

**ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЬ-МАХОВИК С МАГНИТОГИДРАВЛИЧЕСКИМИ  
ОПОРАМИ ВРАЩЕНИЯ**

Д. В. Ермаков

АО «Научно-производственный центр «Полус»  
Российская Федерация, 634050, г. Томск, просп. Кирова, 56в  
E-mail: POLUS@ONLINE.TOMSK.NET

*Для уменьшения возмущающих механических моментов со стороны опоры вращения и увеличения ресурса работы электродвигателей-маховиков, входящих в систему ориентации и стабилизации космических аппаратов, предлагается применять магнитогидравлические опоры вместо шарикоподшипниковых узлов для вращения маховика. К основному элементу магнитогидравлической опоры относится магнитная жидкость, представляющая собой коллоидный раствор однодоменных магнитных частиц, покрытых тонким слоем защитной оболочки поверхностно-активных веществ, что предотвращает слипание частиц в жидкой основе, обладающая высокой текучестью и намагниченностью насыщения. Если немагнитное тело находится в зазоре, заполненном магнитной жидкостью, между двумя областями с повышенным значением магнитного поля, то оно центрируется между ними. Результатом работы является создание электродвигателя-маховика, выполненного на магнитогидравлических опорах с аварийными шарикоподшипниками, который позволяет увеличить стабильность работы роторной системы при вращении, когда на нее действуют не только осевые, но и радиальные силы смещения от внешних механических воздействий на корпус электродвигателя-маховика, и обеспечить необходимое положение вектора кинетического момента. А использование сигнала с датчиков вращения аварийных шарикоподшипников, когда маховик отклоняется из центрального уравновешенного положения, позволяет исключать ложные переключения комплектов электромагнитов при кратковременных ударных воздействиях на корпус электродвигателя-маховика.*

*Ключевые слова: магнитогидравлическая опора, аварийный шарикоподшипник, электродвигатель-маховик, магнитная жидкость, намагниченность насыщения, напряженность магнитного поля, магнитная частица, защитная оболочка, левитация.*

Vestnik SibGAU  
Vol. 16, No. 2, P. 400–403**REACTION WHEELS WITH MAGNETIC-HYDRAULIC BEARINGS**

D. V. Ermakov

SC “Scientific&Industrial Centre “Polyus”  
56v, Kirov Av., Tomsk, 634041, Russian Federation  
E-mail: POLUS@ONLINE.TOMSK.NET

*To reduce the disturbing mechanical moments, generated by bearing side of rotating and increase the service life of reaction flywheel included in the system of orientation and stabilization system of the spacecraft, it is proposed to apply magnetohydraulic bearing instead of ball bearing assemblies for rotating flywheel. Magnetic fluid is the main element of magnetohydraulic bearing represented a colloidal solution of single-domain magnetic particles coated with thin layer of protective cover by surfaces actives substances that stave off conglutination of the particles in a liquid base, it has high flowability and saturation of magnetization. If the nonmagnetic object is in the gap filled with a magnetic fluid between the two areas with a higher magnetic field, it is centered between them. As a result, reaction wheels were designed by magnetic-hydraulic bearing with emergency bearing and it increases stability of working rotor’s system by rotation, while it experiences not only axled forces of displacement but also radial forces by outer mechanical disturbance on the frame. For the decrease of the mechanical disturbs moments from the bearing rotation and increase work’s resource of reaction flywheels entering in the system of orientation and stabilization of space apparatus, it is offered to apply magnetic-hydraulic bearings instead of ball-bearing unit to flywheel rotation.*

*Keywords: magnetic-hydraulic bearing, emergency bearing, reaction wheels, magnetic liquid, magnetization of saturation, intensity of the magnetic field, magnetic particle, protective cover, levitation.*

**Введение.** Одним из основных свойств электродвигателей-маховиков (ЭДМ), входящих в систему ориентации и стабилизации космических аппаратов, является стабильность положения вектора кинетического момента. Формирование этого вектора определяется положением оси вращения ротора-маховика, которое напрямую зависит от возникающих возмущений в опорах вращения [1; 2].

Источник возникновения возмущений – вибрации в шарикоподшипнике, обусловленные его кинематикой и зависящие от частоты вращения его кольца. Кроме того, такие вибрации связаны с технологией производства самого шарикоподшипника и зависят от точности изготовления его деталей, качества рабочих поверхностей, их формы, разноразмерности тел качения, зазоров и т. д. Уровни вибраций по этим причинам значительны [3; 4].

Для повышения жесткости подшипникового узла подшипники нагружают начальной осевой силой, создавая преднатяг (например, за счет установки упругих элементов под одно из колец). Однако это приводит к тому, что шарики, катясь по постоянной дорожке качения, быстро достигают в отдельных точках поверхности предельного числа циклов нагружения, а следовательно, и максимального износа. Если при этом присутствует овальность колец и шариков, то интенсивность износа значительно возрастает [5; 6].

**Описание конструкции опоры вращения.** Для уменьшения влияния возмущений со стороны опоры вращения на вектор кинетического момента и стабилизации его положения предлагается использовать вместо шарикоподшипников магнитогидравлические опоры (рис. 1).

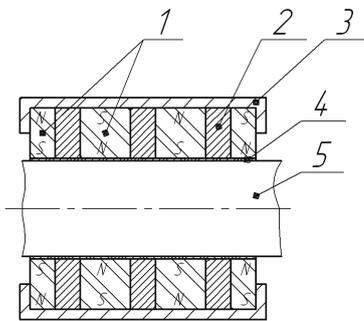


Рис. 1. Конструкция магнитогидравлической опоры

Опора состоит из кольцевых постоянных магнитов 1, намагниченных в радиальном направлении, расположенных друг к другу разноименными полюсами, закрепленных через немагнитные вставки 2 в магнитопроводящем корпусе 3. Немагнитный вал 5 центрируется внутри опоры магнитной жидкостью 4, которая удерживается магнитным полем в зазоре между магнитами 1 и валом 5. Потoki от внешних поверхностей магнитов 1 замыкаются через магнитопроводящий корпус 3.

**Описание магнитной жидкости.** Магнитная жидкость (МЖ) представляет собой коллоидный раствор однодоменных магнитных частиц в жидкой основе, обладает высокой текучестью и намагниченностью

насыщения (до 100 кА/м). Каждая магнитная частица покрыта тонким слоем защитной оболочки поверхностно-активных веществ (ПАВ), что предотвращает слипание частиц, а тепловое движение разбрасывает их по всему объему жидкости. Поэтому, в отличие от обычных суспензий, частицы в магнитной жидкости не оседают на дно, и она может сохранять свои рабочие характеристики в течение многих лет (рис. 2) [7; 8].

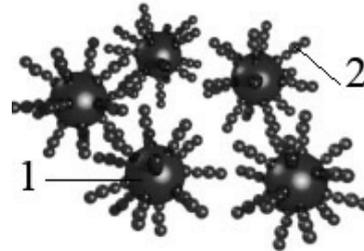


Рис. 2. Схема строения магнитной жидкости:  
1 – магнитная частица; 2 – защитная оболочка с ПАВ

В магнитогидравлической опоре используется свойство данной жидкости перемещаться в область с наибольшей напряженностью под действием неоднородного магнитного поля, создаваемого постоянными магнитами. Явление, вытекающее из этого свойства, – левитация немагнитных тел в самой МЖ, которая концентрируется в области большего магнитного поля и выталкивает немагнитное тело. Если немагнитное тело находится в зазоре, заполненном МЖ, между двумя областями с повышенным значением магнитного поля, то оно центрируется между ними.

В общем случае предельную нагрузку на магнитогидравлическую опору, при которой немагнитный вал будет находиться во взвешенном состоянии, можно оценить по формуле [9; 10]

$$F_n = \mu_0 M_s H_m S,$$

где  $F_n$  – несущая сила;  $M_s$  – намагниченность насыщения магнитной жидкости;  $H_m$  – значение напряженности магнитного поля на поверхности немагнитного вала;  $S$  – площадь опоры в плоскости, перпендикулярной выталкивающей силе.

**Описание конструкций ЭДМ.** На рис. 3 изображено сечение электродвигателя-маховика с магнитогидравлическими опорами. Электродвигатель-маховик содержит роторную систему А, которая состоит из магнитогидравлических опор 6, расположенных симметрично от маховика 1 с закрепленными на нем деталями электродвигателя 5. Магнитогидравлическая опора 6 содержит кольцевые магниты 3, поочередно установленные с немагнитными кольцами 2 в корпусах немагнитных втулок 4, охватывающих вал маховика 8 и магнитной жидкости 7, заполняющей зазор между кольцевыми магнитами 3 и валом маховика 8.

Недостатком такого ЭДМ является отсутствие регулирования положения вала маховика вдоль оси вращения, что позволяет ему смещаться от установленного положения при воздействии на корпус ЭДМ внешних ударных нагрузок. В результате смещения

появившееся биение контактирующих поверхностей приведет к неуравновешенности роторной системы, а возникшие вибрации создадут динамическую нагрузку, что вызовет дополнительный дисбаланс всей системы вращения вала маховика.

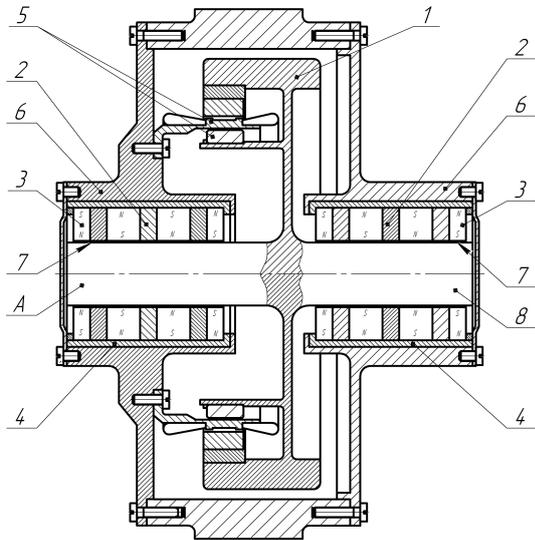


Рис. 3. ЭДМ с магнитогидравлическими опорами

Регулировка вала маховика вдоль оси вращения с помощью комплектов электромагнитов, расположенных на торцах магнитогидравлических опор, обеспечит необходимое уравновешенное состояние вала маховика в корпусе ЭДМ при внешних воздействиях на него (рис. 4) [11].

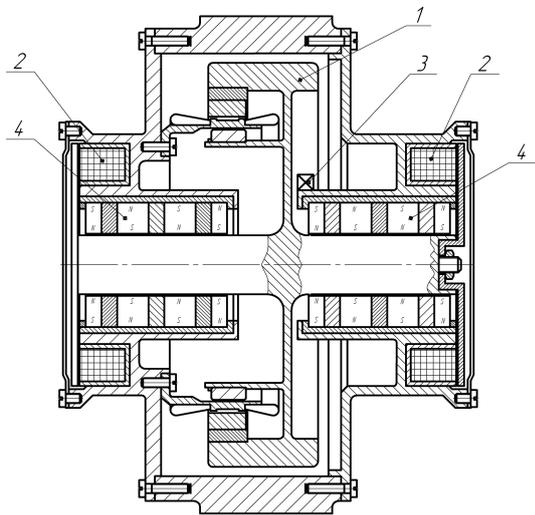


Рис. 4. ЭДМ с электромагнитным регулированием

Предлагаемое техническое решение позволяет повысить стабильность работы роторной системы, жесткость конструкции за счет удержания от смещения в осевом направлении вала маховика, что дает стабильность характеристик роторной системы при вращении, когда на нее действуют осевые силы смещения.

Регулирование вала маховика происходит следующим образом. При подаче питания на электродвигатель начинается вращение роторной системы, соз-

давая кинетический момент, пропорциональный частоте вращения. При смещении вала маховика 1 от установленного положения в осевом направлении сигнал с датчика положения вала 3 поступает в схему управления электромагнитами 2, которые возвращают вращающийся вал в магнитогидравлических опорах 4 в исходное положение.

Однако необходимо повышение надежности работы вала маховика, когда на него действуют не только осевые силы смещения, но и радиальные.

Указанная цель достигается тем, что в ЭДМ с магнитогидравлическими опорами, электромагнитами, датчиками положения маховика встроены аварийные шарикоподшипники и дополнительно введены датчики их вращения (рис. 5) [12].

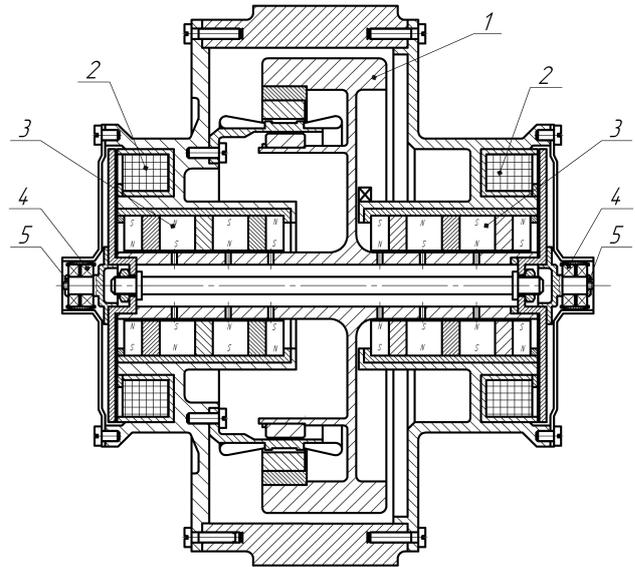


Рис. 5. ЭДМ с аварийными шарикоподшипниками

Регулирование вала маховика в данном случае осуществляется следующим образом. При радиальном смещении вала маховика 1, когда на корпус воздействуют ударные нагрузки, его вращение компенсируется аварийными шарикоподшипниками 4. Датчики вращения 5 выдают сигнал, поступающий в схему управления электромагнитами 2, которые возвращают вал маховика 1, вращающийся в магнитогидравлических опорах 3, в исходное уравновешенное состояние.

**Заключение.** Создание ЭДМ, выполненного на магнитогидравлических опорах с аварийными шарикоподшипниками, позволяет повысить стабильность работы роторной системы, когда на нее действуют осевые и радиальные силы смещения, при механических ударах на корпус ЭДМ.

Преимущество использования сигнала с датчиков аварийных шарикоподшипников при отклонении маховика из центрального положения вплоть до касания об эти шарикоподшипники – возможность исключения ложных переключений комплектов электромагнитов благодаря косвенным сигналам с датчиков положения маховика при кратковременных ударных воздействиях на корпус ЭДМ [13–15].

В то же время магнитная жидкость служит смазывающим, демпфирующим звеном, что снижает момент трогания, уменьшает трение в опоре вращения и увеличивает ресурс работы.

### Библиографические ссылки

1. Меркин Д. Р. Гироскопические системы. М. : Физматгиз, Наука, 1974. 344 с.
2. Ишлинский А. Ю. Механика гироскопических систем. М. : АН СССР, 1963. 484 с.
3. Самсаев Ю. А. Вибрации приборов с опорами качения. М. : Машиностроение, 1984. 128 с.
4. Первицкий Ю. Д. Расчет и конструирование точных механизмов. М. : Высш. шк., 1976, 456 с.
5. Тищенко О. Ф. Элементы приборных устройств. М. : Высш. шк., 1978. 384 с.
6. Проектирование механизмов и приборов / К. И. Заблонский [и др.]. Киев : Вища школа, 1971. 520 с.
7. Морозов Н. А., Казаков Ю. Б. Нанодисперсные магнитные жидкости в технике и технологиях. Иваново : Изд-во Иванов. гос. энергет. ун-та им. В. И. Ленина, 2011. 264 с.
8. Орлов Д. В., Михалев Ю. О. Магнитные жидкости в машиностроении. М. : Машиностроение, 1993. 272 с.
9. Докучаев Л. В., Рабинович Б. И., Гришин А. В. О стабилизации вращающихся космических аппаратов с деформируемыми элементами на основе использования магнитогидродинамических эффектов // Полет. 2000. № 7. С. 21–27.
10. Рабинович Б. И., Гришин А. В. О новом принципе использования магнитогидродинамических эффектов для ориентации и стабилизации вращающихся космических аппаратов. Математическая модель КА с МГД-элементом // Полет. 2004. № 8. С. 34–37.
11. Пат. 2013118932 Российская Федерация. Электродвигатель-маховик / Алексанов П. А., Бобриков А. Н., Ермаков Д. В., Лянзбург В. П. ; заявитель и патентообладатель ОАО «НПЦ «Полнос». Оpubл. 20.11.2013.
12. Пат. 2014114248 Российская Федерация. Электродвигатель-маховик / Алексанов П. А., Бобриков А. Н., Ермаков Д. В., Лянзбург В. П. ; заявитель и патентообладатель ОАО «НПЦ «Полнос». Оpubл. 10.04.2014.
13. Клишев О. П., Мытарев А. И., Рабинович Б. И. Применение магнитогидравлических элементов для разворота космического аппарата в инерциальном пространстве // Космонавтика и ракетостроение. 2011. № 1 (62). С. 111–120.
14. Клишев О. П., Мытарев А. И., Рабинович Б. И. Исследование динамики процесса разворота в инерциальном пространстве космического аппарата, оснащенного магнитогидродинамическим исполнительным органом // Космонавтика и ракетостроение. 2012. № 1 (66). С. 113–124.
15. Клишев О. П., Мытарев А. И., Рабинович Б. И. О стабилизации объектов с жидким наполнением на основе использования магнитогидродинамических эффектов // Полет. 2000. № 2. С. 40–44.

### References

1. Merkin D. R. *Giroskopicheskie sistemy* [Gyroscopic systems]. Moscow, Phizmatgiz, Nauka Publ., 1974, 344 p.
2. Ishlinskiy A. Yu. *Mekhanika giroskopicheskikh sytem* [Mechanics of gyroscopic systems]. Moscow, AN SSSR Publ., 1963, 484 p.
3. Samsaev Yu. A. *Vibratsii priborov s oporami kacheniya*. [Vibrations of devices with rolling-contact bearings]. Moscow, Mashinostroenie Publ., 1984, 128 p.
4. Pervitskiy Yu. D. *Raschet i konstruirovaniye tochnyykh mekhanizmov*. [Calculation and design exact machinery]. Moscow, Vysshaya shkola Publ., 1976, 456 p.
5. Tishchenko O. F. *Elementy pribornykh ustroystv*. [Elements of instrument devices]. Moscow, Vysshaya shkola Publ., 1978, 384 p.
6. Zablonkiy K. I., Filipovich S. I., Tsetsorin N. A. et al. *Proektirovaniye mekhanizmov i priborov* [Design of machinery and devices], Kiev, Vysshaya shkola Publ., 1971, 520 p.
7. Morozov N. A., Kazakov Yu. B. *Nanodispersnyye magnitnyye zhidkosti v tekhnike i tekhnologiyakh*. [Nanodispersions magnetic liquid in techniques and technology]. Ivanovo, Ivanovskiy gos. energet. un-t imeni V. I. Lenina Publ., 2011, 264 p.
8. Orlov D. V., Mikhalev Yu. O. *Magnitnyye zhidkosti v mashinostroyenii*. [Magnetic liquid in mechanical engineering]. Moscow, Mashinostroenie Publ., 1993, 272 p.
9. Dokuchaev L. V., Rabinovich B. I., Grishin A. V. [About stabilization rotating space crafts with deformed element the base on magnetohydraulic effects]. *Polet*, 2000, No. 7, P. 21–27 (In Russ.).
10. Rabinovich B. I., Grishin A. V. [About a new principle of used magnetohydraulic effects for orientation and stabilization rotating space crafts]. *Polet*, 2004, No. 8, P. 34–37 (In Russ.).
11. Aleksanov P. A., Bobrikov A. N., Ermakov D. V., Lyanzburg V. P. *Elektrodivigatel'-makhovik* [Reaction wheel]. Patent RF, No. 2013118932, 2013.
12. Aleksanov P. A., Bobrikov A. N., Ermakov D. V., Lyanzburg V. P. *Elektrodivigatel'-makhovik* [Reaction wheel]. Patent RF, No. 2014114248, 2014.
13. Klishev O. P., Mytarev A. I., Rabinovich B. I. [Application of magnetohydraulic element for turn of space crafts in inert spaces]. *Kosmonavtika i raketostroyeniye*, 2011, No. 1 (62), P. 111–120 (In Russ.).
14. Klishev O. P., Mytarev A. I., Rabinovich B. I. [Research the dynamics process of the turn of space craft with magnetohydraulic executive powers in inert spaces]. *Kosmonavtika i raketostroyeniye*, 2012, No. 1 (66), P. 113–124 (In Russ.).
15. Klishev O. P., Mytarev A. I., Rabinovich B. I. [About stabilization of the objects with liquid filling the base on magnetohydraulic effects]. *Polet*, 2000, No. 2, P. 40–44 (In Russ.).