей-маховиков.

На этом принципе разработан в рамках проведения НИР по Соглашению о предоставлении субсидии № 14.577.21.0069 от 05.06.2014 г. (RFMEFI57714X0069), заказчик – Министерство образования и науки Российской Федерации, сверхпроводящий электрокинетический накопитель энергии СПЭНЭ-1 [5].

На рис. 3 приведён внешний вид накопителя энергии СПЭНЭ-1, а на рис. 4, приведена схема, поясняющая его устройство [6].

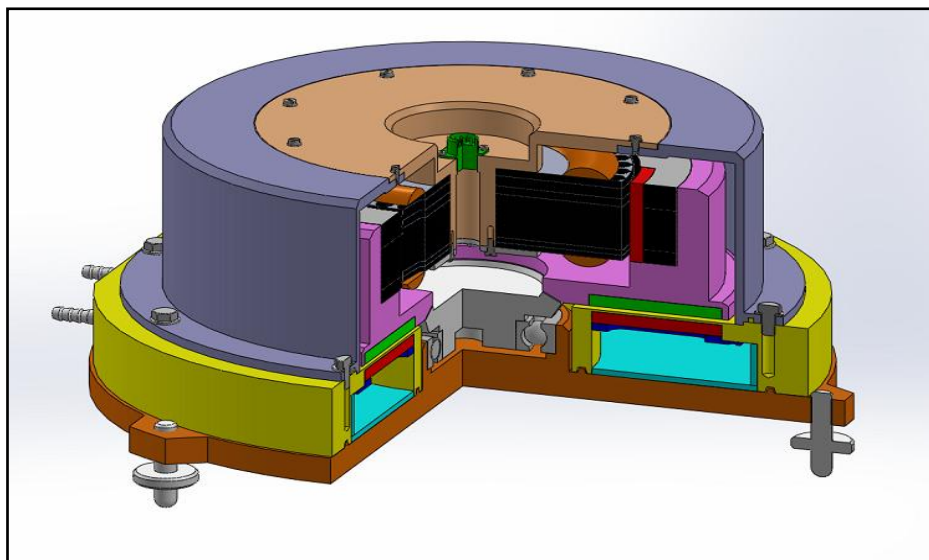


Рис. 3. Внешний вид накопителя энергии СПЭНЭ-1

Принцип работы накопительного устройства на ВТСП основан на эффекте выталкивания магнитного поля из объёма сверхпроводника, что эквивалентно диамагнитному «зеркальному» экрану. Это позволяет создать бесконтактный самоцентрирующийся подвес маховика – кинетического накопителя энергии.

В отличие от управляемого электромагнитного подвеса данный тип подвеса не содержит активных систем регулирования бесконтактного подвеса, в частности, следящих систем и регуляторов величины напряжённости магнитного поля, характеризуется большой подъёмной силой подвеса, саморегулированием в осевом направлении подвеса и направлении, перпендикулярном оси подвеса. Кроме того, сверхпроводящий бесконтактный подвес имеет хорошие демпфирующие свойства.

Накопитель энергии предназначен для работы в составе локальной электрической сети (ЛЭС), содержащей источники энергии, и служит для хранения и рекуперации электрической энергии. Накопитель энергии состоит из обращённой синхронной электрической машины 1 и криостата 6, заполненного жидким азотом.

Статор синхронной машины 2 содержит магнитопровод с трёхфазной обмоткой 3, ротор-маховик 4 с постоянными магнитами возбуждения 5 и

опорными постоянными магнитами 7. На сопряжённой поверхности криостата расположены сверхпроводящие пластины 8, охлаждаемые жидким азотом, заливаемым через штуцер 11.

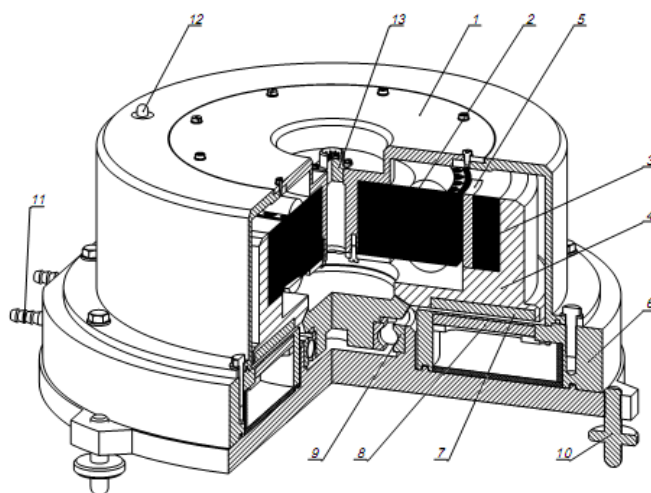


Рис. 4. Сверхпроводящий электрокинетический накопитель энергии (СПЭНЭ-1)  
1 – синхронная электрическая машина, 2 – статор, 3 – магнитопровод статора,  
4 – ротор-маховик, 5 – магниты возбуждения, 6 – криостат,  
7 – опорные магниты подвеса, 8 – сверхпроводящие пластины, 9 – подшипник,  
10 – опоры, 11 – штуцер системы охлаждения жидким азотом,  
12 – ниппель, 13 – разъем

В исходном положении ротор-маховик центрируется с помощью опорного подшипника 9. Внутренняя полость синхронного двигателя вакуумируется с помощью ниппеля 12. Герметичный разъем 13 соединяет трехфазную обмотку статора синхронной машины с блоком управления режимами работы. Для нивелирования накопителя энергии по горизонту служат регулируемые опоры 10.

Накопитель энергии работает следующим образом. При охлаждении сверхпроводящих пластин до температуры жидкого азота возникает эффект Мейснера, в результате которого осуществляется бесконтактный подвес ротора-маховика.

При подключении накопителя энергии к источнику трёхфазного питания начинается разгон ротора-маховика до номинальной частоты вращения, после чего накопитель энергии отключается от источника питания, а ротор-маховик вращается по инерции, сохраняя накопленную энергию. Бесконтактный подвес и вакуум обеспечивают длительное сохранение энергии. При переключении обмоток статора на нагрузку накопитель энергии работает в режиме генерации электрической энергии, обеспечивая ее питание.

Такая конструкция инерционного накопителя обеспечивает высокий коэффициент полезного действия, управляемость режимами работы, высо-

кие удельные значения энергоёмкости и мощности. Эти технические характеристики в сочетании с невысокой стоимостью смогут обеспечить его широкое применение в СТЭ. Некоторые расчётные технические характеристики накопителя энергии приведены в табл.

Таблица

Характеристики накопителя энергии СПЭНЭ-1

Запасённая энергия, МДж	7–10
Время накопления, мин	5–7
Время отдачи, мин	7–10
Коэффициент полезного действия, %	96–98
Удельная энергоёмкость, МДж/кг	$10^2$ – $10^3$

В основу конструкции устройства для ориентации КА предполагается положить систему подвеса ротора-маховика СПЭНЭ-1, дополнительно снабдить устройство системой управления вращением маховика по осям стабилизации, а также установить датчики углов и моментов. Отсутствие жёсткой связи между маховиком и статором устройства обеспечит высокую точность стабилизации КА, пассивная система сверхпроводящего бесконтактного подвеса ротора-маховика позволит снизить энергопотребление на КА.

#### Библиографический список

1. Электромеханические устройства космических аппаратов и ракет-носителей / В.Я. Авербух, Д.М. Вейнберг, В.П. Верещагин и др. // Электрооборудование для космических аппаратов и ракет. – 2001. – Т. 100. – С. 89–96.
2. Лысов, А.Н. Теория гироскопических стабилизаторов. Учебное пособие / А.Н. Лысов, А.А. Лысова. – Челябинск. Издательский центр ЮУрГУ. – 2009. – 117 с.
3. Поляков, М.В. Двигатель-маховик на базе механической системы «электродвигатель-редуктор-маховик» для управления ориентацией малого космического аппарата / М.В. Поляков, А.В. Полякова // Национальный исследовательский Томский политехнический университет. – URL: <https://www.scienceforum.ru/2014/pdf/1910.pdf>.
4. Васильев, В.Н. Космические аппараты дистанционного зондирования Земли / В.Н. Васильев. – М.: ФГУП «НПП ВНИИЭМ», 2009. – 310 с.
5. Пат. 2601590 Российская Федерация, МПК7 H02K 7/02, H02K 7/09. Электромеханический сверхпроводящий накопитель энергии / Н.И. Смоленцев. – № 2015115350/07; Заявл. 23.04.2015; опубл. 10.11.2016. Бюл. № 31. – 10 с.
6. Смоленцев, Н.И. Разработка накопителя энергии на основе высокотемпературной сверхпроводимости и перспективы его применения в локальных электрических сетях / Н.И. Смоленцев, Л.М. Четошникова, Ю.Л. Бондарев // Ползуновский вестник. – 2015. – № 1. – С. 73–77.

[К содержанию](#)