

Федеральное государственное автономное
образовательное учреждение
высшего образования
«СИБИРСКИЙ ФЕДЕРАЛЬНЫЙ УНИВЕРСИТЕТ»

Институт космических и информационных технологий
институт
Межинститутская базовая кафедра
«Прикладная физика и космические технологии»
кафедра

УТВЕРЖДАЮ
Заведующий кафедрой
_____ В.Е. Косенко
подпись инициалы, фамилия
« _____ » _____ 2018г.

МАГИСТЕРСКАЯ ДИССЕРТАЦИЯ

«РАЗРАБОТКА МАТЕМАТИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ ОПОРЫ
ЭЛЕКТРОМЕХАНИЧЕСКОГО ИСПОЛНИТЕЛЬНОГО ОРГАНА
СИСТЕМЫ ОРИЕНТАЦИИ КОСМИЧЕСКОГО АППАРАТА НА БАЗЕ
ПОСТОЯННЫХ МАГНИТОВ»

Тема

27.04.03 «Системный анализ и управление»

код и наименование направления

27.04.03.06 «Основы проектирования космических аппаратов»

код и наименование магистерской программы

Научный руководитель	_____	профессор кафедры д-р техн. наук	В.И. Кудымов
	подпись, дата	должность, ученая степень	инициалы, фамилия
Выпускник	_____		С.В. Холодилов
	подпись, дата		инициалы, фамилия
Рецензент	_____	инженер-конструктор 3 кат. АО «ИСС», канд. техн. наук	В.Р. Боев
	подпись, дата	должность, ученая степень	инициалы, фамилия
Нормоконтролер	_____		Е.С. Сидорова
	подпись, дата		инициалы, фамилия

Федеральное государственное автономное
образовательное учреждение
высшего образования
«СИБИРСКИЙ ФЕДЕРАЛЬНЫЙ УНИВЕРСИТЕТ»

Институт космических и информационных технологий
институт
Межинститутская базовая кафедра
«Прикладная физика и космические технологии»
кафедра

УТВЕРЖДАЮ
Заведующий кафедрой
_____ В. Е. Косенко
подпись инициалы, фамилия
« _____ » _____ 2018 г.

**ЗАДАНИЕ
НА ВЫПУСКНУЮ КВАЛИФИКАЦИОННУЮ РАБОТУ
в форме магистерской диссертации**

Студенту Холодильову Сергею Валерьевичу

Группа КИ 16-03-6М Направление (специальность) 27.04.03.06
номер код

«Основы проектирования космических аппаратов»
наименование

Тема выпускной квалификационной работы: «Разработка математической модели опоры электромеханического исполнительного органа системы ориентации космического аппарата на базе постоянных магнитов»

утверждена приказом по университету _____

Руководитель ВКР В.И. Кудымов, профессор кафедры, д-р техн. наук, СФУ
инициалы, фамилия, должность, ученое звание и место работы

Цель диссертационной работы – обоснование конструкторских решений при проектировании магнитных опор на силах отталкивания за счет разработки математической модели.

Исходные данные для ВКР: исходные данные и основные требования состоят в том, имеется необходимость обосновать имеющееся конструкторское решение магнитной опоры на постоянных магнитах.

Перечень разделов ВКР:

- 1) анализ существующих опор электромеханических исполнительных органов системы ориентации космического аппарата. Постановка задачи;
- 2) разработка математической модели магнитной опоры электромеханического исполнительного органа системы ориентации космического аппарата;
- 3) экспериментальное подтверждение математической модели магнитной опоры.

Перечень графического материала: перечень графического и иллюстративного материала состоит в табличном и графическом представлении результатом исследования.

Руководитель ВКР _____ / В.И. Кудымов
подпись инициалы и фамилия

Задание принял к исполнению _____ / С. В. Холодильов
подпись инициалы и фамилия студента

«29» января 2018 г.

РЕФЕРАТ

Выпускная квалификационная работа по теме «Разработка математической модели опоры электромеханического исполнительного органа системы ориентации космического аппарата на базе постоянных магнитов» содержит 59 страниц текстового документа, 17 иллюстраций, 4 таблицы, 55 формул, 52 использованных источников.

ЭЛЕКТРОМЕХАНИЧЕСКИЙ ИСПОЛНИТЕЛЬНЫЙ ОРГАН, СИСТЕМА ОРИЕНТАЦИИ И СТАБИЛИЗАЦИИ, МАГНИТНАЯ ОПОРА, МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ, ВЫЧИСЛИТЕЛЬНЫЙ ЭКСПЕРИМЕНТ.

Цель работы: обоснование конструкторских решений при проектировании магнитных опор на силах отталкивания за счет разработки математической модели.

Задачи:

- 1) анализ предметной области, анализ существующих опор ЭМИО;
- 2) создание математической модели опоры на базе постоянных магнитов на силах отталкивания;
- 3) вычислительный эксперимент по математической модели

Объект исследования: опора электромеханического исполнительного органа космического аппарата на постоянных магнитах.

Предмет исследования: подъемная способность опоры на постоянных магнитах.

Научная новизна диссертационной работы заключается в создании математической модели опоры на базе постоянных магнитов на силах отталкивания, включающую в себя модель подъемной силы опоры.

Допущения и ограничения: При создании математической модели не учитываются возмущения в опоре, вызванные движением КА в пространстве, а также влиянием двигателей ориентации и коррекции и не учитываются внешние электромагнитные воздействия.

Практическая значимость: построенная математическая модель позволит конструкторам электромеханических исполнительных органов с магнитной опорой выбрать наиболее подходящее решение.

СОДЕРЖАНИЕ

Введение.....	7
1 Анализ существующих опор электромеханических исполнительных органов системы ориентации космического аппарата. Постановка задачи.....	10
1.1 Общие сведения об электромеханических исполнительных органах системы ориентации космического аппарата.....	10
1.2 Обзор существующих опор электромеханических исполнительных органов системы ориентации космического аппарата.....	16
1.3 Обзор существующих решений и математических моделей для магнитных опор электромеханических исполнительных органов системы ориентации космического аппарата.....	22
1.4 Постановка задачи	37
1.5 Выводы к главе 1	38
2 Разработка математической модели магнитной опоры электромеханического исполнительного органа системы ориентации космического аппарата	40
2.1 Формирование факторного пространства для математического моделирования	40
2.2 Математическое моделирование опоры на постоянных магнитах.....	41
2.3 Методика оценки работоспособности опоры.....	50
2.4 Выводы к главе 2.....	51
3 Экспериментальное подтверждение математической модели магнитной опоры.....	53
3.1 Описание магнитной опоры на постоянных магнитах.....	53
3.2 Вычислительный эксперимент и анализ результатов.....	56
3.3 Выводы к главе 3.....	57
Заключение.....	58
Список сокращений.....	59
Список использованных источников.....	60

ВВЕДЕНИЕ

Система ориентации и стабилизации (СОС) современных космических аппаратов (КА) является сложной системой, в которую входят чувствительные элементы, определяющие с высокой точностью положение КА в пространстве, исполнительные органы, изменяющие пространственное положение КА, и система управления, которая обеспечивает обработку поступающей от чувствительных элементов информации и выдачу управляющих сигналов на исполнительные органы (ИО). В качестве исполнительных органов КА, применяются малогабаритные реактивные двигатели, электромеханические исполнительные органы, к которым относятся двигатели-маховики и силовые гироскопические устройства, и моментный магнитопровод.

В настоящее время в системах ориентации и стабилизации (СОС) КА широкое применение нашли электромеханические исполнительные органы (ЭМИО). Преимуществами данного типа исполнительных органов КА являются: отсутствие расхода рабочего тела, используемого при ориентации КА посредством реактивных двигателей, и более высокая точность ориентации КА по сравнению с ориентацией посредством моментного магнитопровода. Наиболее характерным ЭМИО является исполнительный орган, выполненный на основе вращающегося осесимметричного тела (ротора). Подобные исполнительные органы называют двигателями-маховиками, силовыми гироскопами, гироскопическими стабилизаторами КА или гиросиловыми стабилизаторами [1-3].

Актуальность работы. В настоящее время в космической отрасли наблюдаются четко выраженная тенденция роста срока активного существования космических аппаратов. Срок активного существования (САС) космического аппарата может быть увеличен за счет увеличения эксплуатационных характеристик комплектующих изделий и узлов космического аппарата, в том числе и электромеханического исполнительного органа. Основными эксплуатационными характеристиками

электромеханического исполнительного органа является его надежность и долговечность, которые характеризуются общей величиной, называемой вероятностью безотказной работы. Вероятность безотказной работы – это вероятностная величина, определяемая на конец срока функционирования электромеханического исполнительного органа системы ориентации. Другой важной эксплуатационной характеристикой электромеханического исполнительного органа является срок его функционирования. Задача увеличения срока функционирования является важнейшей задачей для разработчиков космической техники.

Срок функционирования электромеханического исполнительного органа может быть увеличен за счет резервирования наиболее критичных узлов или за счет повышения надежности критичных узлов. Резервирование критичных узлов позволяет решить задачу повышения надежности электромеханического исполнительного органа космического аппарата, но существенно удорожает его стоимость и массу, что при выведении космического аппарата на околоземную орбиту ведет к увеличению стоимости выведения [3-7].

Из вышеизложенного следует, что более перспективным является путь повышения надежности основных наиболее критичных узлов ЭМИО.

В электромеханическом исполнительном органе наиболее критичным узлом является опора. Опора ЭМИО преимущественно выполняется на шарикоподшипниках, встречаются экспериментальные газовые и магнитные опоры. Наиболее перспективной из указанных опор является опора на постоянных магнитах, которая отличается относительной простотой, высокой несущей способностью и отсутствием энергопотребления.

Цель работы: обоснование конструкторских решений при проектировании магнитных опор на силах отталкивания за счет разработки математической модели.

Задачи:

- 1) Анализ предметной области, анализ существующих опор ЭМИО

2) Создание математической модели опоры на базе постоянных магнитов на силах отталкивания;

3) Вычислительный эксперимент по математической модели

Объект исследования: опора электромеханического исполнительного органа космического аппарата на постоянных магнитах.

Предмет исследования: подъемная способность опоры на постоянных магнитах.

Научная новизна диссертационной работы заключается в создании математической модели опоры на базе постоянных магнитов на силах отталкивания, включающую в себя модель подъемной силы опоры.

Объем работы:

Во введении рассмотрена актуальность данной магистерской диссертации.

В первой главе магистерской диссертации приведены общие сведения об электромеханических исполнительных органах системы ориентации, их основные характеристики рассмотрена классификация их опор, проведен анализ существующих аналогов и математических моделей магнитных опор.

Во второй главе диссертации разработана математическая модель магнитной опоры на силах отталкивания постоянных магнитов в части подъемной силы магнитной опоры.

В третьей главе приведен вычислительный эксперимент по проверке математической модели.

В заключении даны общие выводы по магистерской диссертации.

1 Анализ существующих опор электромеханических исполнительных органов системы ориентации космического аппарата. Постановка задачи

1.1 Общие сведения об электромеханических исполнительных органах системы ориентации космического аппарата

Электромеханический исполнительный орган представляет собой комплекс устройств, предназначенный для обеспечения ориентации КА в пространстве без расхода рабочего тела. В состав ЭМИО, как правило, входит два основных функционально разделённых узла: один или несколько блоков механических, которые обеспечивают угловое перемещение КА относительно своих осей, и блок автоматики, предназначенный для формирования команд управления и передачи их в блоки механические, и принимающий информацию о состоянии блоков механических. Общий вид ЭМИО приведен на рисунках 1.1, 1.2 и 1.3 [8-11].

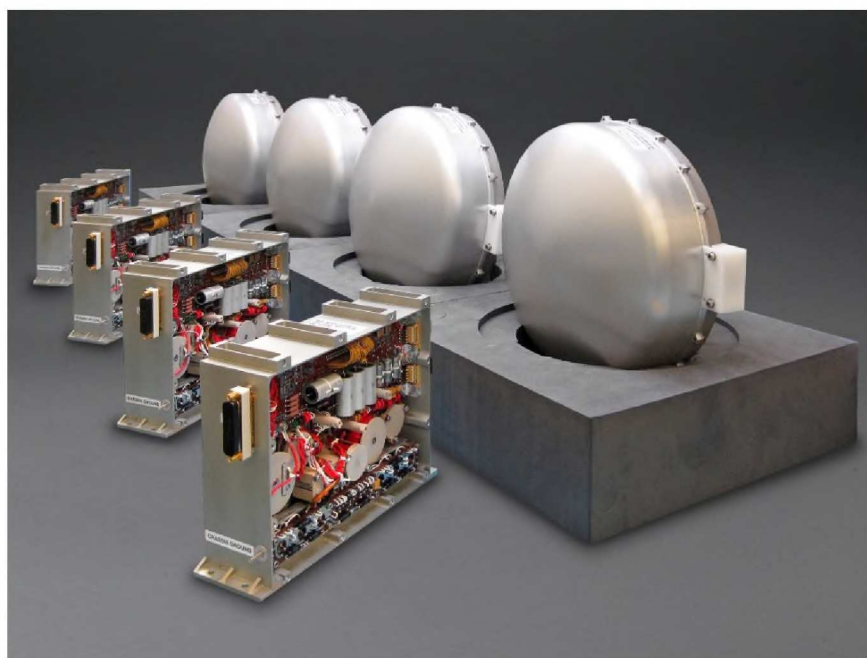


Рисунок 1.1 – Внешний вид исполнительного органа на базе двигателей-маховиков производства Bradford Engineering

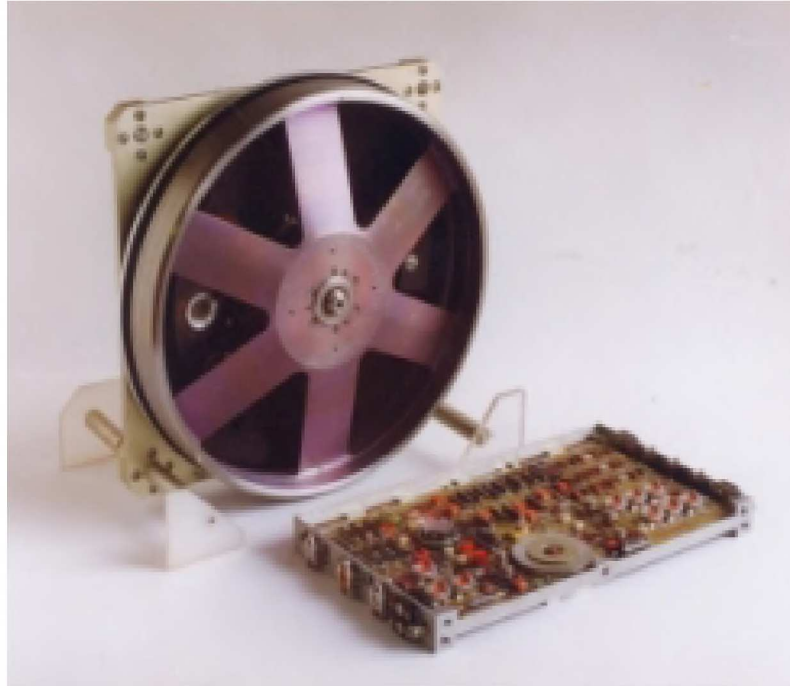


Рисунок 1.2 – Внешний вид двигателя-маховика производства АО НИИ КП



Рисунок 1.3 – Внешний вид двигателя-маховика производства Rockwell Collins

В Российской Федерации в настоящее время разработкой и изготовлением электромеханических исполнительных органов системы

ориентации занимаются два предприятия: АО «НПЦ «Полюс» (г. Томск) и АО НИИ КП (г. Санкт-Петербург) [9, 12].

АО «НПЦ «Полюс» производит исполнительные органы системы ориентации на базе двигателей-маховиков и на базе силовых гироскопов. В качестве опор во всех указанных исполнительных органах используются шарикоподшипники.

Электромеханические исполнительные органы производства АО «НПЦ «Полюс» на базе силовых гироскопов нашли применение на геостационарных КА производства АО «ИСС» со сроком активного существования до 10 лет. ЭМИО АО «НПЦ «Полюс» на базе двигателей-маховиков применяются на космических аппаратах производства АО «ИСС», в том числе и на КА, входящих в систему «ГЛОНАСС», со сроком активного существования до 10 лет, и на космических аппаратах, используемых в интересах связи и телевидения, со сроком активного существования до 15 лет. Скорость вращения ротора исполнительного органа изготовления АО «НПЦ «Полюс» на базе двигателей-маховиков достигает 6000 об/мин, кинетический момент ЭМИО достигает 70 Н·м·с. Для исполнительных органов на базе силовых гироскопов кинетический момент при той же скорости вращения ротора достигает 100 Н·м·с [12-13].

Электромеханические исполнительные органы производства АО НИИ КП на базе двигателей-маховиков применяются, в основном, на КА научно-исследовательского назначения [9].

За рубежом разработкой и изготовлением электромеханических исполнительных органов системы ориентации занимаются фирмы Rockwell Collins (Германия) и Bradford Engineering (Нидерланды) [8, 10-11]. ЭМИО зарубежного производства выполнены, в основном, на базе двигателей-маховиков на шарикоподшипниковых опорах. Указанные ЭМИО успешно применяются на КА зарубежного производства со сроком активного существования свыше 15 лет. Скорость вращения ротора ЭМИО производства Rockwell Collins достигает 10000 об/мин, кинетический момент ЭМИО

достигает 100 Н·м·с. У исполнительных органов производства Bradford Engineering скорость вращения ротора достигает 6000 об/мин при кинетическом моменте до 70 Н·м·с. Сравнительные характеристики ЭМИО российского и зарубежного производства указаны в таблице 1.1 [4-7, 9-12].

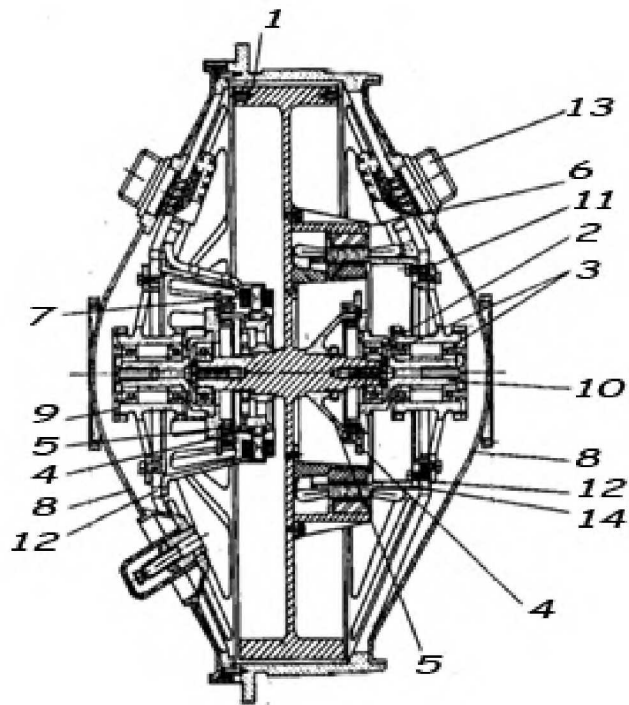
Таблица 1.1 – Сравнительные характеристики ЭМИО российского и зарубежного производства

Основные характеристики ЭМИО	АО «НПЦ «Полюс», г. Томск, Российская Федерация	Rockwell Collins (Германия)	Bradford Engineering (Нидерланды)
Скорость вращения, обороты/мин	6000	10000	6000
Кинетический момент, Нмс	0...100	0...100	0...70
Срок активного существования космических аппаратов, на которых применяются ЭМИО, лет	7-15	Свыше 15	Свыше 15

Электромеханические исполнительные органы относятся к классу инерционных исполнительных органов. Они представляют собой осесимметричные вращающиеся роторы, которые в технике принято называть силовыми гироскопами или гиросиловыми стабилизаторами [2-3].

В общем случае электромеханические исполнительные органы подразделяются на силовые гироскопы и двигатели-маховики.

Двигатель-маховик представляет собой массивный ротор, совмещенный с обращенным электрическим двигателем, ось которого жестко закреплена на корпус. Подобные двигатели-маховики показаны на рисунках 1.2 и 1.3. Конструкция двигателя-маховика изображена на рисунке 1.4.



1 – маховик, 2 – основные шарикоподшипники, 3 – вспомогательные подшипники, 4 – магнитная муфта, 5 – тонкостенный стакан, 6 – электродвигатель, 7 – датчик положения ротора, 8 – кожух, 9 – фланец, 10 – втулка, 11 – корпус вспомогательных опор, 12 – крышка, 13 – разъем, 14 – статор электродвигателя

Рисунок 1.4 – Электромеханический исполнительный орган на базе двигателя-маховика

Основными характеристиками маховика являются кинетический момент H

$$H = J\Omega = mR_{ц}^2\Omega, \quad (1.1)$$

где J – момент маховой массы,

Ω – угловая скорость,

m – масса диска маховика,

$R_{ц}$ – радиус инерции,

и управляющий момент $M_{упр}$

$$M_{\text{упр}} = M_{\text{Э}} + M_{\text{С}}, \quad (1.2)$$

где $M_{\text{Э}}$ – электродинамический момент,

$M_{\text{С}}$ – момент сопротивления при трении в подшипниках, магнитных сил, трения о воздух.

Указанные характеристики связаны друг с другом через следующее соотношение [2-3, 14]:

$$M_{\text{упр}} = \frac{dH}{dt} = J \frac{d\Omega}{dt}. \quad (1.3)$$

Силовой гироскоп представляет собой массивный ротор в кардановом подвесе, кинематическая схема силового гироскопа приведена на рисунке 1.5 [2-3, 14-15].

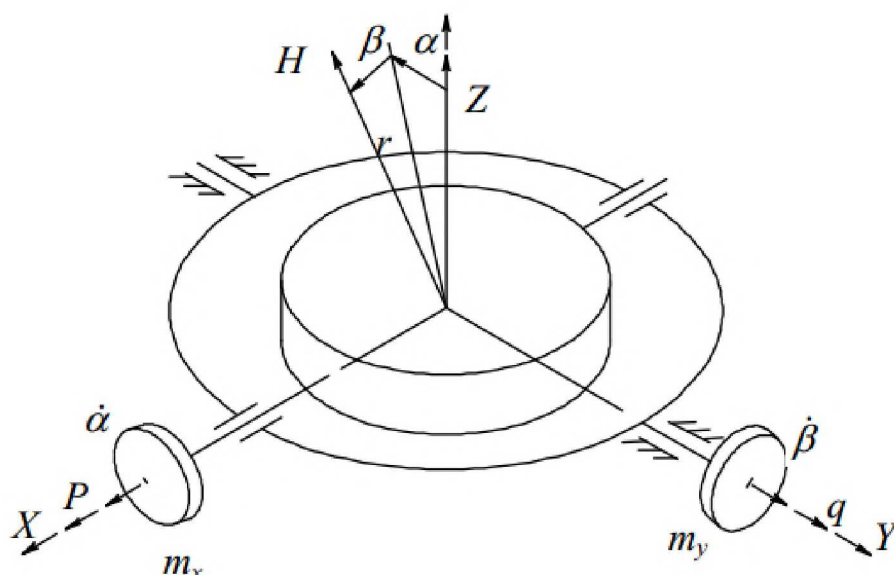


Рисунок 1.5 – Кинематическая схема силового гироскопа

Гироскоп установлен в карданов подвес и его кинетический момент H направлен по оси Z .

По осям карданова подвеса установлены моментные устройства активного или пассивного типа. Генерирование моментов по осям X , Y и Z осуществляется на основе разных физических принципов. Управление относительно оси Z производится изменением угловой скорости двигателя-маховика из состава ЭМИО, в результате чего возникает управляющий момент, аналогичный управляющему моменту ЭМИО на базе двигателей-маховиков, изложенному в выражении (1.3).

Управление по осям X и Y осуществляется приложенными относительно осей подвеса моментами, программно изменяющими углы α и β . Вследствие этого численно равные и ортогонально направленные моменты будут прикладываться к корпусу космического аппарата и тем самым осуществлять его угловое движение относительно его центра масс.

С учетом допущений прецессионной теории гироскопов о том, что кинетический момент H сосредоточен на его главной оси, проекции кинетического момента на оси X , Y , Z космического аппарата имеют вид:

$$H_x = H \cdot \cos\alpha \cdot \sin\beta, \quad (1.4)$$

$$H_y = H \cdot \sin\alpha, \quad (1.5)$$

$$H_z = H \cdot \cos\alpha \cdot \cos\beta, \quad (1.6)$$

где H_x , H_y , H_z – проекции кинетического момента на оси X , Y , Z космического аппарата,

α – программно изменяемый угол КА относительно оси X ,

β – программно изменяемый угол КА относительно оси Y [2-3, 14].

1.2 Обзор существующих опор электромеханических исполнительных органов системы ориентации космического аппарата

В настоящее время существует и применяется в электромеханических исполнительных органах и в других отраслях техники множество типов опор. На рисунке 1.6 приведена классификация опор [4].

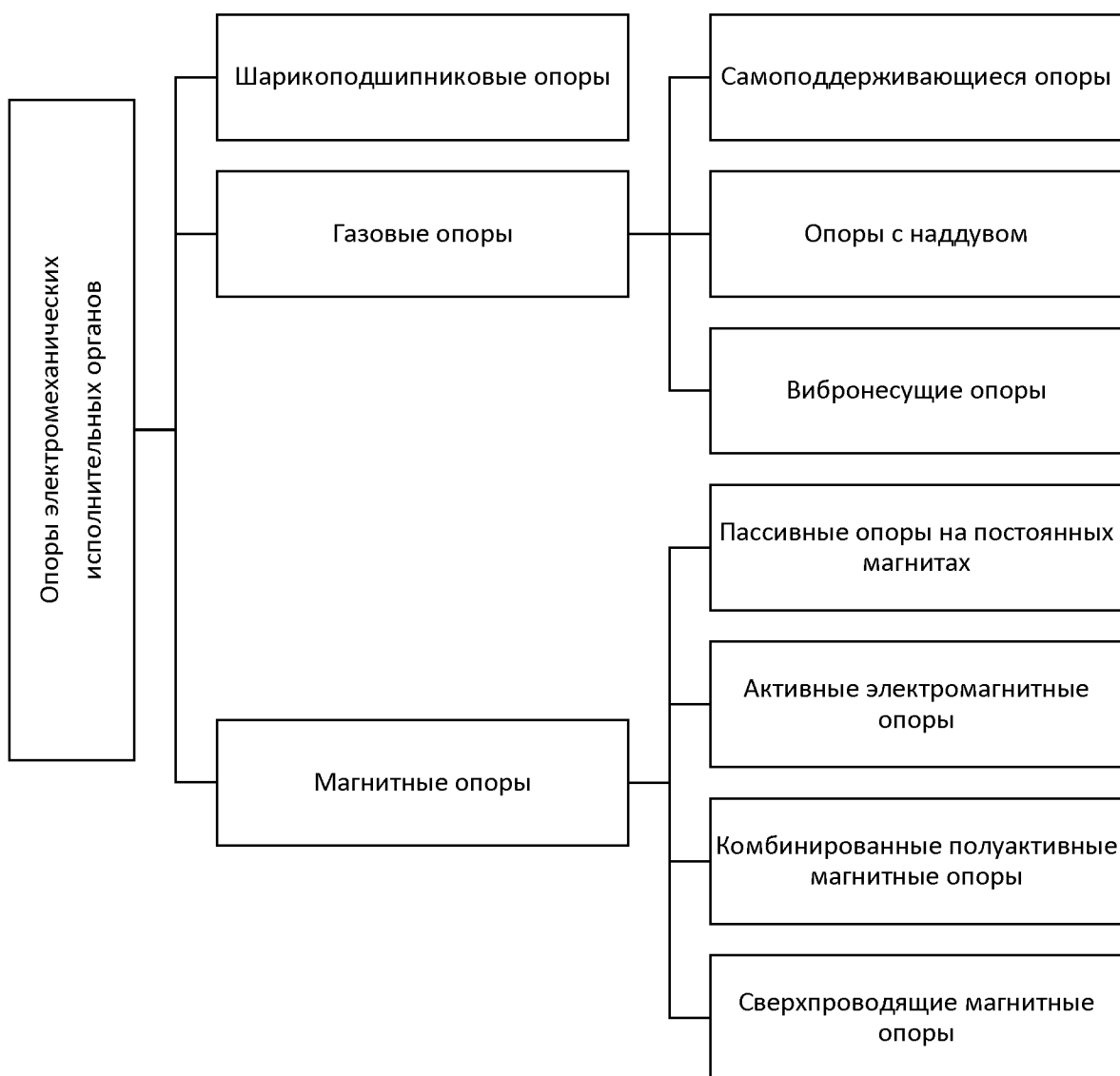


Рисунок 1.6 – Классификация опор

Самой распространенной из опор является шарикоподшипниковая опора, которая, как сказано ранее, применяется в большинстве отечественных и зарубежных электромеханических исполнительных органах. Её достоинствами являются:

- относительная простота изготовления;
- высокая жесткость;
- наличие большого опыта эксплуатации в наземной и космической технике.

Долговечность и надежность шарикоподшипниковой опоры зависит от многих факторов: нагрузки, частоты вращения, условий смазки, материала, точности изготовления и сборки подшипника, условий эксплуатации, точности балансировки двигателя-маховика. При этом влияние каждого из указанных факторов на долговечность подшипниковой опоры определяется исключительно эмпирически.

Опытным путем установлено, что с увеличением нагрузки на подшипник долговечность его резко падает, однако установить теоретическую зависимость от нагрузки пока не удалось. Расчет долговечности высокоскоростных шарикоподшипниковых опор затруднителен из-за того, что долговечность ввиду различных режимов эксплуатации и процессов производства является случайной величиной. Поэтому, характеристики долговечности и надежности высокоскоростных шарикоподшипниковых опор являются вероятностными величинами, и зависят от следующих факторов: от износа шарикоподшипниковой опоры, от нагрузки, прикладываемой к данной опоре. В связи с этим для определения надежности и долговечности только одного типа шарикоподшипниковой опоры, необходимы длительные и дорогостоящие ресурсные испытания с полной имитацией действующей нагрузки большой партии указанных опор для получения статистически приемлемого результата [4, 16-17].

Для повышения долговечности подшипниковой опоры в работе [18] предлагается применение высокоскоростной опоры со скоростью вращения

ЭМИО до 20000 об/мин на базе 2-х совмещенных друг с другом низкоскоростных опор. При этом скорость вращения данных опор относительно друг друга и ротора ЭМИО относительно одной из них будет находиться в пределах 10000 об/мин. Дополнительно, в данной работе предполагается автоматическая смазка подшипниковой опоры в условиях космического пространства, что также позволяет продлить долговечность опоры.

Тем не менее, указанный способ повышения долговечности шарикоподшипниковой опоры не имеет четких перспектив дальнейшего применения, из-за того, что рост угловой скорости ЭМИО, повышенные требования к массогабаритным характеристикам и увеличение срока эксплуатации делают экономически нецелесообразным как применение совмещенных опор, так и применение смазывающих устройств, поскольку при длительном функционировании в условиях космического пространства смазка уже не сможет выполнять свои функции.

Кроме ограничения по сроку функционирования шарикоподшипниковые опоры имеют следующие недостатки:

- 1) высокие потери на трение в шарикоподшипниковых опорах;
- 2) необходимость смазки опоры;
- 3) наличие шума и вибрации в опоре – возможно резкое повышение износа опоры из-за механического резонанса, что приведет к разрушению опоры;
- 4) ограничения по нагрузке шарикоподшипниковой опоры.

С ростом угловой скорости вращения электромеханического исполнительного органа растут нагрузки, действующие в опорах ЭМИО силы трения в подшипниках, и при достижении определенного предела скорости подшипниковые опоры не смогут выполнять свою функцию, что приведет к отказу исполнительного органа. Многие зарубежные и отечественные фирмы проводили работы по повышению угловой скорости вращения ротора электромеханического исполнительного органа с использованием магнитных и газовых опор. Указанные опоры позволяют избавиться от сил трения в

подшипниках, и тем образом продлевают срок существования исполнительного органа.

Газовые опоры могут применяться в качестве замены классических подшипников. Они состоят из цапфы и подшипника (подпятника). Смазывающим веществом в таких опорах является воздух или газ (гелий или водород).

Газовые опоры делятся на 3 основных типа:

- 1) самоподдерживающиеся опоры;
- 2) опоры с наддувом;
- 3) вибронесущие опоры.

Самоподдерживающиеся (газодинамические) опоры – опоры, в которых нагнетание газа в смазывающий зазор происходит за счет движения смазываемых поверхностей и отсутствуют дополнительные источники сжатого газа.

Опоры с наддувом – это опоры, функционирование которых обеспечивается посредством подачи сжатого воздуха (газа) из камеры наддува в рабочую зону опоры.

Вибронесущие опоры – это опоры, источником несущей способности которых является колебательное движение – высокочастотное периодическое сдавливание смазочного слоя.

По сравнению с шарикоподшипниковыми опорами газовые опоры имеют следующие преимущества:

- высокая работоспособность в широком диапазоне температур;
- трение и износ поверхностей цапфы и подшипника практически отсутствует.

К недостаткам газовых опор можно отнести:

- небольшую несущую способность;
- отсутствие гарантированной устойчивости опор;
- наличие необходимости обеспечения герметичности опор;

- высокую сложность сборки, регулирования и контроля опор;
- высокие требования к материалам, в частности, их высокая твердость, коррозионная стойкость, необходимая теплопроводность, низкий коэффициент трения, материал должен хорошо обрабатываться, не «схватываться» при соприкосновении на больших скоростях [17, 19].

Магнитные опоры являются одним из наиболее перспективных способов подвески исполнительных органов, их использование позволяет снизить потерю за счет сил трения управляющего момента исполнительного органа и повысить срок службы ЭМИО.

Преимуществами магнитных опор являются их высокая подъемная сила, возможность обеспечения работы опоры при сверхвысоких скоростях и получение крайне малых возмущающих моментов. Кроме этого применение магнитной опоры снимает проблему вибраций ЭМИО за счет биений шарикоподшипника и обеспечивает возможность нормального функционирования в широком диапазоне температур.

В настоящее время известно несколько типов магнитных опор, применяемых в технике:

- пассивные опоры на постоянных магнитах;
- активные электромагнитные опоры;
- комбинированные полуактивные магнитные опоры;
- сверхпроводящие магнитные опоры [17, 20-23].

Пассивные опоры на постоянных магнитах считаются простейшим типом опор, в которых используются магнитные силы. Преимуществами пассивных опор на постоянных магнитах являются отсутствие энергопотребления опоры и простота конструкции. Множество схем пассивных опор предлагались различными авторами, но, до сих пор, не зафиксировано реального применения данных схем. До последнего времени они не применялись в ЭМИО КА из-за и дороговизны постоянных магнитов на основе самарий-кобальтовых или платиново-кобальтовых сплавов. В последнее время с появлением новых

магнитных материалов на основе неодим-железа-бора возможно появление ЭМИО на пассивных опорах [20-23].

Активные магнитные опоры представляют собой опоры, в которых подвешивание ротора ЭМИО осуществляется посредством сил тяжения или отталкивания электромагнитов, управляемых специальным электронным блоком внешней обратной связи. В России подобные опоры применяются в оборудовании для газовой промышленности, выпускаемом АО «Корпорация «ВНИИЭМ» (г. Москва). Из зарубежных производителей активных магнитных подшипников можно назвать французскую компанию «S2M Société de Mécanique Magnétique SA», которая также производит электромагнитные подшипники для газового оборудования [24-25].

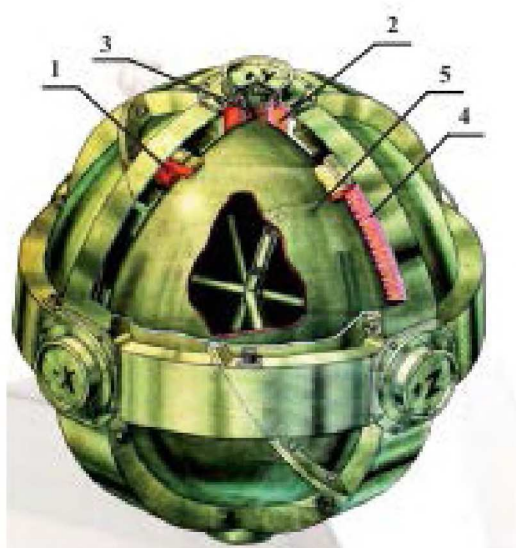
К комбинированным полуактивным магнитным опорам относятся многоосные системы, где взвешивание по одним осям осуществляется пассивными схемами, а по другим осям активными схемами. Данные опоры представляют собой гибрид активной и пассивной магнитной опоры.

Работа сверхпроводящих (криогенных) опор основана на явлении выталкивания магнитных силовых линий сверхпроводящими телами. Основной недостаток сверхпроводящей опоры заключается в необходимости обеспечить сверхнизкую температуру в ней, что требует наличия криогенного устройства и значительного расхода энергии на его питание.

1.3 Обзор существующих решений и математических моделей для магнитных опор электромеханических исполнительных органов системы ориентации космического аппарата

В России есть опыт применения активных магнитных подшипников в космической технике. В частности, в начале 1990-х годов предприятием «ВНИИЭМ» была спроектирована и изготовлена система управления космической станцией «Мир» на основе трехстепенных силовых гироскопов. Данная система была доставлена отдельно на станцию «Мир», установлена и

подключена силами экипажа и до конца срока существования станции успешно выполняла свои функции [24, 26].

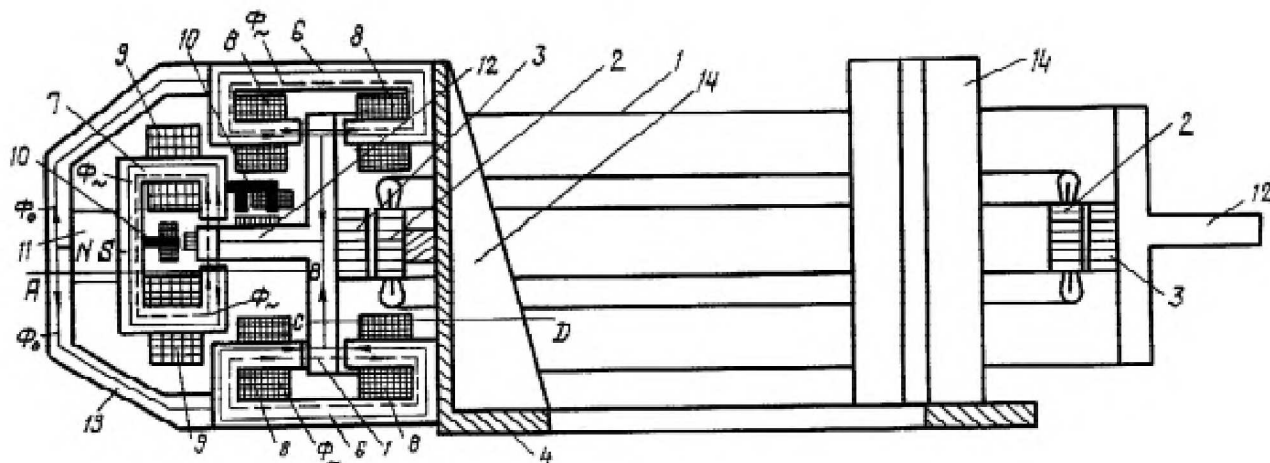


1 – тахометрическая обмотка; 2 – электромагнит; 3 – индуктивный датчик зазора; 4 – статорная обмотка, 5 – шаровой ротор-маховик

Рисунок 1.7 – Шаровой электродвигатель-маховик

Кроме того, в СССР с 1978 по 1988 г. предприятием НПЦ «Полюс» (г. Томск) и МВТУ имени Баумана было зарегистрировано несколько патентов на активные и комбинированные магнитные опоры ЭМИО [27-34].

Например, в 1986 году авторским коллективом АО «НПЦ «Полюс» В. П. Лянзбургом и Т. М. Гридневой было зарегистрировано следующее изобретение – кольцевой электродвигатель-маховик, изображенный на рисунках 1.8 и 1.9 [29].



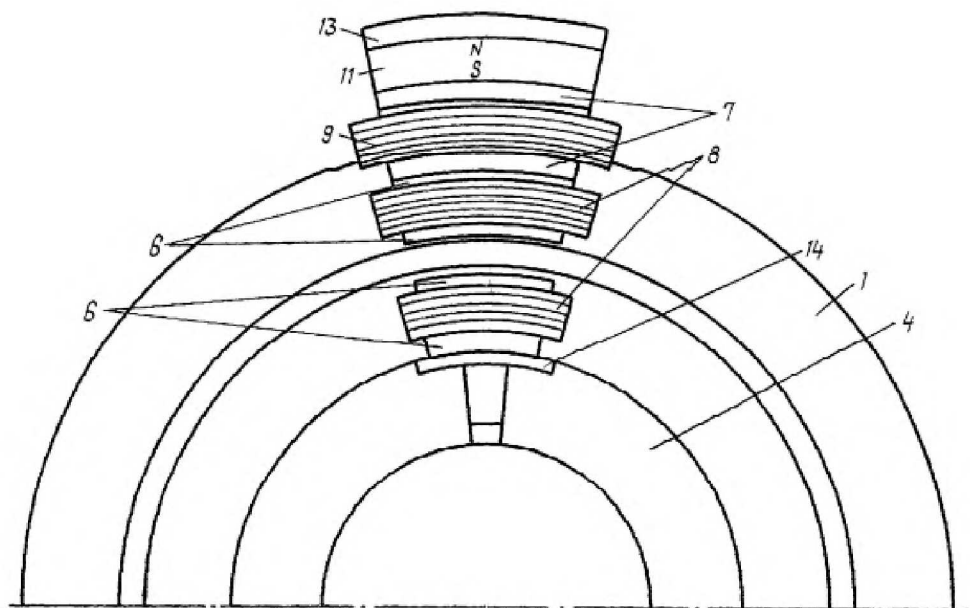
1 – кольцевой электродвигатель-маховик, 2 – статор двигателя, 3 – ротор двигателя, 4 – основание, 5 – электромагнитная опора, 6 – магнитопровод электромагнита радиальной стабилизации, 7 – магнитопровод электромагнита осевой стабилизации, 8 – обмотка электромагнита радиальной стабилизации, 9 – обмотка электромагнита осевой стабилизации, 10 – позиционные датчики, 11 – постоянный магнит, 12 – кольцевой выступ, 13 – ярмо, 14 – стойки крепления электромагнитных опор

Рисунок 1.8 – Кольцевой электродвигатель-маховик (диаметральный разрез)

Кольцевой электродвигатель-маховик состоит из кольцевого маховика 1, статора 2 и ротора 3 двигателя, основания 4 и трех электромагнитных опор 5. В состав каждой из этих опор входят электромагниты радиальной и осевой стабилизации, которые содержат магнитопроводы 6 и 7, а также обмотки 8 и 9 соответственно; позиционные датчики 10 и постоянный магнит 11.

Магнитопроводы 6 электромагнитов радиальной стабилизации охватывают с зазорами края кольцевого маховика 1, причем каждый из магнитопроводов 6 образует с кольцом маховика два рабочих зазора: с внутренней и наружной поверхностей кольца. В зоне рабочего зазора находится не вся поверхность маховика, а лишь его края, площадь которых перекрывается поверхностями разреза магнитопроводов 6.

Края маховика охвачены магнитопроводами со стороны торцевых поверхностей кольца 1.



1 – кольцевой электродвигатель-маховик, 4 – основание, 6 – магнитопровод электромагнита радиальной стабилизации, 7 – магнитопровод электромагнита осевой стабилизации, 8 – обмотка электромагнита радиальной стабилизации, 9 – обмотка электромагнита осевой стабилизации, 11 – постоянный магнит, 13 – ярмо, 14 – стойки крепления электромагнитных опор

Рисунок 1.9 – Кольцевой электродвигатель-маховик (ступенчатый разрез по ABCD)

Магнитопровод 7 электромагнита осевой стабилизации с зазорами охватывает с наружной стороны кольцевой выступ 12, расположенный на внешней поверхности кольца 1. Магнитопроводы 6 электромагнитов радиальной стабилизации соединены ярмом 13. Между внутренней поверхностью этого ярма (обращенной внутрь магнитной опоры) и наружной поверхностью магнитопровода 7 установлен постоянный магнит 11, соприкасающийся с указанными поверхностями разноименными полюсами. На рисунке 1.8 полюс S касается наружной поверхности магнитопровода 7, а

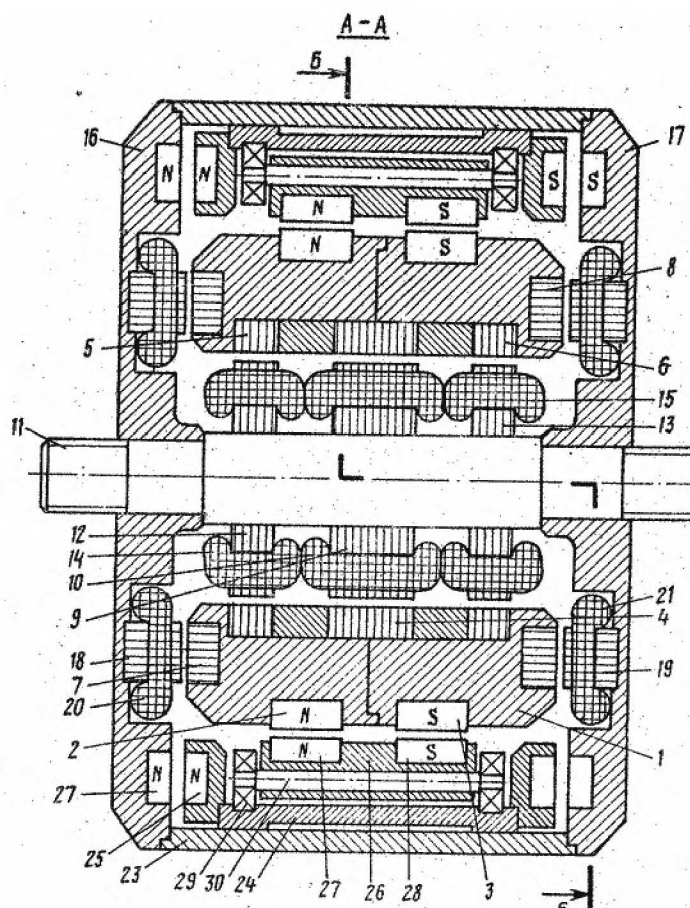
полюс N – внутренней поверхности ярма 13. Электромагнитные опоры крепятся к основанию 4 при помощи стоек 14 [29].

Кроме вышеуказанных активных магнитных опор ЭМИО в СССР сотрудником МВТУ имени Н. Э. Баумана было зарегистрировано изобретение на электродвигатель-маховик с электромагнитным подвесом ротора, в состав которого входила комбинированная магнитная опора. Схема электродвигателя-маховика изображена на рисунках 1.10 и 1.11 [34].

Ротор 1 электродвигателя выполнен в виде цилиндрического тела, например из ферромагнитного материала, на внешней поверхности которого в пазах помещены равномерно распределенные по поверхности постоянные магниты 2 и 3. Все магниты 2 обращены наружу своими одноименными полюсами. Аналогично, но другими полюсами обращены наружу все магниты 3.

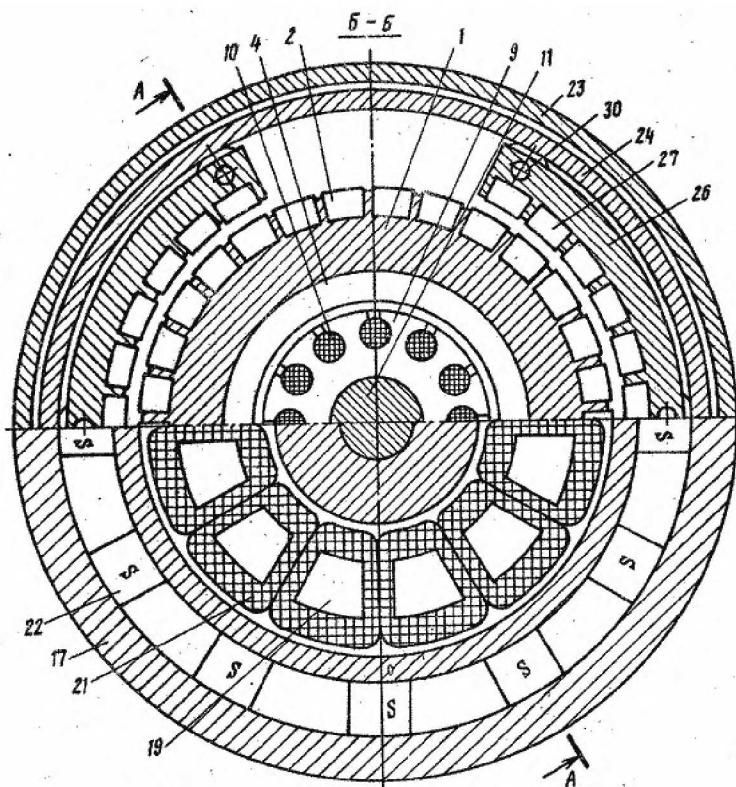
На внутренней поверхности ротора в пазах помещены набранные из кольцевых пластин магнитопроводы: магнитопровод 4 ротора собственно электродвигателя и магнитопроводы 5 и 6 корректирующей системы электромагнитного подвеса ротора. В торцовых пазах ротора закреплены витые кольцевые магнитопроводы 7 и 8, принадлежащие системе регулирования торцового зазора.

Магнитопровод 9 статора собственно электродвигателя с обмоткой 10 размещен на неподвижной оси 11, там же помещены магнитопроводы 12 и 13 с обмотками 14 и 15, составляющие совместно с кольцевыми магнитопроводами 5 и 6 ротора электромагниты корректирующей системы подвеса.



1 – ротор электродвигателя, 2, 3 – постоянные магниты на поверхности ротора, 4 – магнитопровод ротора электродвигателя, 5, 6 – магнитопроводы корректирующей системы электромагнитного подвеса, 7, 8 – витые кольцевые магнитопроводы ротора системы регулирования торцового зазора, 9 – магнитопровод статора электродвигателя, 10 – обмотка статора электродвигателя, 11 – неподвижная ось, 12, 13 – магнитопроводы электромагнита корректирующей системы, 14, 15 – обмотки электромагнита корректирующей системы, 16, 17 – боковые фланцы, 18, 19 – витые магнитопроводы статора системы регулирования торцового зазора, 20, 21 – обмотки статора системы регулирования торцового зазора, 23 – внутренняя цилиндрическая поверхность корпуса, 24 – аксиальный подвижный цилиндр, 25 – постоянные магниты, закрепленные на торцевых поверхностях подвижного цилиндра, 26 – подвижные элементы в виде цилиндрического сектора с закрепленными на внутренней поверхности постоянными магнитами, 27, 28 – постоянные магниты, закрепленные на внутренней поверхности подвижного элемента в виде цилиндрического сектора, 29 – обкаточные подшипники качения, 30 – оси обкаточных подшипников качения

Рисунок 1.10 – Электродвигатель-маховик с электромагнитным подвесом ротора (сечение Б-Б)



2 – постоянный магнит на поверхности ротора, 4 – магнитопровод ротора электродвигателя, 9 – магнитопровод статора электродвигателя, 10 – обмотка статора электродвигателя, 11 – неподвижная ось, 17 – боковой фланец, 19 – витой магнитопровод статора системы регулирования торцового зазора, 21 – обмотка статора системы регулирования торцового зазора, 22 – постоянные магниты, расположенные на боковых фланцах, 23 – внутренняя цилиндрическая поверхность корпуса, 24 – аксиальный подвижный цилиндр, 25 – постоянные магниты, закрепленные на торцовых поверхностях подвижного цилиндра, 26 – подвижные элементы в виде цилиндрического сектора с закрепленными на внутренней поверхности постоянными магнитами, 27 – постоянные магниты, закрепленные на внутренней поверхности подвижного элемента в виде цилиндрического сектора, 30 – оси обкаточных подшипников качения

Рисунок 1.11 – Электродвигатель-маховик с электромагнитным подвесом ротора (сечение А-А)

На оси 11 помещены также боковые фланцы 16 и 17 с закрепленными на них витыми магнитопроводами 18 и 19 с обмотками 20 и 21, составляющие совместно с магнитопроводами 7 и 8 ротора, электромагниты системы регулирования торцового зазора. К этой же системе относятся и расположенные в пазах фланцев постоянные магниты 22. Фланцы 16 и 17 жестко соединены с внешним цилиндрическим корпусом 23. Внутри него находится аксиально подвижный цилиндр 24, свободно скользящий по внутренней цилиндрической поверхности корпуса 23.

На торцовых поверхностях подвижного цилиндра закреплены постоянные магниты 25, расположенные напротив помещенных на фланцах постоянных магнитов 22 и обращенные к ним одноименными полюсами.

По внутренней поверхности цилиндра 24 свободно обкатываются подвижные элементы 26, представляющие собой размещенные с зазорами относительно друг друга цилиндрические сектора с закрепленными на их внутренней поверхности постоянными магнитами 27 и 28, обращенные к постоянным магнитам 2 и 3 ротора одноименными полюсами.

Обкатка осуществляется, например с помощью подшипников 29 качения малого диаметра, посаженных на оси 30. Подшипники размещены в специальных канавках подвижного цилиндра 24, что исключает осевые перемещения подвижных элементов 26 относительно цилиндра 24. Осевые перемещения одновременно всех секторов возможны только вместе с цилиндром 24, скользящим относительно корпуса 23. В конструкции применено три подвижных элемента 26 [34].

В связи с отсутствием массового применения магнитных опор математические модели к ним длительное время не разрабатывались. Для активных магнитных опор и активной части комбинированных опор математические модели были созданы специалистами выпускаемого АО «Корпорация «ВНИИЭМ» (г. Москва), одна из данных моделей приведена ниже [35-38].

На основе общего подхода к оценке комплексного магнитного сопротивления в [37] была предложена схема замещения электромагнита с массивным магнитопроводом, изображенная на рисунке 1.12. Проведённые исследования показывают, что такая схема позволяет с достаточной для инженерных задач точностью рассчитать стационарный режим работы осевой магнитной опоры в диапазоне частот от 5 до 500 Гц.

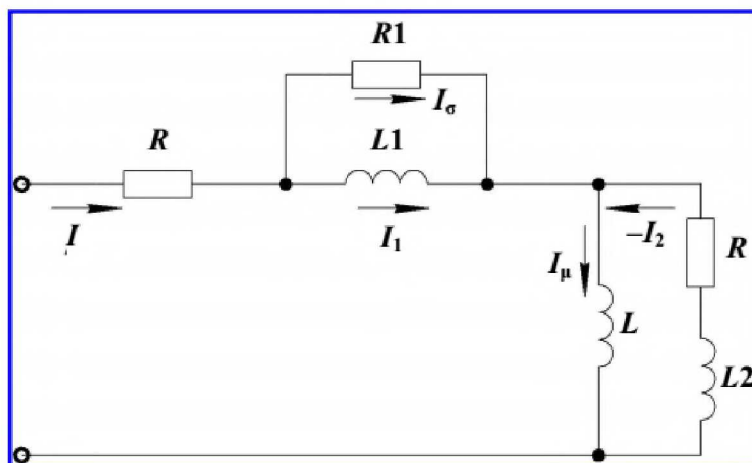


Рисунок 1.12 – Схема замещения осевой магнитной опоры с учётом влияния вихревых токов

Однако, несмотря на хорошую точность полученных результатов, использование такой схемы для практической реализации математической модели и впоследствии построения «наблюдателя» затруднительно, так как параметры R_2 и L_2 зависят от частоты. Для расчёта нестационарных режимов работы осевой магнитной опоры в [37] была предложена аппроксимированная схема замещения, изображенная на рисунке 1.13, и рассмотрена методика экспериментального определения её параметров.

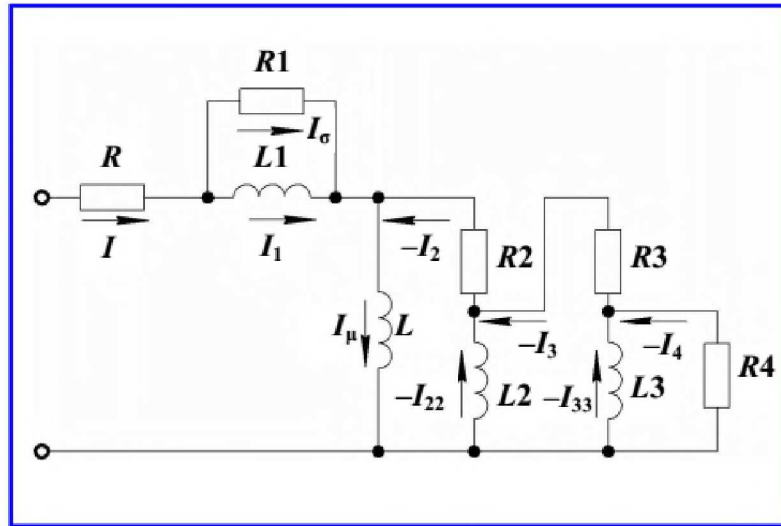


Рисунок 1.13 – Аппроксимированная схема замещения осевой магнитной опоры

Для перехода от аппроксимированной схемы замещения к математической модели запишем исходные уравнения электромагнитного преобразования энергии в следующем виде:

$$m \frac{d^2 y}{dt^2} - \frac{1}{2} \frac{dL}{dy} I_{\mu}^2 = Q, \quad (1.7)$$

$$U = \frac{d\psi}{dt} + L_1 \frac{dI}{dt} + IR, \quad (1.8)$$

$$F = \frac{1}{2} \frac{dL}{dy} I_{\mu}^2, \quad (1.9)$$

$$\psi = LI_{\mu}, \quad (1.10)$$

где I_{μ} – намагничивающий ток,

I – ток в обмотке,

$m \frac{d^2 y}{dt^2}$ – инерционная составляющая силы, действующей на ротор электромагнита,

L – индуктивность, соответствующая магнитному потоку в воздушном зазоре,

Ψ – потокосцепление,

Q – внешняя составляющая силы, действующей на ротор электромагнита,

F – тяговое усилие электромагнита,

U – напряжение питания, приложенное к обмотке электромагнита,

$L1$ – индуктивность, соответствующая потоку рассеяния,

R – активное сопротивление обмотки электромагнита.

Представленные уравнения (1.7) – (1.10) аналогичны уравнениям для радиальной магнитной опоры [2].

Отличие состоит в том, что для радиальной магнитной опоры токи I и I_{μ} совпадают, а в схеме замещения осевой магнитной опоры появляется дополнительная цепь с током I_2 , учитывающая физическую сущность процессов изменения магнитного сопротивления и потерь мощности в массивном ферромагнитном магнитопроводе осевой магнитной опоры. Это может оказывать существенное влияние на динамические свойства и управление осевой магнитной опоры. В частности, для осевой магнитной опоры, применяемой в ГПА-16 (газоперекачивающем агрегате), ток вторичной цепи I_2 физически характеризует дополнительные МДС и потери мощности, необходимые для проведения рабочего магнитного потока осевой магнитной опоры через участки массивного магнитопровода. Кроме того, магнитный поток рассеяния в осевой магнитной опоре частично замыкается по ферромагнитным участкам. С учётом этого на частоте 50 Гц намагничивающий ток I_{μ} , создающий тяговое усилие электромагнита F , составляет 32% от суммарного тока в обмотке электромагнита и отстаёт от него по фазе примерно на 38° .

Зависимость индуктивности электромагнита, соответствующей магнитному потоку в воздушном зазоре, от перемещения ротора, как и в [36], аппроксимируется выражением

$$L = \frac{L0}{1-y/a^2}, \quad (1.11)$$

где $L0$ – индуктивность, соответствующая магнитному потоку в воздушном зазоре при центральном положении ротора,

a – воздушный зазор между ротором и статором при центральном положении ротора,

y – отклонение ротора от центрального положения.

Как уже было упомянуто выше, ток в обмотке I складывается из двух составляющих: $I=I_{\mu}+I_2$, где I_2 – ток, учитывающий влияние вихревых токов.

Ток в обмотке I также можно записать следующим образом: $I = I_1+ I_{\sigma}$, где I_{σ} – ток, учитывающий влияние вихревых токов от потоков рассеяния.

Уравнение электрического равновесия для контура $L1 - R1$:

$$L1 \frac{dI_1}{dt} = R1I_{\sigma}, \quad (1.12)$$

где $R1$ – активная составляющая потерь от вихревых токов потоков рассеяния.

Уравнение электрического равновесия для контура $L0 - R2 - R3 - R4$:

$$\frac{d\psi}{dt} = R2I_2 + R3I_3 + R4I_4, \quad (1.13)$$

$$I_2 = I_{22} + I_3, \quad (1.14)$$

$$I_3 = I_{33} + I_4, \quad (1.15)$$

$$L3 \frac{dI_{33}}{dt} = R4I_4, \quad (1.16)$$

$$L4 \frac{dI_{22}}{dt} = R3I_3 + R4I_4, \quad (1.17)$$

где $I_2, I_3, I_4, I_{22}, I_{33}$ – токи в ветвях.

После ввода оператора дифференцирования s и алгебраических преобразований уравнение (1.13) принимает вид

$$s\psi = I_4 \left[\frac{s^2 L_2 L_3 (R_2 + R_3 + R_4) + s(R_2 R_3 L_3 + R_2 R_4 L_3 + R_2 R_4 L_2 + R_3 R_4 L_2) + R_2 R_3 R_4}{s^2 L_2 L_3} \right]. \quad (1.18)$$

Перейдём к относительным единицам:

$$\begin{aligned} y' &= y/a, F' = F/F_m, Q' = Q/F_m, \psi' = \psi/\psi_m, I' = I/I_{m0}, U' = U/U_{m0}, \\ I'_{\mu} &= I_{\mu}/I_{m0}, I'_2 = I_2/I_{m0}, I'_{22} = I_{22}/I_{m0}, I'_3 = I_3/I_{m0}, I'_{33} = I_{33}/I_{m0}, \\ I'_4 &= I_4/I_{m0}, I'_1 = I_1/I_{m0}, I'_{\sigma} = I_{\sigma}/I_{m0}, \end{aligned} \quad (1.19)$$

где F_m – максимальное тяговое усилие,

$\psi_m = 2aL_0F_m$ – максимальное потокосцепление,

$I_{m0} = \psi_m/L_0$ – максимальный ток в обмотке при центральном положении ротора ($y = 0$),

U_{m0} – значение напряжения питания, при котором в обмотке протекает ток I_{m0} .

Уравнения электромагнитного преобразования энергии (1.7) – (1.10) принимают более простой вид:

$$s^2 y' = \frac{F_m}{ma} (F' + Q'), \quad (1.20)$$

$$s\psi' = \frac{U_{m0}}{\psi_m} U' - \frac{R}{L_0} I' (T_1 s + 1), \quad (1.21)$$

$$F' = (\psi')^2, \quad (1.22)$$

$$I'_{\mu} = (1 - y')\psi', \quad (1.23)$$

$$I' = I'_1(T_\sigma s + 1), \quad (1.24)$$

$$I'_4 = s\psi' \left[\frac{s^2 L_0 L_2 L_3}{s^2 L_2 L_3 (R_2 + R_3 + R_4) + s(R_2 R_3 L_3 + R_2 R_4 L_2 + R_3 R_4 L_2) + R_2 R_3 R_4} \right], \quad (1.25)$$

где $T_1 = LI/R$ и $T_\sigma = LI/R$ – постоянные времени.

Данные уравнения (1.20) – (1.25) и образуют математическую модель осевой магнитной опоры [35-38].

Для всех рассмотренных выше магнитных опор можно выявить ряд общих параметров, определяющих эффективность магнитной опоры. К ним относятся:

- энергопотребление магнитной опоры;
- механическая сила магнитного поля опоры;
- устойчивость магнитной опоры;
- ресурс магнитной опоры.

К дополнительным параметрам магнитной опоры можно отнести сложность исполнения.

Ресурс магнитной опоры является важнейшим показателем с точки зрения надежности всего электромеханического исполнительного органа в целом. Для активных и комбинированных магнитных опор ресурс определяется в основном старением обмоток электромагнитов, который для медного провода в лаковой изоляции составляет около 200000 часов или около 22 лет [38]. В случае пассивных магнитных опор ресурс определяется исключительно временем естественного размагничивания постоянных магнитов, например магнитов на основе NdFeB, которые за десятилетие работы могут потерять 1-2 % своей намагничивающей силы [40-43]. В данном случае для всех типов магнитных опор ресурс магнитной опоры в рамках всего электромеханического исполнительного настолько велик, что не является определяющим показателем для выбора типа опоры.

Устойчивость магнитной опоры является тем параметром, который больше зависит от исполнения магнитной опоры, а не от типа опоры. Для решения проблемы устойчивости совершенно неважен тип магнитной опоры, используемой в ЭМИО, важно именно конструктивное исполнение опоры.

Механическая сила магнитного поля опоры является целевым показателем при конструировании электромеханических исполнительных органов, так как функционирование ЭМИО невозможно при значении силы меньшей центробежных сил в опоре, создаваемых при вращении маховика ЭМИО, и внешних возмущающих сил, действующих в опоре. Механические силы в различных типах опор могут достигнуть любых требуемых значений, принципиальное значение имеет исключительно характер их возникновения.

Энергопотребление магнитной опоры является важным показателем для космического аппарата, так как в некоторых режимах работы СОС КА, таких как режим ориентации на Солнце, режим автономной солнечной ориентации и при нахождении КА в тени и полутени Земли или Луны, расход электрической энергии является критичным для функционирования всего КА в целом и дополнительный расход энергии является весьма нежелательным.

Наибольшее энергопотребление наблюдается у активных электромагнитных опор. Для комбинированных опор энергопотребление существенно снижается за счет применения в системе постоянных магнитов. Пассивные опоры вообще не потребляют электрическую энергию, в чем и заключается их особая привлекательность для космических аппаратов.

Сложность исполнения активных и комбинированных опор с одной стороны, позволяет осуществлять активное управление силой, действующей в опорах, а с другой стороны несет в себе риск снижения надежности за счет применения дополнительной системы управления и множества дополнительных элементов, пассивные опоры данного недостатка лишены.

В таблице 1.2 указаны общие параметры, определяющие эффективность магнитной опоры.

Таблица 1.2 – Сравнительные характеристики магнитных опор различных типов

Наименование параметра	Энергопотребление	Механическая сила	Устойчивость магнитной опоры	Ресурс магнитной опоры	Сложность исполнения магнитной опоры
Тип магнитной опоры	магнитной опоры	магнитного поля опоры			
Активная	Высокое	В зависимости от исполнения опоры	В зависимости от исполнения опоры	Более 22 лет	Средняя
Комбинированная	Среднее			Более 22 лет	Высокая
Пассивная	Отсутствует			Практически не ограничен	Низкая

Таким образом, для пассивной магнитной опоры основным преимуществом является отсутствие энергопотребления, а параметром, определяющим её эффективность, является механическая сила магнитного поля опоры.

В связи с этим и основываясь на опыте построения математической модели активной опоры необходимо построения математической модели пассивной опоры.

1.4 Постановка задачи

Цель работы: обоснование конструкторских решений при проектировании магнитных опор на силах отталкивания за счет разработки математической модели.

Задачи:

- 1) Создание математической модели опоры на базе постоянных магнитов на силах отталкивания;
- 2) Вычислительный эксперимент по математической модели

Объект исследования: опора электромеханического исполнительного органа космического аппарата на постоянных магнитах

Предмет исследования: подъемная способность опоры на постоянных магнитах.

Научная новизна диссертационной работы заключается в создании математической модели опоры на базе постоянных магнитов на силах отталкивания, включающую в себя модель подъемной силы опоры.

Допущения и ограничения: При создании математической модели не учитываются возмущения в опоре, вызванные движением КА в пространстве, а также влиянием двигателей ориентации и коррекции и не учитываются внешние электромагнитные воздействия.

Практическая значимость: построенная математическая модель позволит конструкторам электромеханических исполнительных органов с магнитной опорой выбрать наиболее подходящее решение.

1.5 Выводы к главе 1

1 В разделе 1.1 автором приведены общие сведения об электромеханических исполнительных органах системы ориентации, приведена их краткая классификация, объяснено устройство и принцип действия. Это позволяет при дальнейшем рассмотрении вопросов, связанных с конструированием элементов электромеханических органов получить представление об условиях их эксплуатации и ограничениях, накладываемых ими.

2 В разделе 1.2. проведенные автором исследования в части имеющих вид опор электромеханических исполнительных органов и прочих электромеханических устройств показывают преимущества бесконтактных опор, таких как газовые и магнитные опоры, а в части конструирования и эксплуатации несомненное преимущество магнитных опор.

3 В разделе 1.3 рассмотрен ряд технических решений для магнитных опор электромеханических исполнительных органов и математическая модель активной магнитной опоры, проведено сравнения влияния характеристик различных типов опоры на её эксплуатационную эффективность.

4 В разделе 1.4 автором выполнена постановка задачи и пути решения задачи, определена научная новизна работы, заключающаяся в создании математической модели опоры на базе постоянных магнитов на силах отталкивания, и практическая значимость, заключающаяся в том, что построенная математическая модель позволит конструкторам электромеханических исполнительных органов с магнитной опорой выбрать наиболее подходящее решение, а, в следствие, этого повысить эффективность работы ЭМИО в целом.

2 Разработка математической модели магнитной опоры электромеханического исполнительного органа системы ориентации космического аппарата

2.1 Формирование факторного пространства для математического моделирования

Рассмотрим основные величины необходимые для построения математической модели опоры на постоянных магнитах.

\vec{B} – магнитная индукция в веществе, единица измерения – Тл;

\vec{H} – напряженность магнитного поля, единица измерения – А/м;

J – намагниченность постоянного магнита, единица измерения – Тл;

$\vec{H}_{\text{магн}}$ – напряженность магнитного поля в постоянном магните (коэрцитивная сила постоянного магнита), единица измерения – А/м;

χ – магнитная восприимчивость вещества;

μ_r – относительная магнитная проницаемость вещества;

μ_0 – магнитная проницаемость вакуума, единица измерения – Гн/м.;

μ – магнитная проницаемость вещества, единица измерения – Гн/м.;

I – сила тока в проводнике, единица измерения – А.;

l – длина витка с током, эквивалентного периметру поверхности сечения магнита, м.;

R – расстояние от проводника с током до точки окружающего пространства единица измерения – м.;

δ – расстояние между постоянными магнитами, зазор магнитной опоры, единица измерения – м.;

\vec{F} – механическая сила магнитного поля, создаваемого магнитом или проводником с током, единица измерения – Н;

h – длина постоянного магнита, единица измерения – м;

L_1, L_2 – образующие конических поверхностей, образующих опору, единица измерения – м;

r_1, r'_1 – радиусы соответственно большего и меньшего оснований конической поверхности магнита 1 опоры, единица измерения – м;

r_2, r'_2 – радиусы соответственно большего и меньшего оснований конической поверхности магнита 2 опоры, единица измерения – м;

S_1, S_2 – площади боковых поверхностей усеченных конусов, образующих опору.

Для целей математического моделирования магнитной опоры электромеханического исполнительного органа системы ориентации наиболее важными величинами являются механическая сила магнитного поля, создаваемого постоянным магнитом, \vec{F} и зазор магнитной опоры δ , величина которого напрямую влияет на значение силы магнитного поля \vec{F} .

2.2 Математическое моделирование опоры на постоянных магнитах

Математическое моделирование опоры на постоянных магнитах в науке и технике осуществляется посредством методов, используемых в магнитостатике. Основными законами в магнитостатике и раздела электротехники, посвященного динамическим магнитным системам, являются уравнения Максвелла [44]. Для постоянных магнитов уравнения Максвелла выглядят следующим образом:

$$\nabla \times \vec{H} = \vec{J}, \quad (2.1)$$

$$\nabla \cdot \vec{B} = 0, \quad (2.2)$$

кроме того, используется следующая важная зависимость (1.3):

$$\vec{B} = \mu_0 \vec{H} + \vec{J} = \mu_0 \vec{H}(1 + \chi), \quad (2.3)$$

где $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7}$ Гн/м – магнитная проницаемость вакуума;

χ – магнитная восприимчивость вещества.

Величина в скобках представляет собой относительную магнитную проницаемость вещества

$$\mu_r = 1 + \chi. \quad (2.4)$$

В связи с тем, что в современной технике, как правило, не рассматриваются взаимодействия 2-х постоянных магнитов, и руководствуясь тем, что согласно уравнениям Максвелла магнитное поле существует независимо от его происхождения, обратимся к основным соотношениям электротехники для взаимодействия 2-х проводников с током.

Из курса электротехники известен закон Био-Савара-Лапласа для проводника в магнитном поле с током, отражающий зависимость магнитной индукции от силы тока в проводнике:

$$d\vec{B} = \mu I \frac{[d\vec{l} \times \vec{R}]}{R^3}, \quad (2.5)$$

где μ – магнитная проницаемость вещества;

I – сила тока в проводнике;

l – длина витка с током;

R – расстояние от проводника с током до точки окружающего пространства [44-51].

Сила, действующая на проводник с током со стороны магнитного поля, определяется выражением:

$$d\vec{F} = I[d\vec{l} \times \vec{B}]. \quad (2.6)$$

Выражения (2.5) и (2.6) справедливы для взаимодействия 2-х проводников с током, взаимодействие постоянных магнитов в данных выражениях никак не освещено. Для перехода к взаимодействию постоянных магнитов представим магниты в виде проводников с током, выразив силу тока в проводнике следующим образом

$$I = H_{\text{магн}} \cdot h, \quad (2.7)$$

где $H_{\text{магн}}$ – намагниченность постоянного магнита, А/м;

h – длина постоянного магнита.

В связи с этим выражения (2.5) и (2.6) приобретают вид:

$$d\vec{B} = \mu H_{\text{магн}} h \frac{[d\vec{l} \times \vec{R}]}{R^3} \quad (2.8)$$

$$d\vec{F} = H_{\text{магн}} h [d\vec{l} \times \vec{B}] \quad (2.9)$$

где l – длина витка с током, эквивалентного периметру поверхности сечения магнита.

Применим уравнение (2.8) для системы взаимодействующих магнитов выражение (2.8) для индукции магнитного поля создаваемого магнитом 1, заменив R – расстояние от проводника с током до точки окружающего пространства на δ – зазор магнитной опоры

$$d\vec{B}_1 = \mu H_{\text{магн1}} h_1 \frac{[d\vec{l}_1 \times \vec{\delta}]}{\delta^3} \quad (2.10)$$

где $d\vec{B}_1$ – магнитная индукция создаваемая первым магнитом;

J_1 – намагниченность 1-го магнита;

h_1 – длина 1-го магнита;

l_1 – длина витка с током, эквивалентного периметру поверхности сечения магнита 1;

δ – зазор магнитной опоры.

Сила, с которой магнит 1 действует на магнит 2, представляется следующим выражением

$$d\vec{F}_{12} = H_{\text{магн}2} h_2 [d\vec{l}_2 \times \vec{B}_1] \quad (2.11)$$

где $d\vec{B}_1$ – магнитная индукция создаваемая первым магнитом;

J_2 – намагниченность 2-го магнита, А/м;

h_2 – длина 2-го магнита, м;

l_2 – длина витка с током, эквивалентного периметру поверхности сечения магнита 2, м.

Подставляя выражение (2.10) в уравнение (2.11) получаем выражение зависимости силы, действующей на магнит 2 со стороны магнита 1, от параметров магнитной опоры

$$d\vec{F}_{12} = H_{\text{магн}2} h_2 \left[d\vec{l}_2 \times \mu H_{\text{магн}1} h_1 \frac{[d\vec{l}_1 \times \vec{\delta}]}{\delta^3} \right] \quad (2.12)$$

Преобразуя уравнение (2.12) получим

$$d\vec{F}_{12} = \mu H_{\text{магн}2} h_2 H_{\text{магн}1} h_1 \frac{[d\vec{l}_2 \times [d\vec{l}_1 \times \vec{\delta}]]}{\delta^3} \quad (2.13)$$

Аналогично получаем зависимость силы, действующей на магнит 1 со стороны магнита 2, от параметров магнитной опоры

$$d\vec{F}_{21} = \mu H_{\text{магн1}} h_1 H_{\text{магн2}} h_2 \frac{[d\vec{l}_1 \times [d\vec{l}_2 \times \vec{\delta}]]}{\delta^3} \quad (2.14)$$

Силы взаимодействия постоянных магнитов магнитной опоры $d\vec{F}_{12}$ и $d\vec{F}_{21}$ приведены на рисунке 2.1.

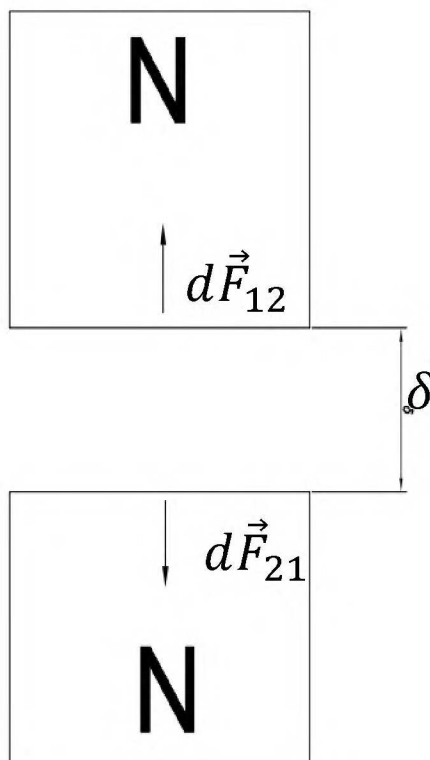


Рисунок 2.1 – Силы взаимодействия постоянных магнитов

Для удобства расчетов преобразуем уравнения (2.13) и (2.14) в скалярную форму записи. По правилам преобразования произведений векторов для магнита 1 получим

$$dF_{12} = \mu H_{\text{магн2}} h_2 H_{\text{магн1}} h_1 \frac{dl_2 \cdot (dl_1 \cdot \delta \cdot \sin \alpha_1) \cdot \sin \alpha_2}{\delta^3}, \quad (2.15)$$

где α_1 – угол между витком с током, эквивалентным периметру поверхности сечения магнита 1 и вектором зазора между поверхностями опоры,

α_2 – угол между витком с током, эквивалентным периметру поверхности сечения магнита 2 и вектором зазора между поверхностями опоры.

Скалярная форма записи для уравнения (2.14) для магнита 2 будет выглядеть аналогично

$$dF_{21} = \mu H_{\text{магн1}} h_1 H_{\text{магн2}} h_2 \frac{dl_1 \cdot (dl_2 \cdot \delta \cdot \sin \alpha_2) \cdot \sin \alpha_1}{\delta^3}. \quad (2.16)$$

Путем преобразования уравнений (2.15) и (2.16) получаем силу взаимодействия магнита 1 и магнита 2

$$dF_{12} = dF_{21} = \mu H_{\text{магн1}} H_{\text{магн2}} h_1 h_2 \frac{dl_2 \cdot dl_1 \cdot \sin \alpha_1 \cdot \sin \alpha_2}{\delta^2} \quad (2.17)$$

Уравнение (2.17) выражает зависимость силы взаимодействия 2-х магнитов вне зависимости от их взаимного расположения, магниты могут быть расположены перпендикулярно или под некоторым углом между осями намагничивания. В реальных же магнитных опорах подобные случаи не встречаются, так как магниты в них установлены разноименными полюсами друг к другу – для опор на силах тяжения, или одноименными полюсами друг к другу – для опор на силах отталкивания, и образуют равномерный по всей поверхности зазор.

Из вышеизложенного следует, что в магнитных опорах величина углов α_1, α_2 между витком с током, эквивалентным периметру поверхности сечения магнитов и вектором зазора между поверхностями опоры, составляет 90° , и уравнение (2.17) принимает следующий вид

$$dF_{12} = dF_{21} = \mu H_{\text{магн1}} H_{\text{магн2}} h_1 h_2 \frac{dl_2 \cdot dl_1}{\delta^2} \quad (2.18)$$

Уравнение (2.18) является математической моделью магнитной опоры на постоянных магнитах, которая справедлива как для опор на силах тяжения, так и для опор на силах отталкивания.

В современных технических устройствах магнитные опоры на постоянных магнитах используют в основном для одноосного подвеса тела с фиксацией остальных степеней свободы тела другими средствами. Использование двух- или трехосной опоры затруднительно из-за того, что на разных осях используются отдельные опоры, силы в которых действуют на соседнюю опору, вызывая неустойчивость подвижной части, и как следствие залипание или перекося.

Подобной проблемы лишена коническая магнитная опора на силах отталкивания, равнодействующая сил в которой действует в магнитном зазоре образованном коническими поверхностями опоры. Схема подобной опоры для электромеханического исполнительного органа представлена на рисунке 2.2 [52].

Для уточнения математической модели предлагаемой магнитной опоры определим показатель l – длину витка с током, эквивалентного периметру поверхности сечения магнита.

Для магнитов 1 и 2, образующих опору, показатели dl_1 и dl_2 будут равны

$$dl_1 = 2L_1 + \varphi(r_1 + r'_1), \quad (2.19)$$

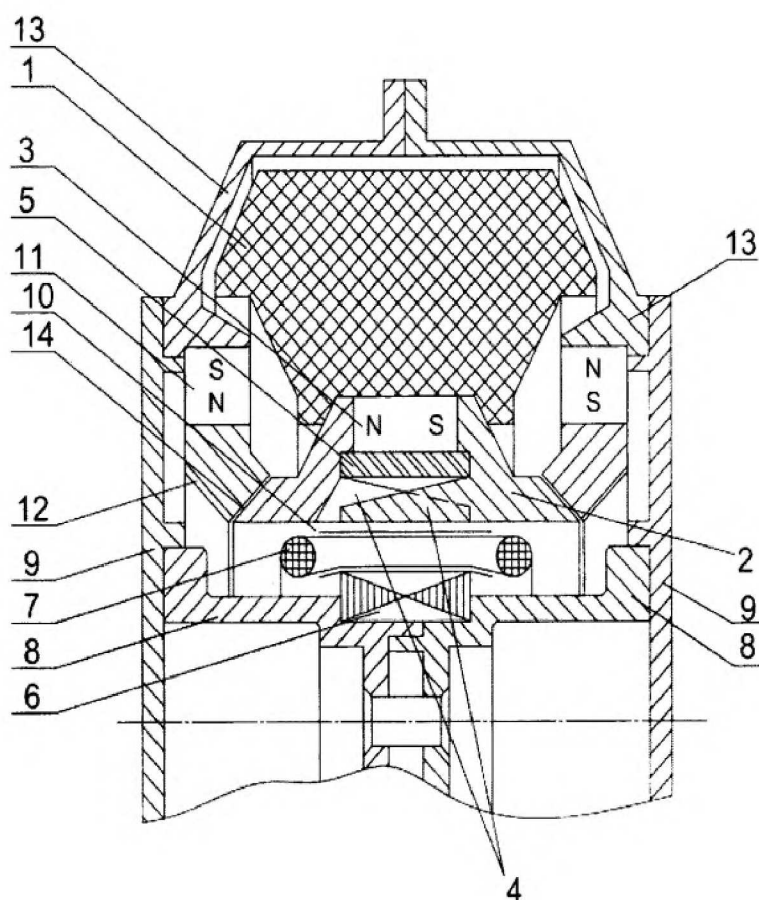
$$dl_2 = 2L_2 + \varphi(r_2 + r'_2), \quad (2.20)$$

где L_1, L_2 – образующие конических поверхностей, образующих опору;

r_1, r'_1 – радиусы соответственно большего и меньшего оснований конической поверхности магнита 1;

r_2, r'_2 – радиусы соответственно большего и меньшего оснований конической поверхности магнита 2;

φ – угол рассматриваемого сектора магнитной опоры, для всей поверхности магнита равен 2π .



1 – маховик, 2 – ротор обращенного электрического двигателя явнополюсного (когтевого) типа, 3 – постоянный магнит ротора электрического двигателя, 4 – «когти» полюсов двигателя, 5 – немагнитный материал, 6 – статор электрического двигателя, 7 – трехфазная обмотка статора электрического двигателя, 8 – немагнитные полуоси, 9 – торцевые крышки из немагнитного материала, 10 – немагнитный рабочий зазор, 11 – постоянные магниты, жестко закреплённые в торцевых крышках, 12 – полюсные наконечники постоянных магнитов, жестко закреплённых в торцевых крышках, 13 – ярмо из магнитомягкого материала, 14 – вспомогательные зазоры, имеющие форму усеченного конуса

Рисунок 2.2 – Электромеханический исполнительный орган системы ориентации с конической пассивной магнитной опорой

Из курса геометрии известна формула определения площади боковой поверхности усеченного конуса. Для магнитов 1 и 2 площади боковых поверхностей опоры можно выразить следующим образом

$$S_1 = \pi(r_1 + r'_1) \cdot L_1, \quad (2.21)$$

$$S_2 = \pi(r_2 + r'_2) \cdot L_2. \quad (2.22)$$

Для удобства расчетов и простоты понимания зависимости сил магнитного тяжения или отталкивания от параметров опоры, перейдем от показателей dl_1 и dl_2 к более простым показателям.

Для этого выразим показатели dl_1 и dl_2 через величины площадей поверхностей опоры S_1 и S_2

$$dl_1 = 2L_1 + \varphi \frac{S_1}{\pi L_1}, \quad (2.23)$$

$$dl_2 = 2L_2 + \varphi \frac{S_2}{\pi L_2} \quad (2.24)$$

Для всей поверхности опоры показатели l_1 и l_2 будут равны

$$l_1 = 2 \left(L_1 + \frac{S_1}{L_1} \right), \quad (2.25)$$

$$dl_2 = 2 \left(L_2 + \frac{S_2}{L_2} \right) \quad (2.26)$$

На основании вышеизложенного, математическая модель (2.18) конической магнитной опоры принимает вид.

Для элемента конической опоры сила взаимодействия магнитов, или механическая сила магнитного поля, равна

$$dF_{12} = dF_{21} = \mu H_{\text{магн1}} H_{\text{магн2}} h_1 h_2 \frac{\left(2L_1 + \varphi \frac{S_1}{\pi L_1}\right) \cdot \left(2L_2 + \varphi \frac{S_2}{\pi L_2}\right)}{\delta^2}. \quad (2.27)$$

Для всей поверхности конической опоры сила взаимодействия магнитов равна

$$F_{12} = F_{21} = 4\mu H_{\text{магн1}} H_{\text{магн2}} h_1 h_2 \frac{\left(L_1 + \frac{S_1}{L_1}\right) \cdot \left(L_2 + \frac{S_2}{L_2}\right)}{\delta^2}. \quad (2.28)$$

Уравнения (2.27) и (2.28) являются математической моделью магнитной опоры на постоянных магнитах с конической поверхностью.

2.3 Методика оценки работоспособности опоры

Основным критерием работоспособности магнитной опоры является сила магнитного отталкивания в опоре. Так как рассматриваемая опора выполнена на силах отталкивания, то зазор между коническими поверхностями никогда не будет равен нулю и будет иметь некое минимальное значение, при котором сила магнитного отталкивания будет настолько велика, что нарушит баланс магнитной опоры. Данную силу назовем предельной максимальной силой – F_{max} , а зазор назовем минимальным δ_{min} .

В то же время чрезмерное удаление составных частей магнитной опоры друг от друга вызовет ослабление магнитных сил отталкивание в опоре и потерю работоспособности опоры. Максимальный зазор δ_{max} при предельной минимальной силе F_{min} , является вторым ограничением при конструировании и функционировании магнитной опоры.

Области действия максимальных и минимальных механических сил магнитного поля при соответственно минимальных и максимальных зазорах, показаны на рисунке 2.3.

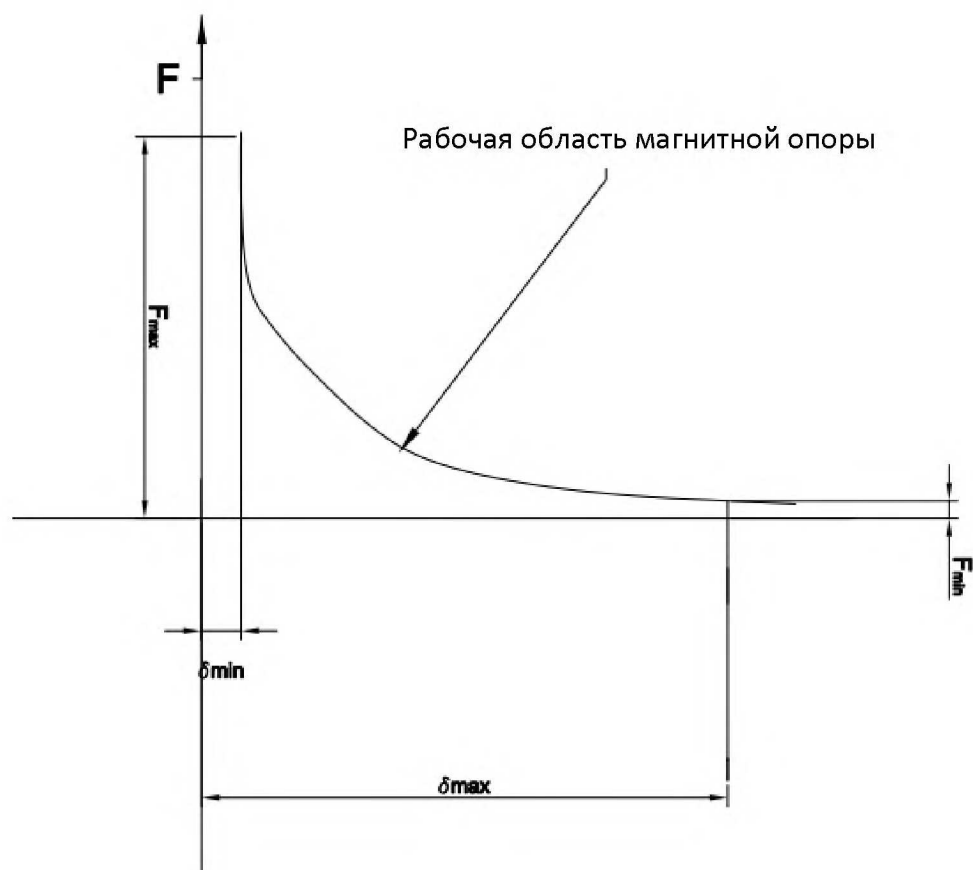


Рисунок 2.3 – График зависимости механической силы магнитного поля в опоре от величины зазора опоры

2.4 Выводы к главе 2

1 В разделе 2.1 сформировано факторное пространство для работы с математической моделью, приведены все математические обозначения, используемые во второй главе магистерской диссертации, приведена их размерность.

2 В разделе 2.2 разработана математическая модель опоры на силах отталкивания постоянных магнитов в общем виде и для конкретного исполнения конической магнитной опоры, выведена зависимость силы магнитного взаимодействия в опоре при одинаковом материале магнитов от зазора между магнитами и конструкции опоры.

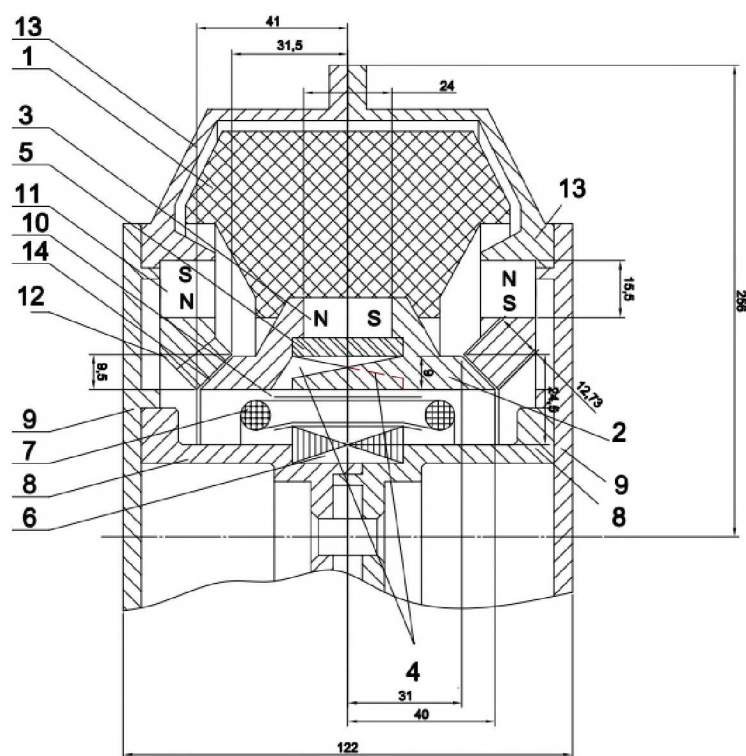
3 В разделе 2.3 разработана методика оценки работоспособности опоры. Определены ограничения для гарантированной работы магнитной опоры, определена рабочая область магнитной опоры, определены значения сил, при которых магнитная опора не может функционировать.

3 Экспериментальное подтверждение математической модели магнитной опоры

3.1 Описание магнитной опоры на постоянных магнитах

Известен электромеханический исполнительный орган системы ориентации космических аппаратов, выполненный на конической магнитной опоре на силах отталкивания постоянных магнитов. Электромеханический исполнительный орган системы ориентации изображен на рисунке 3.1 [52].

Электромеханический исполнительный орган системы ориентации содержит маховик 1, на внутренней поверхности которого неподвижно закреплён ротор 2 обращенного электрического двигателя явнополюсного (когтевого) типа. Электрический двигатель содержит ротор 2, постоянный магнит 3, отделенный от «когтей» полюсов 4 немагнитным материалом 5, статор 6 с трехфазной обмоткой 7. Статор неподвижно закреплен на оси, состоящей из 2-х полуосей 8, выполненных из немагнитного материала, и закрепленных в торцевых крышках 9, также выполненных из немагнитного материала. Статор 6 электрического двигателя отделен от ротора 2 немагнитным рабочим зазором 10, образованным внутренней цилиндрической поверхностью ротора 2 и обмоткой статора 6. Кроме того ЭМИО содержит два постоянных магнита 11, жестко закрепленных на торцевых крышках 9, которые снабжены полюсными наконечниками 12 и ярмами 13, выполненными из магнитомягкого материала. Между коническими поверхностями ротора 2 и полюсных наконечников 12 образованы вспомогательные зазоры 14, имеющие форму тонкостенного усеченного конуса. Постоянные магниты 11 расположены симметрично относительно центра масс ЭМИО и ориентированы таким образом, чтобы магнит 3, входящий в состав электрического двигателя, и магниты 11, были обращены к вспомогательным зазорам 14 одноименными полюсами.



1 – маховик, 2 – ротор обращенного электрического двигателя явнополюсного (когтевого) типа, 3 – постоянный магнит ротора электрического двигателя, 4 – «когти» полюсов двигателя, 5 – немагнитный материал, 6 – статор электрического двигателя, 7 – трехфазная обмотка статора электрического двигателя, 8 – немагнитные полуоси, 9 – торцевые крышки из немагнитного материала, 10 – немагнитный рабочий зазор, 11 – постоянные магниты, жестко закреплённые в торцевых крышках, 12 – полюсные наконечники постоянных магнитов, жестко закрепленных в торцевых крышках, 13 – ярмо из магнитомягкого материала, 14 – вспомогательные зазоры, имеющие форму усеченного конуса

Рисунок 3.1 – Электромеханический исполнительный орган системы ориентации

Маховик выполнен из неметаллического немагнитного материала, позволяющего получить высокое значение удельной энергии, в котором отсутствует возможность образования и протекания электрических токов и, соответственно, отсутствует возможность возникновения тормозного момента. В качестве такого материала могут быть использованы композитные материалы на базе углеволокна или углепластика.

Постоянный магнит 3 электрического двигателя и дополнительные постоянные магниты 11 выполнены из материала с высококоэрцитивными характеристиками, например из NdFeB [52].

Основные параметры элементов магнитной опоры электромеханического исполнительного органа системы ориентации космических аппаратов приведены в таблице 3.1. Значение коэрцитивной силы постоянного магнита NdFe30 $\vec{H}_{\text{магн}}$ выбрано из справочной литературы [42-43].

Таблица 3.1 – Основные параметры элементов магнитной опоры образца электромеханического исполнительного органа системы ориентации космических аппаратов

№ п/п	Наименование параметра	Значение параметра
1	Материал постоянного магнита NdFe30	
1.1	$\vec{H}_{\text{магн}}$ – напряженность магнитного поля в постоянном магните (коэрцитивная сила постоянного магнита), единица измерения – А/м	837999
2	Конструкция магнитной опоры	
2.1	h_1 – длина постоянного магнита неподвижной части опоры, единица измерения – мм	31
2.2.	h_2 – длина постоянного магнита подвижной части опоры, единица измерения – мм	24
2.3	L_1 – образующая конической поверхности неподвижной части опоры, единица измерения – мм;	9,5
2.4	L_2 – образующая конической поверхности подвижной части опоры, единица измерения – мм;	9
2.5	r_1 – радиус большего основания конической поверхности неподвижной части опоры , единица измерения – мм;	41
2.6	r'_1 – радиус меньшего оснований конической поверхности неподвижной части опоры , единица измерения – мм;	31,5
2.7	r_2 – большего основания конической поверхности подвижной части опоры , единица измерения – мм;	40
2.8	r'_2 – радиус меньшего оснований конической поверхности подвижной части опоры , единица измерения – мм;	31

3.2 Вычислительный эксперимент и анализ результатов

Для проверки адекватности математической модели конической опоры на постоянных магнитах произведем расчет действующих в опоре сил, используя выражение (2.28).

В связи с конструктивными особенностями приведенной в разделе 3.1 магнитной опоры, а именно одинаковыми материалами постоянных магнитов, а значит и одинаковыми коэрцитивными силами магнитов подвижной и неподвижной части опоры, выражение (2.28) можно привести к следующему виду

$$F_{12} = F_{21} = 4\mu H_{\text{магн}}^2 h_1 h_2 \frac{(L_1 + \frac{S_1}{L_1}) \cdot (L_2 + \frac{S_2}{L_2})}{\delta^2} \quad (3.1)$$

Для определения площадей конических поверхностей магнитной опоры воспользуемся формулами (2.21) и (2.22) подставляя в формулы значения из таблицы 3.1

$$S_1 = \pi(r_1 + r'_1) \cdot L_1 = \pi(41 + 31,5) \cdot 9,5 = 2162,675 \text{ мм}^2,$$

$$S_2 = \pi(r_2 + r'_2) \cdot L_2 = \pi(40 + 30,5) \cdot 9 = 2006,46 \text{ мм}^2,$$

где S_1 – площадь конической поверхности неподвижной части опоры,
 S_2 – площадь конической поверхности подвижной части опоры

Подставляя в формулу (3.28) ранее полученные значения S_1 и S_2 , и параметры опоры из таблицы 3.1 получаем следующее значение механической силы магнитного поля

$$F_{12} = F_{21} = 137,175 \frac{1}{\delta^2} \text{ Н} \quad (3.2)$$

На основании указанного выражения в программе MS Excel строим график зависимости механической силы магнитного поля от величины зазора между подвижной и неподвижной частями опоры, изображенный на рисунке 3.2.

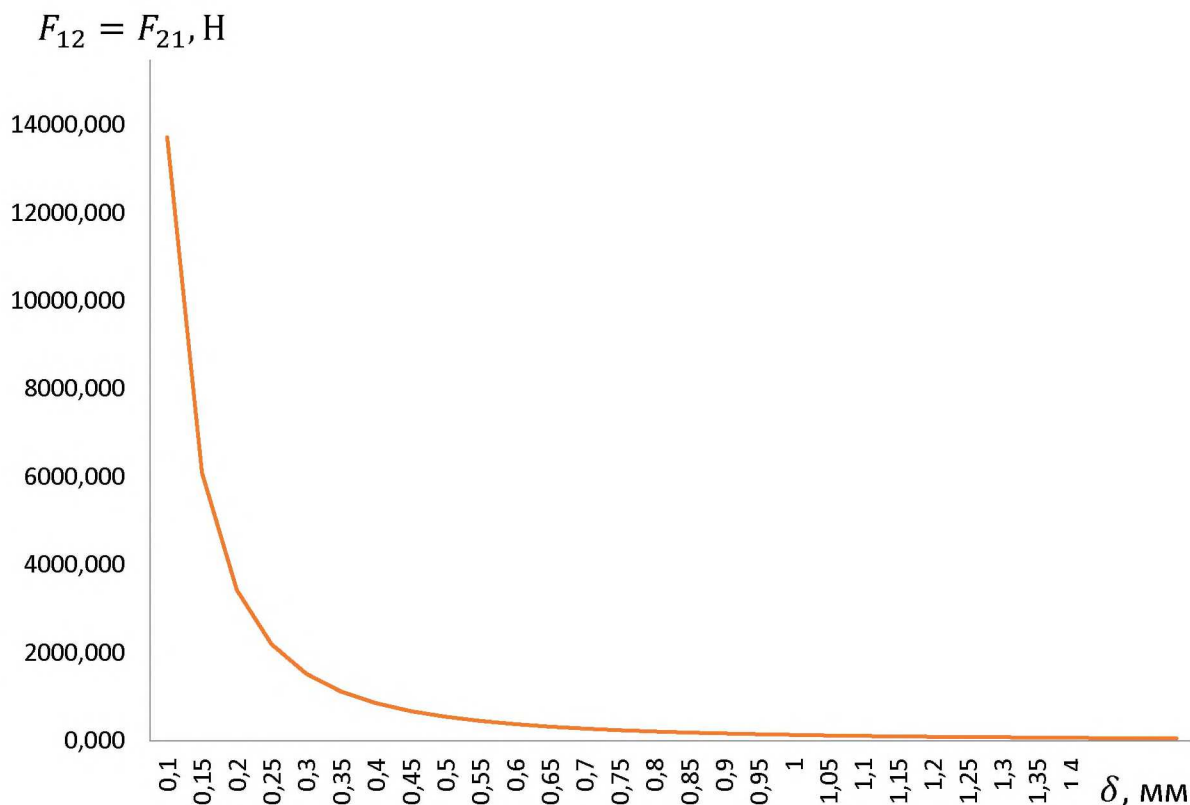


Рисунок 3.2 – График зависимости механической силы магнитного поля от величины зазора между подвижной и неподвижной частями опоры

3.3 Выводы к главе 3

1. В разделе 3.1 приведено описание реальной магнитной опоры на постоянных магнитах с габаритными размерами, необходимыми для проведения вычислительного эксперимента.

2. В разделе 3.2 проведен вычислительный эксперимент и проведен анализ результатов, который показал, что предлагаемая математическая модель адекватна и удовлетворяет условиям работоспособности магнитной опоры.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1 Опоры являются одним из важнейших узлов электромеханического исполнительного органа, так как от их работы зависит функционирование всего ЭМИО в целом. Наиболее перспективным типом опор является магнитная опора на постоянных магнитах, для которой до настоящего времени не было создано какой-либо математической модели для обоснования конструкторских решений при проектировании ЭМИО.

2 Для решения задачи обоснования конструкторских решений предлагается математическая модель конической опоры на силах отталкивания постоянных магнитов в части построения модели механической силы магнитного поля.

3 При проведении вычислительного эксперимента выявлено, что полученная модель адекватна и удовлетворяет требованиям к рабочей области магнитной опоры.

СПИСОК СОКРАЩЕНИЙ

КА – космический аппарат;

СОС – система ориентации и стабилизации;

ЭМИО – электромеханический исполнительный орган.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1 Чеботарев, В. Е. Основы проектирования космических аппаратов информационного назначения : учебное пособие / В. Е. Чеботарев. – Красноярск : Сиб. гос. аэрокосмич. ун-т, 2011. – 488 с.

2 Раушенбах, Б. В. Управление ориентацией космических аппаратов / Б. В. Раушенбах, Е. Н. Токарь. – Москва : Издательство «Наука», Главная редакция физико-математической литературы, 1974. – 600 с.

3 Дмитриев, В. С. Электромеханические исполнительные органы систем ориентации космических аппаратов. Часть 1 : учебное пособие / В. С. Дмитриев, Т. Г. Костюченко, Г. Н. Гладышев. – Томск : Издание Томского политехнического университета, 2013. – 208 с.

4 Холодилов, С. В. Перспективы повышения ресурсных характеристик электромеханического исполнительного органа космического аппарата / С. В. Холодилов // Вестник СибГАУ. – Т. 17, №3. – 2016. – С. 760–767.

5 Холодилов, С. В. Перспективы повышения ресурсных характеристик электромеханического исполнительного органа космического аппарата [Электронный ресурс] / С. В. Холодилов // Актуальные проблемы авиации и космонавтики. Материалы 12-й научно-практической конференции, посвящённой Дню Космонавтики. 10-15 апреля 2016 года г. Красноярск – Красноярск, 2016. – Т. 1. – С. 133–135.

6 Холодилов С. В. Перспективы повышения ресурсных характеристик электромеханического исполнительного органа космического аппарата / С. В. Холодилов // 15-я Международная конференция «Авиация и космонавтика – 2016». 14–18 ноября 2016 года. – Москва, 2016. – С. 431–432.

7 Холодилов, С. В. Закономерности выбора типа электромеханического исполнительного органа системы ориентации и стабилизации космического аппарата / С. В. Холодилов, В. А. Холодилова // Модернизация и технологическое развитие промышленности: Сборник статей по итогам Международной научно-практической конференции Уфа, 04 мая 2018 г. – Уфа, 2018. – С. 84–87.

8 Reaction wheel unite [Электронный ресурс] : Bradford Company. – Режим доступа: <http://bradford-space.com/products-aocs-reaction-wheel-unit.php>.

9 Продукция [Электронный ресурс] : АО Научно-исследовательский Институт Командных Приборов. – Режим доступа : <http://www.niikp.spb.ru>.

10 Rockwell Collins Deutschland RSD Teldix website [Электронный ресурс] : Electronic Note Space Systems L. L. C. – Режим доступа : <http://www.electronicnote.com/sitepage.php?p=10>.

11 High Motor Torque Momentum and Reaction Wheels [Электронный ресурс] : Rockwell Collins. – Режим доступа : <https://www.rockwellcollins.com/Products-and-Services/Defense/Platforms/Space/High-Motor-Torque-Momentum-and-Reaction-Wheels.aspx>.

12 Электромеханические исполнительные органы системы ориентации и стабилизации КА [Электронный ресурс]: АО «Научно-производственный центр «Полус». – Режим доступа : <http://polus.tomsknet.ru>.

13 Космические аппараты АО «ИСС» [Электронный ресурс] : АО «Информационные Спутниковые Системы» имени академика М. Ф. Решетнева». – Режим доступа : <http://www.iss-reshetnev.ru/spacecraft/>.

14 Каргу, Л. И. Системы угловой стабилизации космического аппарата / Л. И. Каргу. – Москва : Машиностроение, 1980. – 172 с.

15 Расчет и проектирование элементов гироскопических устройств / Н.Ф. Бабаева [и др]. – Ленинград : «Машиностроение», 1967. – 480с.

16 Ковалев, М. П. Опоры и подвесы гироскопических устройств : учебное пособие / М. П. Ковалев. – Москва : Машиностроение, 1970. – 288 с.

17 Малеев, П. И. Новые типы гироскопов / П. И. Малеев. – Ленинград : «Судостроение», 1971. – 160 с.

18 Тверяков, О. В. Исследование и разработка элементов конструкции одноосного силового стабилизатора с учетом динамики роторной системы. Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук : 01.02.06 / Олег Викторович Тверяков – Томск. – 178 с.

19 Прецизионные газовые подшипники / И. Е. Сипенков, А. Ю. Филиппов, Ю. Я. Болдырев, Б. С. Григорьев, Н. Д. Заблоцкий, Г. А. Лучин, Т. В. Панич ; под ред. А. Ю. Филиппова и И. Е. Сипенкова. – Санкт-Петербург : ГНЦ РФ ЦНИИ «Электроприбор», 2007. – 504 с.

20 Журавлев, Ю. Н. Активные магнитные подшипники. Теория, расчет и применение / Ю. Н. Журавлев. – Санкт-Петербург : Политехника, 2003. – 206 с.

21 Метлин, М. Б. Магнитные и магнитогидродинамические опоры / М. Б. Метлин ; под ред. А. И. Бертинова. – Москва : «Энергия», 1968. – 192 с.

22 Вышков, Ю. Д. Магнитные опоры в автоматике / Ю. Д. Вышков, В. И. Иванов. – Москва : Энергия, 1978. – 160 с.

23 Кацнельсон, О. Г. Магнитная подвеска / О. Г. Кацнельсон, А. С. Эдельштейн. – Москва-Ленинград : «Энергия», 1966. – 96 с.

24 Активные электромагнитные подшипники АО ВНИИЭМ [Электронный ресурс] : АО «Корпорация ВНИИЭМ». – Режим лоступа : http://www.vniiem.ru/ru/uploads/files/neftegaz/mpodves_buklet.pdf.

25 Systèmes magnétiques dans le secteur du pétrole et gaz [Электронный ресурс] : SKF. – Режим доступа : products/magnetic-systems/magnetic-systems-applications/oil-gas/index.html.

26 Верещагин, В. П. Опыт эксплуатации силовых гироскопов-гиродинов с магнитными опорами на орбитальном комплексе «Мир» / В. П. Верещагин, Д. М. Вейнберг, С. А. Стома // Труды ВНИИЭМ – Москва, 1997. – Т. 97. – С. 5–13.

27 А. с. 1394334 СССР, МПК⁴ Н 02 К 5/00, 7/09. Электромагнитный подвес двигателя-маховика / В. П. Лянзбург, А. Н. Бутаков, В. И. Эйрих (СССР). – № 4037905/24-07 ; заявл. 29.01.1986 ; опубл. 07.05.1988, Бюл. №17. – 3 с.

28 А. с. 1839912 СССР, МПК² В 64 G 1/00. Устройство для стабилизации космического аппарата / В. П. Лянзбург, А. Н. Бутаков, Ю. И. Юрьев (СССР). – №2233410/11 ; заявл. 13.03.1978 ; опубл. 20.06.2006, Бюл. №17. – 8 с.

29 А. с. 1840218 СССР, МПК⁴ Н 02 К 7/10. Кольцевой электродвигатель-маховик. / В. П. Лянзбург, Т. М. Гриднева (СССР). – №3142529/09 ; заявл. 31.03.1986 ; опубл. 10.08.2016, Бюл. №22. – 7 с.

30 А. с. 446748 СССР, МПК¹ G 01 C 19/24. Электромагнитный подвес / Е. А. Никитин, С. Ф. Коновалов, Ю. А. Осокин, В. Н. Герди, Н. Н. Станкевич (СССР). – №1817369/40-23 ; заявл. 02.08.1972 ; опубл. 15.10.1974, Бюл. №38. – 2 с.

31 А. с. 478998 СССР, МПК¹ G 01 C 19/24. Электромагнитный подвес / Е. А. Никитин, С. А. Шахов, А. М. Пудов, А. Н. Сорокин, В. Д. Поляков (СССР). – №1995059/40-23 ; заявл. 29.01.1974 ; опубл. 30.07.1975, Бюл. №28. – 2 с.

32 А. с. 614325 СССР № МПК² G 01 C 19/24. Электромагнитный подвес / Ю. А. Осокин, С. А. Шахов, А. М. Пудов, М. М. Лавриненко, В. Е. Скуратов (СССР). – №2040988/40-23 ; заявл. 05.07.1974 ; опубл. 05.07.1978, Бюл. №25. – 3 с.

33 А. с. 920375 СССР, МПК² G 01 C 19/24. Система магнитного подвеса ротора / В. А. Трегубов, В. П. Ларин, В. С. Ширинский, А. В. Сорокин, Н. И. Башкеев, А. В. Белозеров (СССР). – №2873064/40-23; заявл. 10.12.1979 ; опубл. 18.04.1982, Бюл. №14. – 3 с.

34 А. с. 964883 СССР, МПК³ Н 02 29/02. Электродвигатель-маховик с электромагнитным подвесом ротора. / Е. Н. Баранов (СССР). – №3260472/24-07 ; заявл. 16.03.1981 ; опубл. 07.10.1982, Бюл. №37. – 9 с.

35 Верещагин, В. П. Математическая модель магнитного подшипника / В. П. Верещагин, В. А. Клабуков // Вопросы электромеханики. Труды НИИ ВНИИЭМ. – Москва, ФГУП «НИИ ВНИИЭМ», 2009. – Т. 112, № 5. – С. 17–22.

36 Верещагин, В. П. Методика проектирования электромагнитных подшипников / В. П. Верещагин, А. В. Рогоза, Т. Н. Савинова. // Вопросы

электромеханики. Труды НПП ВНИИЭМ. – Москва, ФГУП «НПП ВНИИЭМ», 2009. – Т. 113, № 6. – С. 3–12.

37 В. П. Верещагин, В. А. Клабуков. Учёт вихревых токов в осевом магнитном подшипнике / В. П. Верещагин, В. А. Клабуков // Вопросы электромеханики. Труды НПП ВНИИЭМ. – Москва, ФГУП «НПП ВНИИЭМ», 2010. – Т. 119, № 6. – С. 3–8.

38 Верещагин, В. П. Математическая модель осевого магнитного подшипника с учетом вихревых токов / В. П. Верещагин, В. А. Клабуков // Вопросы электромеханики. Труды НПП ВНИИЭМ. – Москва, ФГУП «НПП ВНИИЭМ», 2011. – Т. 123, № 4. – С. 3–8.

39 ГОСТ 7262-78 Провода медные, изолированные лаком ВЛ-931. – Введ. 28.02.1978. – Москва : Издательство стандартов, 1991. – 19 с.

40 Мишин, Д. Д. Магнитные материалы : учебное пособие / Д. Д. Мишин. – Москва : Высшая школа, 1981. – 335 с.

41 Преображенский, А. А. Магнитные материалы и элементы : учебник / А. А. Преображенский. Москва : «Высшая школа», 1976. – 336 с.

42 ТУ 6391-002-55177547-2005 Магниты постоянные на основе сплава неодим-железо-бор марки Ч36Р. Технические условия – Взамен ТУ 48-4-543-90 ; введ. 22.01.2007. – Екатеринбург : Эко-Урал, 2007 – 63 с.

43 ГОСТ Р 52956-2008 Материалы магнитотвердые спеченные на основе сплава неодим-железо-бор. Классификация. Основные параметры. – Введ. 01.01.2009. – Москва : Стандартиформ, 2008. – 12 с.

44 Круг, К. А. Основы электротехники : учебник / К. А. Круг. – Москва-Ленинград : НКТП СССР, Объединенное научно-техническое издательство. Главная редакция энергетической литературы, 1936. – 888 с.

45 Арнольд, Р. Р. Расчет и проектирование систем с постоянными магнитами / Р. Р. Арнольд. – Москва : «Энергия», 1969. – 184 с.

46 Гордон, А. В. Электромагниты постоянного тока / А. В. Гордон, А. Г. Сливинская. – Москва-Ленинград : Государственное энергетическое издательство, 1960. – 447 с.

47 Коген-Далин, В. В. Расчет и испытание систем с постоянными магнитами / В. В. Коген-Далин, Е. В. Комаров. – Москва : «Энергия», 1977. – 248 с.

48 Косорез, В. В. Динамические системы магнитно-взаимодействующих свободных тел / В. В. Косорез. – Киев: Наук. думка, 1981. – 140 с.

49 Сливинская, А. Г. Электромагниты и постоянные магниты / А. Г. Сливинская. – Москва : «Энергия», 1972. – 248 с.

50 Тамм, И. Е. Основы теории электричества : учебное пособие / И. Е. Тамм. – Москва : ФИЗМАТЛИТ, 2003. – 616 с.

51 Теория и применение электромагнитных подвесов / Ю. А. Осокин, В. Н. Герди, К. А. Майков, Н. Н. Станкевич ; под ред. Б.А. Рябова. – Москва : Машиностроение, 1980. – 284 с.

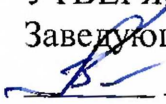
52 Пат. 2649560 Российская Федерация, МПК²⁰⁰⁹ В 64 G 1/00. Электромеханический исполнительный орган системы ориентации искусственного спутника Земли / С. В. Холодилов; заявитель и патентообладатель Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Сибирский государственный университет науки и технологий имени академика М. Ф. Решетнева». – №2016129593; заявл. 19.07.2016; опубл. 03.04.2018, Бюл. №10. – 10 с.

Федеральное государственное автономное
образовательное учреждение
высшего образования
«СИБИРСКИЙ ФЕДЕРАЛЬНЫЙ УНИВЕРСИТЕТ»

Институт космических и информационных технологий
институт
Межинститутская базовая кафедра
«Прикладная физика и космические технологии»
кафедра

УТВЕРЖДАЮ

Заведующий кафедрой

 В. Е. Косенко

подпись

инициалы, фамилия

« 18 » 06 2018 г.

МАГИСТЕРСКАЯ ДИССЕРТАЦИЯ

РАЗРАБОТКА МАТЕМАТИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ ОПОРЫ
ЭЛЕКТРОМЕХАНИЧЕСКОГО ИСПОЛНИТЕЛЬНОГО ОРГАНА СИСТЕМЫ
ОРИЕНТАЦИИ КОСМИЧЕСКОГО АППАРАТА НА БАЗЕ ПОСТОЯННЫХ
МАГНИТОВ

тема

27.04.03 «Системный анализ и управление»

код и наименование направления

27.04.03.06 «Основы проектирования космических аппаратов»

код и наименование магистерской программы

Научный руководитель


подпись, дата

18.06.18

профессор кафедры, д-р


техн. наук

должность, ученая степень

В. И. Кудымов

инициалы, фамилия

Выпускник

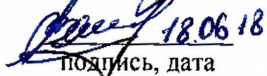

подпись, дата

18.06.18

С. В. Холодилов

инициалы, фамилия

Рецензент


подпись, дата

18.06.18

инженер-конструктор

3-й кат АО «ИСС»,

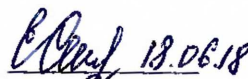
канд техн. наук

должность, ученая степень

В. Р. Боев

инициалы, фамилия

Нормоконтролер


подпись, дата

18.06.18

Е. С. Сидорова

инициалы, фамилия

Красноярск 2018

Ы
О
зе
Ы
Ы
Х
И
Х
а
Х
Н
И
И