

На правах рукописи



УЛЬЯНОВ АЛЕКСАНДР ВЛАДИМИРОВИЧ

**РАЗРАБОТКА И ИССЛЕДОВАНИЕ ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКОГО КОМПЛЕКСА  
ГАЗОМАГНИТНЫХ ОПОР ВЫСОКОСКОРОСТНОГО ЭЛЕКТРООБОРУДОВАНИЯ**

Специальность 05.09.03 – Электротехнические комплексы и системы

**АВТОРЕФЕРАТ**  
диссертации на соискание ученой степени  
кандидата технических наук

Комсомольск-на-Амуре - 2016

Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Комсомольский-на-Амуре государственный технический университет» (ФГБОУ ВО «КнАГТУ»)

**Научный руководитель:**

Копытов Сергей Михайлович,  
кандидат технических наук, доцент.

**Официальные оппоненты:**

Макаричев Юрий Александрович,  
доктор технических наук, доцент, заведующий кафедрой "Электромеханика и автомобильное электрооборудование" ФГБОУ ВО "Самарский государственный технический университет";

Шельмакова Наталья Сергеевна,  
к.т.н., инженер-проектировщик отдела проектирования ПП ЭТС МУПВ "ВПЭС".

**Ведущая организация:**

ФГАОУ ВО "Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина".

Защита состоится «31» октября 2016 г. в 12 час. 00 мин., на заседании диссертационного совета Д 999.086.03 в ФГБОУ ВО «Комсомольский-на-Амуре государственный технический университет» по адресу: 681013, г. Комсомольск-на-Амуре, пр. Ленина, д. 27, ауд. 201/3.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке и на официальном сайте ФГБОУ ВО «КнАГТУ», [http://sovnet.knastu.ru/diss\\_defense/](http://sovnet.knastu.ru/diss_defense/).

Отзывы по данной работе в двух экземплярах, заверенные печатью, просим направлять по адресу Россия, г. Комсомольск-на-Амуре, пр. Ленина, д. 27, Комсомольский-на-Амуре государственный технический университет, ученому секретарю диссертационного совета Д 999.086.03, e-mail: [kepapu@knastu.ru](mailto:kepapu@knastu.ru).

Автореферат разослан « \_\_ » \_\_\_\_\_ 20\_\_\_\_ г.

Ученый секретарь диссертационного совета  
Д 999.086.03 кандидат технических наук, доцент

А.С. Гудим

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

**Актуальность темы.** С увеличением скорости вращения и мощности высокоскоростного электрооборудования (электродвигателей, генераторов, турбин и т.д.) при одновременной тенденции к уменьшению его массовых и габаритных показателей на первый план выходит проблема обеспечения параметрической надежности подшипниковых узлов.

Традиционно в высокоскоростном электрооборудовании используют подшипники качения. Однако физический принцип работы таких опор ограничивает их быстроходность. Альтернативой подшипникам качения являются гидростатические подшипники, но их применение на высоких скоростях ограничено высоким тепловыделением. Бесконтактные опоры на газовой смазке обеспечивают высокие скорости вращения, однако их недостатком является сравнительно низкая несущая способность. К бесконтактным быстроходным опорам относят также активные магнитные подшипники (АМП). Недостатками АМП являются низкая надежность вследствие возможности контакта ротора с магнитными полюсами статора и необходимость иметь страховочный механический подшипник.

Использование бесконтактных газомангнитных опор (ГМО), сочетающих в себе газовый и магнитный подвес, позволяет повысить несущую способность подшипниковых узлов, существенно увеличить жесткость и точность позиционирования ротора, что особенно важно в высокоскоростном электрооборудовании, защитить магнитный подвес страховочным газовым подвесом в случае аварийных ситуаций.

Следовательно, проблема создания электротехнического комплекса ГМО высокоскоростного электрооборудования является актуальной, а для ее реализации требуется решить следующие задачи: разработать конструкцию опоры с низким магнитным торможением, выполнить ее математическое моделирование и синтезировать структурную схему системы управления, осуществить техническую реализацию последней на базе современной цифровой техники, провести экспериментальные исследования ГМО.

**Целью диссертационной работы** является разработка электротехнического комплекса ГМО путем создания ее электротехнической части и СУ.

### **Задачи исследования:**

- анализ известных технических разработок бесконтактных опор и обоснование целесообразности применения управляемых ГМО для роторов высокоскоростного электрооборудования;
- разработка конструкций ГМО с низким магнитным торможением;
- выполнение математического моделирования ГМО как объекта управления и синтез структурной схемы системы управления ГМО;
- техническая реализация СУ средствами программируемой цифровой техники;
- экспериментальные исследования ГМО с предложенной СУ.

**Объектом исследования** является электромагнитный подвес как управляемая активная часть ГМО высокоскоростного электрооборудования, работающий во взаимодействии с газостатическим подвесом.

**Методы исследования** включают аналитические и численные методы электромагнитных расчетов, синтеза и анализа систем автоматического управления, методы разработки электрических цепей, микроэлектронных и микропроцессорных устройств. Используются современные пакеты прикладного программного обеспечения ANSYS, Matlab, LabVIEW, MathCAD. Экспериментальные исследования проведены на модернизированных автором стендах.

**Достоверность полученных результатов** подтверждена корректным использованием методов математического моделирования. Проведенные испытания на экспериментальном стенде подтверждают работоспособность исследуемой ГМО и СУ.

**Научная новизна** полученных автором результатов заключается в следующем:

- предложен принцип построения электротехнического комплекса ГМО, обеспечивающий повышенную несущую способность и точность позиционирования ротора;
- предложена СУ электромагнитной составляющей ГМО и синтезированы параметры регулятора с учетом газовой составляющей;
- выявлено распределение магнитной индукции в магнитной цепи ГМО, обеспечивающее малое магнитное торможение;
- получены результаты экспериментальных исследований, подтверждающие эффективность работы предложенного электротехнического комплекса ГМО.

**Практическая ценность** работы заключается в том, что предложены СУ и конструкции электромеханической части ГМО, на которые получены патенты № 2545146, №135747, №134260. Предложен алгоритм проектирования СУ ГМО. Разработаны цифровая СУ ГМО на базе ПЛИС, а также опытный образец ГМО с низким магнитным торможением. Предложен алгоритм по устранению ошибки измерения зазора из-за отклонения формы вала (свидетельство о гос. регистр. прогр. для ЭВМ № №2013617434) и программа построения годографа ротора (свидетельство о гос. регистр. прогр. для ЭВМ № 2012660515).

Работа выполнена при поддержке гранта № 14.В37.21.0449 «Совершенствование металлорежущих станков путем внедрения в их конструкцию сверхпрецизионных высокоскоростных шпиндельных узлов на бесконтактных опорах для обработки ответственных деталей силовых и вспомогательных установок кораблей и объектов океанотехники».

#### **Реализация результатов работы.**

СУ для опытно-промышленного образца высокоскоростного электрошпинделя на ГМО внедрена в производство в ПАО «Амурский судостроительный завод» (г. Комсомольск-на-Амуре). Результаты работы используются также в учебном процессе на кафедре «Промышленная электроника» ФГБОУ ВПО «КНАГТУ».

**Личный вклад автора** состоит в проведении анализа современных конструкций управляемых бесконтактных опор, в разработке методики расчета тягового усилия ГМО, в разработке структуры СУ и алгоритма устранения ошибки измерения зазора из-за отклонения формы ротора, в определении зависимостей для нахождения коэффициентов ПИД регулятора, в разработке алгоритма управления ГМО. Автором выполнен весь комплекс физических и численных экспериментов, а также обработка и анализ полученных результатов.

#### **На защиту выносятся:**

- конструктивные схемы ГМО;
- результаты моделирования распределения магнитной индукции в магнитной цепи ГМО;
- методика определения тягового усилия ГМО;
- описание электротехнической части ГМО как объекта управления;
- алгоритм устранения ошибки измерения зазора из-за отклонения формы ротора;
- структура электротехнического комплекса ГМО;
- алгоритм проектирования СУ для ГМО;
- результаты экспериментальных исследований электротехнического комплекса ГМО.

#### **Апробация результатов исследований и разработок.** Материалы работы доложены:

- на конференции North Charleston, SC, USA: CreateSpace, 2014;
- на XXI международной заочной научно-практической конференции «Научная дискуссия: вопросы технических наук», г. Москва, 2014 г.;
- на III Международной научной конференции «Современные тенденции технических наук», г. Казань, 2014 г.;
- на международной научно-практической конференции студентов, аспирантов и молодых учёных «Наука XXI века: новый подход», г. Санкт-Петербург, 2014 г.;
- на XVII конкурсе молодых учёных и аспирантов Хабаровского края, г. Хабаровск, 2015 г.;

- на конкурсе научно-исследовательских работ аспирантов и молодых ученых Комсомольского-на-Амуре государственного технического университета, г. Комсомольск-на-Амуре, 2013 г.

**Публикации по теме диссертации:** по теме диссертации опубликовано 15 работ, 4 из которых в журналах, рекомендованных ВАК, 6 в научно-технических журналах и сборниках, 3 патента и 2 свидетельства о регистрации программ для ЭВМ.

**Структура и объем работы.** Диссертационная работа состоит из введения, четырёх глав, общих выводов, библиографического списка, включающего 110 наименования, а также 2 приложений. Работа изложена на 161 страницах и включает 94 рисунка, 5 таблиц.

## СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

**Во введении** обоснована актуальность темы диссертации, определены объект и предмет исследования. Сформулирована цель и изложены задачи исследования, приведены основные положения, выносимые на защиту, их научная новизна, приведены основные результаты работы, их теоретическая и практическая значимость. Дана общая характеристика работы, отражены апробация и внедрение результатов диссертации.

**В первой главе** выполнен обзор современного состояния в области бесконтактных опор высокоскоростного электрооборудования, проанализированы преимущества и недостатки электромагнитных, газовых и газомангнитных опор. Сделан вывод, что для улучшения эксплуатационных характеристик ГМО необходима разработка электротехнического комплекса, включающего электромеханическую часть, объединяющую газостатический и магнитный подвес, и СУ электромагнитными силами опоры.

Современный уровень развития электротехники позволил реализовать управляемые АМП, требующие обратной связи по положению вала и СУ токами в силовых электромагнитах. В радиальных АМП малой грузоподъемности применяют явнополюсные магнитные системы электромагнитного привода, чаще всего систему с внешним индуктором. В большинстве случаев число витков катушек полюсов одинаково. Часто используется подшипник, в котором внешняя сила, действующая на вал, имеет постоянную составляющую, например силу тяжести, существенно превышающую остальные воздействия. В этом случае предлагается один или несколько полюсов сделать более мощными, увеличивая число витков. Токи в катушках направлены так, что полюса чередуются, как в машинах постоянного тока.

Второй тип АМП с сосредоточенными обмотками имеет магнитопроводы с независимыми полюсами. В такой конструкции магнитные потоки токовых зон практически не зависят от соседних, так как не имеют общих ферромагнитных путей для их замыкания. Типичные рабочие зазоры в АМП составляют сотни микрон, что примерно на порядок больше, чем используемые в газовых подшипниках с соизмеримым диаметром вала.

Особенностями применения АМП являются необходимость использования страховочных контактных подшипников и возрастание потерь из-за магнитного торможения при увеличении скорости вращения в случае использования проводящего вала.

Экспериментальные исследования показывают, что газостатические подшипники обладают повышенными жесткостью смазочного слоя, несущей и демпфирующей способностью, менее склонны к потере устойчивости по сравнению с другими конструкциями газовых подшипников. При этом газостатические подшипники по принципу работы являются самоцентрирующимися из-за появления разности давлений при смещении вала в корпусе подшипника, поскольку давление в утончаемой части зазора увеличивается, а в утолщаемой – уменьшается. Поэтому такие подшипники в общем случае не требуют внешнего управления. Особенностью газовых подшипников по сравнению с другими бесконтактными опорами является малый средний радиальный зазор. Недостатками газостатических подшипников являются сравнительно низкие несущая способность и жесткость смазочного слоя.

Для улучшения характеристик газостатических опор разрабатываются достаточно сложные СУ давлением газа. Например, исследователи А.А. Белуков и Г.П. Степанов предложили конструкцию управляемой газовой опоры, в которой высоковольтные управляющие сигналы поступают на пакеты пьезопластин, выполняющие функции привода заслонки в пьезоэлектрических управляемых дросселях для дозирования расхода газовой смазки в опоре.

С целью увеличения несущей способности, жесткости и точности вращения ротора еще в 1964 г. Г.З. Шнайдер выдвинул идею создания неуправляемого асимметричного газоманнитного подвеса. Совмещение газовых и магнитных сил в одной опоре помогло повысить динамическую устойчивость, уменьшить энергоемкость и обеспечить высокую надежность.

Дальнейшее увеличение несущей способности, повышение жесткости и точности вращения вала может быть достигнуто путем разработки комбинированной ГМО с управляемой магнитной частью. В трудах А.В. Космынина и В.С. Щетинина предложена конструкция управляемой осесимметричной ГМО, которая устраняет часть отмеченных недостатков газовых и активных магнитных подшипников, однако параметры предложенной опоры ухудшают отсутствие замкнутых магнитопроводов и проблема магнитного торможения из-за генерации вихревых токов в вале.

Использование СУ АМП в ГМО малоэффективно, так как рабочий зазор в ГМО на порядок меньше чем в АМП. Например, при диаметре вала 50 мм рабочий зазор в газовой части опоры составляет 50 мкм. Помимо этого требуется учитывать действие на ротор газовых сил. Поэтому необходим синтез СУ с учетом совместной работы газовой и магнитной частей.

Следовательно, разработка электротехнического комплекса ГМО высокоскоростного электрооборудования, включающего электромеханическую часть, объединяющую газостатический и магнитный подвес, и СУ электромагнитными силами опоры, позволит обеспечить пониженное магнитное торможение, повышенную несущую способность и точность позиционирования ротора.

**Во второй главе** рассмотрена электромеханическая часть электротехнического комплекса ГМО. Проанализировано действие газовых и магнитных сил на ротор, установленный на ГМО, разработана методика расчета тягового усилия ГМО с учетом совместного действия газовых и магнитных сил. С учетом сохранения оптимальной структуры газовой части опоры предложены варианты компоновочных схем ГМО и произведен выбор схемы для использования в высокоскоростном электрооборудовании, проведено моделирование магнитной части опоры в среде Ansoft Maxwell. Получено аналитическое описание ГМО как объекта управления.

В единой конструкции объединены самоцентрирующаяся газостатическая и активная магнитная части таким образом, чтобы полностью сохранить их структуры, используемые в моноопорах, и в то же время получить гибрид, обладающий новыми свойствами.

Исходя из необходимости пространственной локализации газовых и магнитных сил на общем участке, сохранения оптимальной структуры газовой части опоры, увеличения рабочей площади полюсов электромагнитов предложены два варианта компоновочных схем радиальных ГМО - с поперечным и продольным расположением магнитопроводов. Варианты конструкций ГМО разработаны в среде T-FLEX CAD и исследованы в пакете Ansoft Maxwell. Недостатком ГМО с поперечным расположением магнитопроводов является повышенное магнитное торможение, вызванное вихревыми токами, наводимыми в проводящем роторе, и его нагрев.

ГМО с продольным расположением магнитопроводов имеют пониженное магнитное торможение. Разработаны варианты опор с Ш-образными и П-образными магнитопроводами. Недостатком конструкции с Ш-образными магнитопроводами является сложность технической реализации, связанная со встраиванием средних стержней магнитопроводов в герметичную газовую часть. Сравнительно легко технологически реализуема конструкция с П-образными продольными магнитопроводами, представленная на рис. 1.

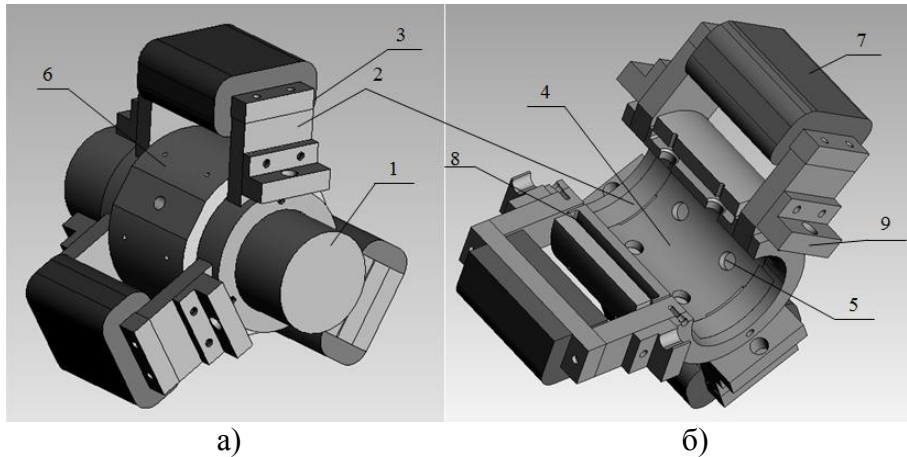


Рис. 1. ГМО с продольным расположением трех П-образных магнитопроводов:  
а) внешний вид, б) разрез опоры.

1 – вал; 2 – полюса и 3 – ярмо электромагнита; 4 – вкладыш газового подшипника;  
5 – отверстия для пористых вставок; 6 – рубашка газового подшипника; 7 – обмотка электромагнита; 8 – камера для подачи газа; 9 – крепления датчиков зазора

Опора имеет три П-образных магнитопровода, охватывающих газостатический подшипник и размещенных вдоль оси вала. Полюса электромагнитов пространственно раздвинуты на 120 градусов по отношению друг к другу. Соосно с каждым электромагнитом установлен вихретоковый датчик зазора. Выбор трех магнитопроводов обусловлен получением максимальной рабочей площади полюсов при сохранении возможности получения вектора магнитной тяги в необходимом радиальном направлении. Так использование трех электромагнитов позволяет увеличить рабочую площадь полюса, соответствующую углу 120 градусов, примерно на 8% по сравнению с конструкцией с четырьмя электромагнитами, рабочая площадь полюса которой соответствует углу 90 градусов. В случае работы одного электромагнита для уравнивания противоположно направленной возмущающей силы будет задействовано примерно 33% ресурсов магнитной части опоры с тремя электромагнитами по сравнению с 25% ресурсов опоры с четырьмя электромагнитами.

Эскиз ГМО с продольным расположением трех магнитопроводов представлен на рис. 2.

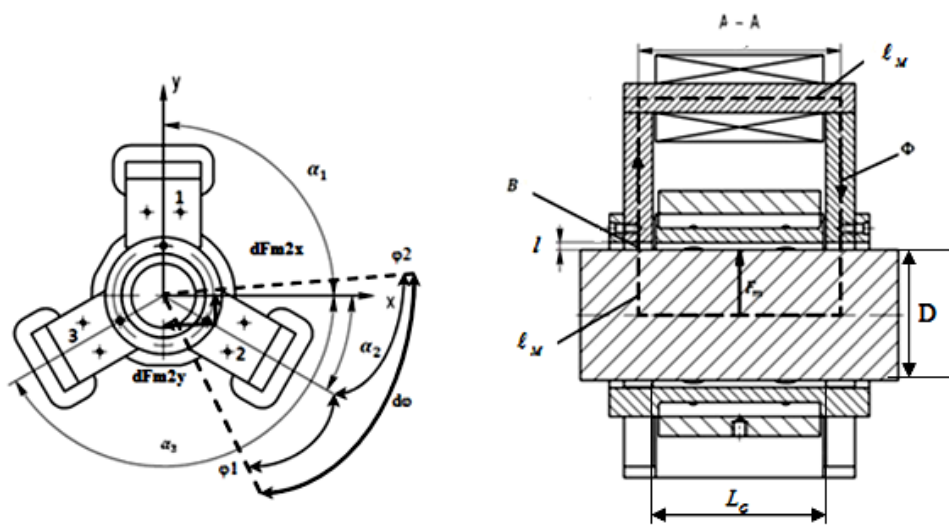


Рис. 2. Эскиз ГМО с продольным расположением трех магнитопроводов.  
1, 2, 3 - полюса электромагнитов,  $\alpha_1, \alpha_2, \alpha_3$  - угловое положение магнитов относительно оси OX,  $\varphi_1, \varphi_2$  - углы ограничения дуги полюса электромагнита

Так как отношение толщины зазора в магнитной части  $l$  к линейным размерам сечения полюса магнитопровода мало, можно принять допущение об однородности магнитного поля в зазоре между полюсом и валом, а также можно пренебречь потоками рассеяния и полями выпучивания.

Тяговое усилие электромагнита и газостатическую силу можно определить следующим образом. Индуктивность обмотки одного электромагнита:  $L = \mu_0 \cdot N^2 \cdot S / (2l)$ , где  $\mu_0$  - магнитная постоянная,  $N$  - число витков в обмотке электромагнита,  $S$  - площадь полюса электромагнита,  $l$  - воздушный зазор в магнитной части ГМО.

Энергия, запасенная в катушке индуктивности,

$$W = L \cdot i^2 / 2 = \mu_0 \cdot N^2 \cdot S \cdot i^2 / (4l^2),$$

где  $i$  - ток в обмотке электромагнита.

Магнитную силу, действующую на ротор, можно получить, дифференцируя выражение для энергии, запасенной в катушке индуктивности, по зазору:

$$F_M = \frac{\partial W}{\partial l} = \frac{\mu_0 \cdot N^2 \cdot S}{4} \cdot \left(\frac{i}{l}\right)^2. \quad (1)$$

Количественно оценить магнитное тяговое усилие, создаваемое полюсами 1, 2, 3 по осям ОУ и ОХ, можно интегральной суммой проекций элементарных сил на эти оси:

$$\begin{cases} F_{m1oy} = C_k \cdot \left(\frac{i}{l}\right)^2 \\ F_{m2oy} = C_k \cdot \left(\frac{i}{l}\right)^2 \cdot \left(\int_{\varphi_1}^{\varphi_2} \sin(\varphi) d\varphi\right) \\ F_{m3oy} = C_k \cdot \left(\frac{i}{l}\right)^2 \cdot \left(\int_{\varphi_1}^{\varphi_2} \sin(\varphi) d\varphi\right) \end{cases} \quad \begin{cases} F_{m2ox} = C_k \cdot \left(\frac{i}{l}\right)^2 \cdot \left(\int_{\varphi_1}^{\varphi_2} \cos(\varphi) d\varphi\right) \\ F_{m3ox} = C_k \cdot \left(\frac{i}{l}\right)^2 \cdot \left(\int_{\varphi_1}^{\varphi_2} \cos(\varphi) d\varphi\right) \end{cases}$$

где  $C_k = \mu_0 \cdot N^2 \cdot S / 4 = L \cdot l / 2$  - конструктивный параметр, зависящий от параметров электромагнита,  $L$  - индуктивность обмотки электромагнита.

Ротор в ГМО удерживают магнитная  $F_M$  и газовая  $F_G$  силы, а выводят его из равновесия сила тяжести и внешняя возмущающая сила:

$$m \frac{d^2 l}{dt^2} = \frac{\mu_0 \cdot N^2 \cdot S}{4} \cdot \left(\frac{i}{l}\right)^2 + F_G - mg \pm G, \quad (2)$$

где  $m$  - масса вала,  $\frac{d^2 l}{dt^2}$  - ускорение вала,  $G$  - внешняя сила.

Несущая способность газовой части ГМО пропорциональна смещению вала:

$$F_G = k_G \cdot \Delta l = k_G \cdot \varepsilon \cdot \delta_G, \quad (3)$$

где  $k_G$  - коэффициент, связывающий газовую силу и перемещение ротора,  $\Delta l$  - смещение оси ротора относительно оси опоры,  $\varepsilon$  - относительный эксцентриситет ротора в опоре,  $\delta_G$  - средний радиальный зазор в газовой части.

Под относительным эксцентриситетом понимают отношение смещения ротора от центрального положения к среднему радиальному зазору в газовой части опоры. Проведенные исследования газостатических опор показали, что в этих опорах с ростом относительного эксцентриситета увеличивается точность позиционирования вала, что важно для высокоскоростного электрооборудования, применяемого в машиностроении.

Максимальное усилие, создаваемое магнитной частью, должно быть соизмеримо с максимальной несущей способностью газовой части  $F_{max.G}$ :



$$F_M = F_{\max.G} = L_G D (p_s - p_a),$$

где  $L_G$  - длина газового подшипника,  $D$  - диаметр вала,  $p_s$  - абсолютное давление наддува газа,  $p_a$  - атмосферное давление.

С увеличением эксцентриситета несущая способность газовой части практически линейно растет в соответствии с выражением (3) и при значении относительного эксцентриситета 0,6 составляет около 300 Н. Дальнейшее увеличение эксцентриситета опасно из-за возможности касания вращающимся ротором вкладыша газовой части опоры. Магнитная часть, благодаря возможности управления, поддерживает заданный эксцентриситет газовой части.

Для подтверждения адекватности полученных выражений проведено моделирование в программе Ansoft Maxwell тягового усилия электромагнита в зависимости от тока при относительном эксцентриситете 0,6 (рис. 3).

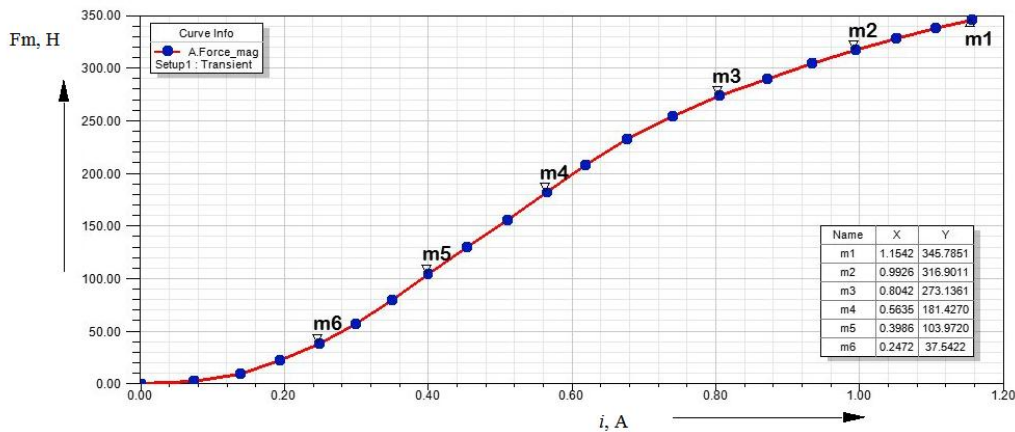


Рис. 3. Зависимость тягового усилия электромагнита от тока в обмотке

Анализ полученной зависимости показывает, что при токах до 0,4 А усилие растет по квадратичной параболе и соответствует выражению (1), затем его рост замедляется, что связано с постепенным насыщением магнитопровода. При токе в обмотке 1,154 А тяговое усилие электромагнита составляет 345,8 Н. Полученная зависимость показывает, что повышать ток в обмотке выше 1,15 А нецелесообразно.

С целью проверки отсутствия насыщения магнитной части проведено моделирование и выявлено распределение магнитной индукции в деталях магнитной цепи ГМО, приведенное на рис. 4.

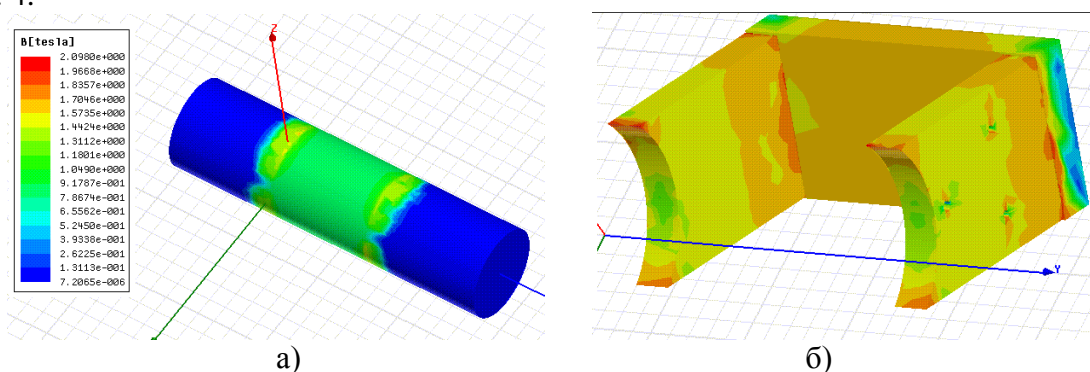


Рис. 4. Распределение магнитной индукции в деталях магнитной цепи ГМО при токе в обмотке 1,154 А и относительном эксцентриситете 0,6:

а) в роторе между полюсами электромагнитов; б) в магнитопроводе электромагнита

Из результатов моделирования следует, что магнитная индукция относительно равномерно распределена в магнитной цепи опоры, насыщение магнитопровода при токе в обмот-

ке 1,154 А не происходит. В опытной опоре использованы цельные элементы магнитопровода из электротехнической стали. Для минимизации вихревых токов, потерь мощности, нагрева в стали и улучшения динамических свойств магнитной части целесообразно магнитопровод выполнять шихтованным.

Совмещение магнитного и газового усилий в соответствии с выражением (2) увеличивает несущую способность опоры благодаря сложению векторов магнитной и газовой силы и позволяет за счет управления магнитной силой выводить вал в опоре на требуемый эксцентриситет. Магнитная часть является страховочной для газовой части, пока вал не выйдет на заданный эксцентриситет. В свою очередь, газовая часть страхует электромагнитную в случае неполадок в последней.

При удержании магнитной частью заданного эксцентриситета ротора изменения тока в обмотках относительно малы. В этом случае описание сил, действующих на ротор (2), можно записать в линейном виде, если линеаризовать электромагнитное усилие (1) в опоре:

$$mp^2 - (k_i \cdot i + k_l \cdot l) - k_G \cdot l + mg \pm G = 0,$$

где  $k_i = dF_M/di = 2 \cdot i_0 \cdot C_k / (l_0 - l_{cm})^2$  - коэффициент, связывающий магнитную силу и ток,  $k_l = dF_M/dl = -2 \cdot i_0^2 \cdot C_k / (l_0 - l_{cm})^3$  - коэффициент, связывающий магнитную силу и перемещение ротора,  $l_{cm}$  - заданное смещение в магнитной части ГМО,  $l_0$  - радиальный магнитный зазор.

Выводы по главе:

1. Предложены и исследованы компоновочные схемы ГМО.
2. Получены выражения для расчета тягового усилия ГМО при малых зазорах в опоре, адекватность которых проверена в среде электромагнитных расчетов Ansoft Maxwell.
3. Разработаны и исследованы конструкции ГМО с учетом снижения магнитного торможения. Выявлено, что магнитную систему требуется выполнять раздельной и продольной.
4. Проведено исследование ГМО в среде Ansoft Maxwell при совместном действии газовой и магнитной силы. Выявлено распределение магнитной индукции в магнитной цепи, показывающее, что при токе в обмотке 1,15 А магнитная цепь не насыщена, следовательно, подшипник управляем.

**В третьей главе** рассмотрен синтез СУ, которая входит в состав электротехнического комплекса ГМО, проведено ее исследование, предложен алгоритм проектирования СУ. Определены выражения для нахождения коэффициентов регулятора. СУ исследована на устойчивость и точность. Предложен алгоритм устранения ошибки измерения зазора в ГМО. Приведена и исследована компьютерная модель СУ.

Для ГМО с тремя электромагнитами предложена СУ, функциональная схема которой вместе с объектом управления представлена на рис. 5.

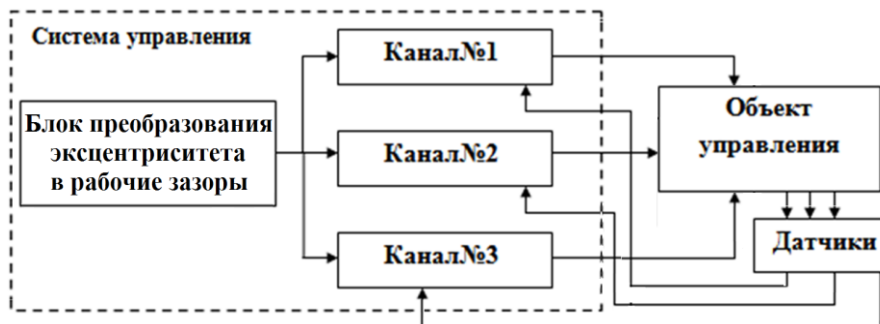


Рис. 5. Функциональная схема СУ ГМО вместе с объектом управления

СУ является трехканальной с общим блоком преобразования эксцентриситета в рабочие зазоры. Каналы идентичны. Структурная схема СУ вместе с объектом управления приведена на рис. 6.

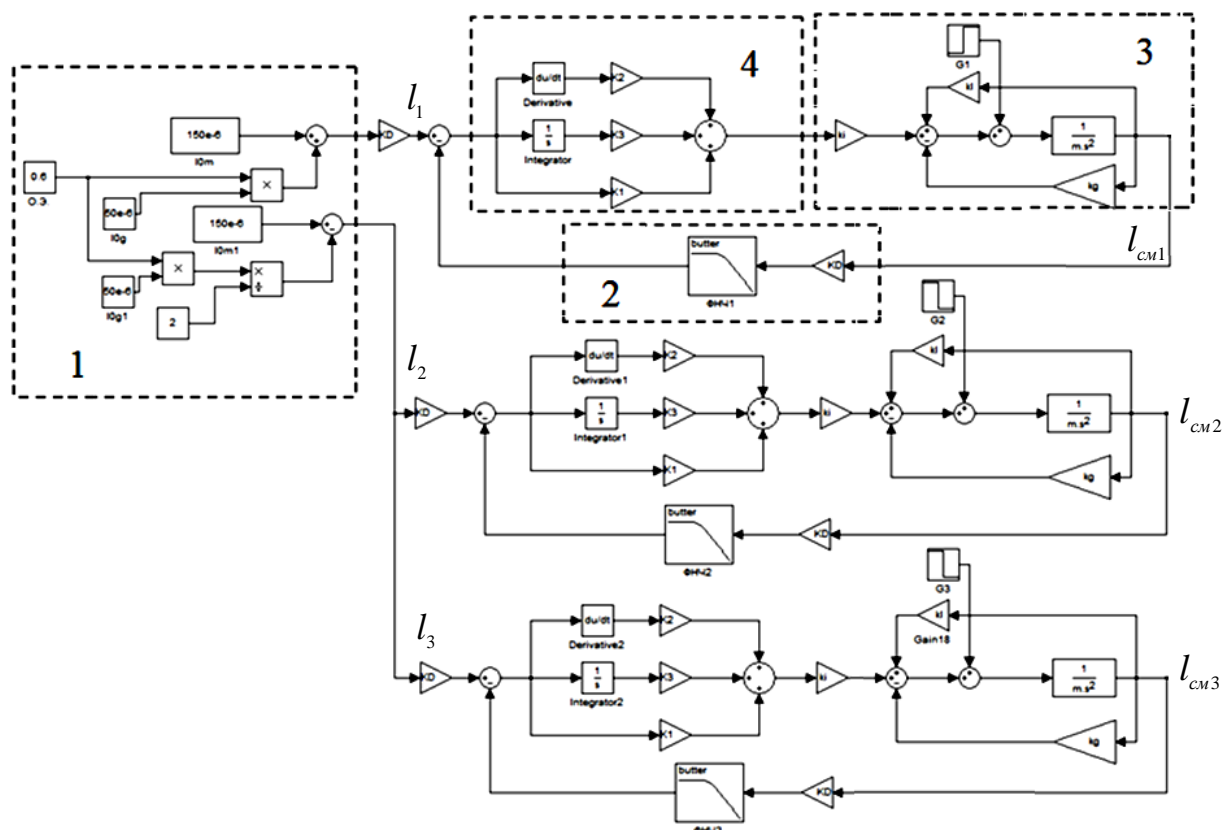


Рис. 6. Структурная схема трехканальной СУ ГМО вместе с объектом управления. 1 - блок преобразования эксцентриситета в рабочие зазоры, 2 - активный фильтр второго порядка с датчиком зазора, 3 - объект управления ГМО, 4 - регулятор

Блок преобразования эксцентриситета в рабочие зазоры рассчитывает рабочие зазоры  $l_1, l_2, l_3$  под каждым электромагнитом исходя из геометрически найденных зависимостей:

$$l_1 = l_{0маг} + \varepsilon \cdot l_{0газ}, \quad l_2 = l_3 = l_{0маг} - \varepsilon \cdot l_{0газ} / 2$$

где  $l_{0маг}$  - средний радиальный зазор в магнитной части опоры,  $l_{0газ}$  - средний радиальный зазор в газовой части опоры. Предложено устанавливать опору в конструкции электрооборудования так, чтобы электромагнит с зазором  $l_1$  размещался напротив направления преобладающего механического усилия. В этом случае внешнее усилие косвенно участвует в задании требуемого эксцентриситета, преимущественно активен электромагнит с зазором  $l_1$ , газовая и магнитная силы сонаправлены. Например, при горизонтальном расположении вала в случае преобладания силы тяжести ротора соответствующий электромагнит должен быть верхним.

Передаточная функция разомкнутого канала по управлению  $l_1$ :

$$W_{l_1}(p) = W_{пид}(p) \cdot W_o(p) \cdot W_d(p) = \frac{k_i \cdot C_k \cdot K_d \cdot \omega_c^2 \cdot (K_2 p^2 + K_1 p + K_3)}{p \cdot (p^2 + pB\omega_c + C\omega_c^2) \cdot (mp^2 + k_G - k_l)}$$

где  $W_{пид}(p)$  - передаточная функция ПИД - регулятора,  $W_o(p)$  - передаточная функция объекта управления,  $W_d(p)$  - передаточная функция датчика с активным фильтром низкой частоты 2-ого порядка,  $K_d$  - коэффициент передачи датчика зазора,  $\omega_c$  - частота среза фильтра,

$K_1$ ,  $K_2$  и  $K_3$  - коэффициенты передачи пропорционального, дифференциального и интегрального звена соответственно,  $B$  и  $C$  - коэффициенты фильтра НЧ второго порядка (рис. 6).

Определены соответствующие коэффициенты передачи:

$$K_1 = \frac{m\omega_n^2 - k_G + k_l}{k_i K_d}, \quad K_2 = \frac{2\zeta m \omega_n}{k_i K_d}, \quad K_3 = \omega_{Cpez}^2 \cdot K_2,$$

где  $\omega_{Cpez}$  - частота среза регулятора,  $\omega_n = \sqrt{(k_G - k_l)/m}$  - собственная частота недемпфированных свободных колебаний ротора.

Выражение для расчета коэффициента передачи интегрального звена  $K_3$  получено исходя из условия астатического переходного процесса  $\omega_{C_0} > \omega_{Cpez}$ , где  $\omega_{C_0}$  - частота среза объекта регулирования. В случае несоблюдения данного условия возможно возникновение перерегулирования, что может вызвать аварийное касание ротором вкладыша газостатического подшипника. Для нахождения  $K_3$  могут быть использованы и другие критерии, что может усложнить его нахождение.

Из-за малых рабочих зазоров в ГМО даже небольшие микронные отклонения профиля поперечного сечения вала от правильной окружности могут влиять на точность измерения зазора. Предложен алгоритм устранения ошибки измерения зазора из-за неидеальной округлости поверхности вала путём нахождения среднеарифметического значения измеренного зазора за определенное число целых периодов вращения ротора, позволяющий исключить влияние профиля поверхности вала на процесс управления.

С помощью отражательной оптики и нанесенной на вал метки находится частота и период вращения ротора. Определяется время десяти оборотов вала, частота снятия отсчетов с индуктивного датчика и общее число измерений зазора за это время. Устройство собирает найденное число отсчетов датчика и вычисляет среднее значение зазора за десять полных оборотов, а также рассчитывает относительный эксцентриситет вала.

СУ исследована на точность при подаче управляющего и возмущающего ступенчатого воздействия. Установлены ошибка по скорости относительно управления  $e_{уст.л}$  и ошибка по скорости относительно возмущения  $e_{уст.Г}$ :

$$e_{уст.л} = \frac{v_l}{K_l} = \frac{v_l \cdot (k_G - k_l)}{k_i K_3 K_d}, \quad e_{уст.Г} = -\frac{K_G v_G}{K_l} = -\frac{v_G}{k_i K_3},$$

где  $v_l$  - скорость изменения управляющего воздействия,  $v_G$  - скорость изменения возмущающего воздействия,  $K_G$  - коэффициент разомкнутой системы по возмущению,  $K_l$  - коэффициент разомкнутой системы по управлению.

С помощью критерия Найквиста в логарифмической форме СУ исследована на устойчивость по управляющему и возмущающему ступенчатому воздействию. Для опытной ГМО установлено, что запас устойчивости по фазе составляет 1,47 рад, что доказывает устойчивость СУ. В среде MATLAB построена компьютерная модель канала СУ в целом и исследован переходный процесс, который показал устойчивость работы СУ и отсутствие колебательного процесса.

Для проверки адекватности разработанной СУ в среде имитационного моделирования Control Design and Simulation Module пакета LabVIEW промоделирована ее работа и показано преимущество ГМО перед газостатической опорой по несущей способности и точности поддержания эксцентриситета. Получены зависимости электромагнитной и газовой силы, а также относительного эксцентриситета от времени при восприятии валом ступенчатой нагрузки в 250 Н, представленные на рис. 7 и 8.

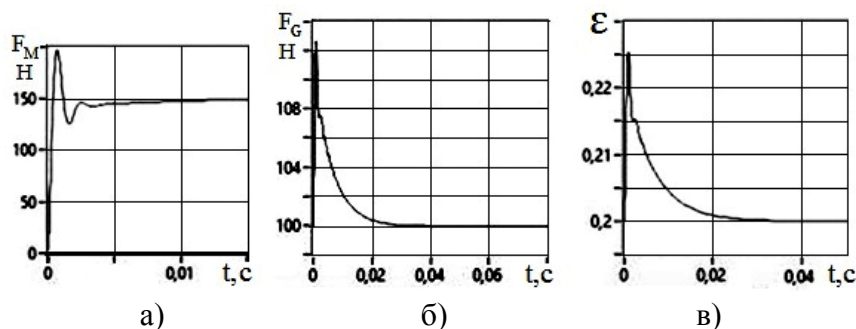


Рис. 7. Зависимость суммарной электромагнитной силы (а), газовой силы (б) и эксцентриситета (в) от времени при  $G = -250\text{H}$ ,  $\varepsilon = 0,2$ ,  $K_1 = 3,86$ ,  $K_2 = 769$ ,  $K_3 = 1000$

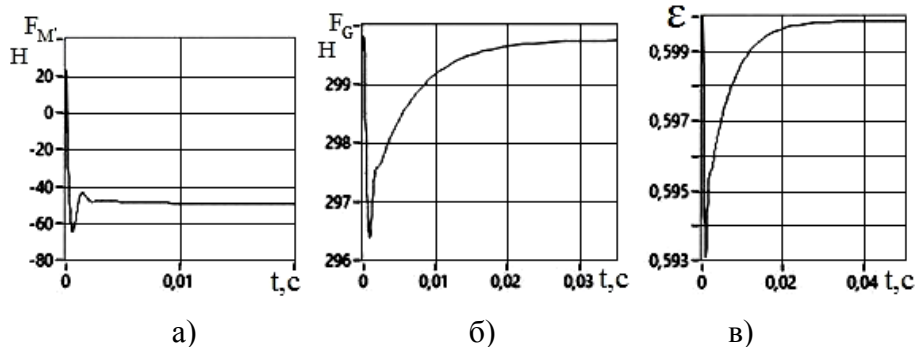


Рис. 8. Зависимость суммарной электромагнитной силы (а), газовой силы (б) и эксцентриситета (в) от времени при  $G = -250\text{H}$ ,  $\varepsilon = 0,6$ ;  $K_1 = 3,42$ ,  $K_2 = 769$ ,  $K_3 = 1000$

Результаты моделирования канала СУ показывают, что комбинированное действие газовой и магнитной частей ГМО позволяет компенсировать низкую несущую способность газовой части при малом эксцентриситете. Например, в случае приложения статической нагрузки на вал с силой 250 Н при эксцентриситете 0,2 несущая способность газовой части составляет всего 99,92 Н, что не позволит газовой части удерживать вал в данном режиме (рис. 7, б). Электромагнит разгружает газовую часть, создавая необходимую дополнительную силу 150,08 Н (рис. 7, а). Для выбранных параметров электромагнита ток в обмотке составляет 0,034 А.

При относительном эксцентриситете 0,6 газовая часть создает уже несущую способность в 299,76 Н (рис. 8, б). Для компенсации внешней нагрузки с силой 250 Н тяговое усилие электромагнита данного канала должно составить -49,76 Н (рис. 8, а) при токе в обмотке -0,009 А. Отрицательные знаки перед значениями электромагнитной силы и тока показывают, что вектор магнитной силы должен быть противоположен вектору газовой силы. Следовательно, в работу должны включиться электромагниты, расположенные по другую сторону от оси вала.

Сравнительно небольшие токи управления обусловлены малостью величины зазора в магнитной части ГМО. СУ позволяет задавать требуемое значение эксцентриситета и удерживать его неизменным, что обеспечивает увеличение точности вращения вала в опоре и повышает несущую способность ГМО.

Для проектирования СУ ГМО на основе заданных параметров предложен алгоритм, структурная схема которого приведена на рис. 9.

Выводы по главе:

1. Исследована аналитическая модель объекта управления ГМО и установлено, что объект управления неустойчив.
2. Предложен принцип построения СУ, определены передаточные функции разомкнутой системы по управлению и возмущению.

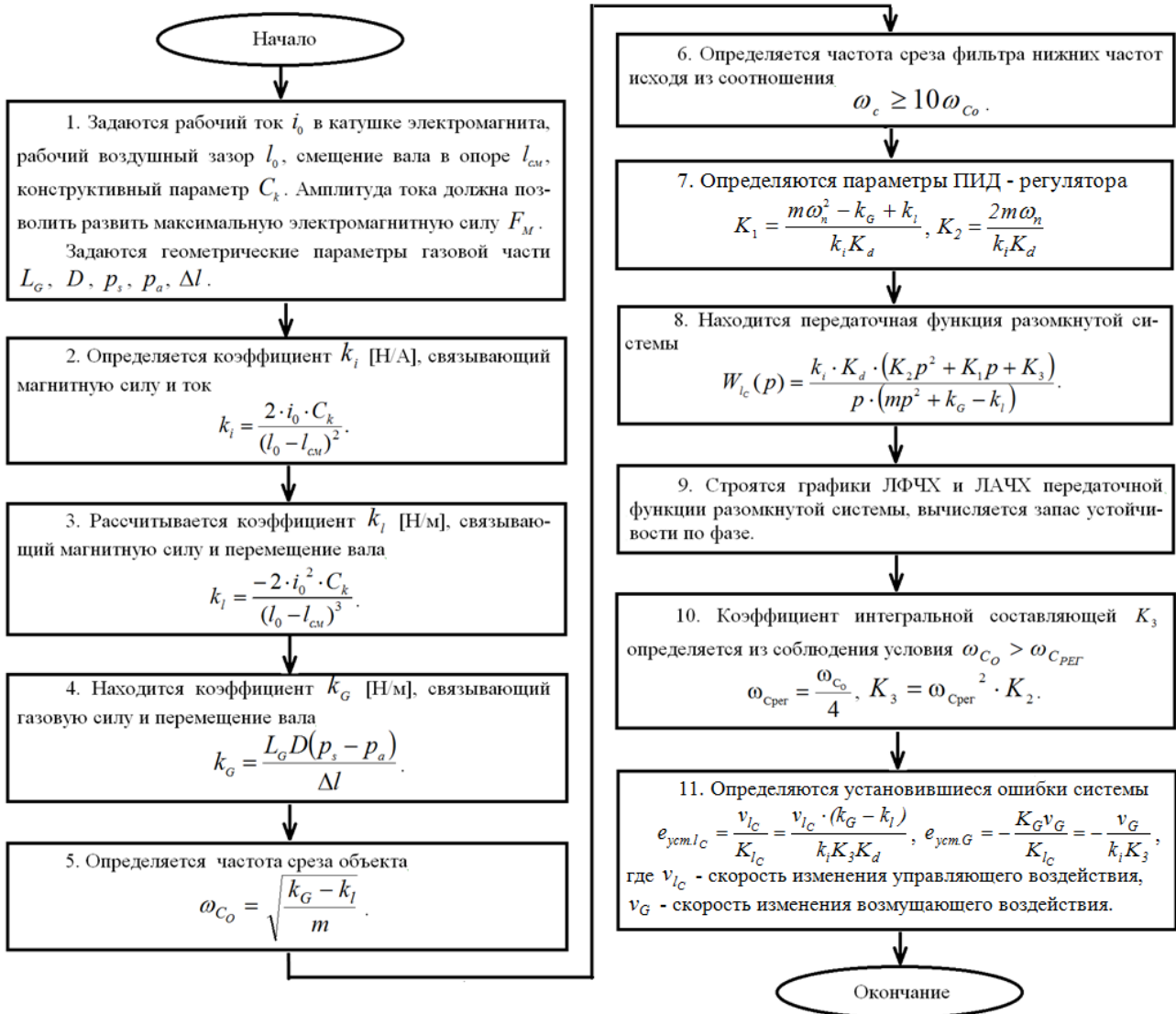


Рис. 9. Структурная схема алгоритма проектирования СУ ГМО

3. Добиться высокой точности позиционирования ротора можно, введя коэффициент обратной связи по интегралу, т.е. необходимо использовать ПИД-регулятор. Найдены выражения для нахождения коэффициентов и определены коэффициенты регулятора.

4. Установлено, что на точность измерения зазора существенно влияет неидеальная "окружность" вала. Предложен алгоритм устранения ошибки при измерении зазора, позволяющий исключить влияние профиля поверхности вала на процесс управления.

5. Для СУ определены ошибки по скорости относительно управления и возмущения. Для проверки адекватности СУ она промоделирована и показано преимущество ГМО перед газовой опорой по несущей способности и точности поддержания эксцентриситета.

6. Для оценки устойчивости СУ исследована по критерию Найквиста в логарифмической форме. Запас устойчивости по фазе составляет 1,47 рад на частоте среза 2242,6 рад/с, что доказывает устойчивость СУ.

7. Предложен алгоритм проектирования СУ ГМО.

**В четвертой главе** приведено описание опытного образца электромеханической части ГМО и усовершенствованного автором экспериментального стенда, рассмотрена техническая реализация СУ, а также обобщены результаты испытаний электротехнического комплекса ГМО.

Опытный образец ГМО (рис. 10, а) имеет конструкцию, представленную на рис. 1. ГМО содержит малое число конструктивных элементов, технологична и компактна. Параметры экспериментальной опоры - длина газовой части  $L_G = 50$  мм, общая длина с учетом магнитной части  $L_{ГМО} = 90$  мм, диаметр вала  $D = 50$  мм, средний радиальный зазор в газовой части  $\delta_G = 50$  мкм, радиальный зазор в магнитной части  $l = 150$  мкм, площадь полюса каждого электромагнита  $S = 4 \cdot 10^{-5}$  м<sup>2</sup>, число витков в обмотках 800.



Рис. 10. Опытный образец ГМО (а) и усовершенствованный экспериментальный стенд (б)

Исследование характеристик ГМО выполнено на усовершенствованном экспериментальном стенде (рис. 10, б). Стенд объединяет механическую, пневматическую и электронную измерительную части. Механическая часть содержит два опорных газостатических подшипника, обеспечивающих воздушный подвес вала, который приводится во вращение турбоприводом. В средней части вала расположена исследуемая опора и средства ее нагружения. Пневматическая часть установки обеспечивает питание сжатым воздухом газовой части ГМО и турбопривода. Электронная часть стенда представлена индуктивными датчиками перемещения Balluff BAW-M08EI-UA с рабочим диапазоном измерений 0,5...1,5 мм, оптическим датчиком вращения вала на базе отражательной оптопары, измерительным DAQ-устройством NI 6259 компании National Instruments, ПК с программным обеспечением LabVIEW и цифровым осциллографом.

На стенде получены нагрузочные характеристики опытной ГМО, апробирован алгоритм устранения ошибки измерения зазора из-за отклонения формы вала, испытана цифровая СУ и проведено исследование работы опытной ГМО.

Алгоритм устранения ошибки измерения зазора из-за отклонения формы вала апробирован на экспериментальном стенде в программной среде LabVIEW.

Автономную СУ ГМО предложено реализовать в аппаратном исполнении на базе программируемых логических интегральных схем (ПЛИС). Для повышения надежности выбраны выделенные целевые платформы со встроенными средствами ПИД-управления и нечеткой логики на реконфигурируемых системах ввода/вывода сигналов компании National Instruments (NI LabVIEW reconfigurable I/O (RIO) architecture). Испытания многофункциональной встраиваемой системы сбора данных и управления CompactRIO показали, что для разрабатываемой СУ ее быстродействие недостаточно из-за встроенного последовательного интерфейса между шасси с ПЛИС и модулями аналогового ввода/вывода. Требования по быстродействию обеспечила платформа управления и сбора данных NI Single-Board RIO, построенная на одной печатной плате.

Функциональная схема СУ ГМО, реализованная на ПЛИС одноплатного контроллера SBRIO-9636, представлена на рис. 11.

СУ состоит из блоков «SBRIO-9636» и «Силовой преобразователь». В свою очередь блок «SBRIO-9636» содержит программный «Блок компенсации неровности обработки вала» (БКНОВ). На АЦП блока БКНОВ через аналоговые входы А10, А11, А12 подаются сигналы с датчиков зазора Д1, Д2, Д3, а через цифровой вход платы DIO3 подается сигнал с цифрового тахометра ЦТ. Обработанные выходные сигналы перемещения вала с блока БКНОВ поступают на входы PV\_Д1, PV\_Д2, PV\_Д3 ПИД регуляторов каналов 1, 2, 3.

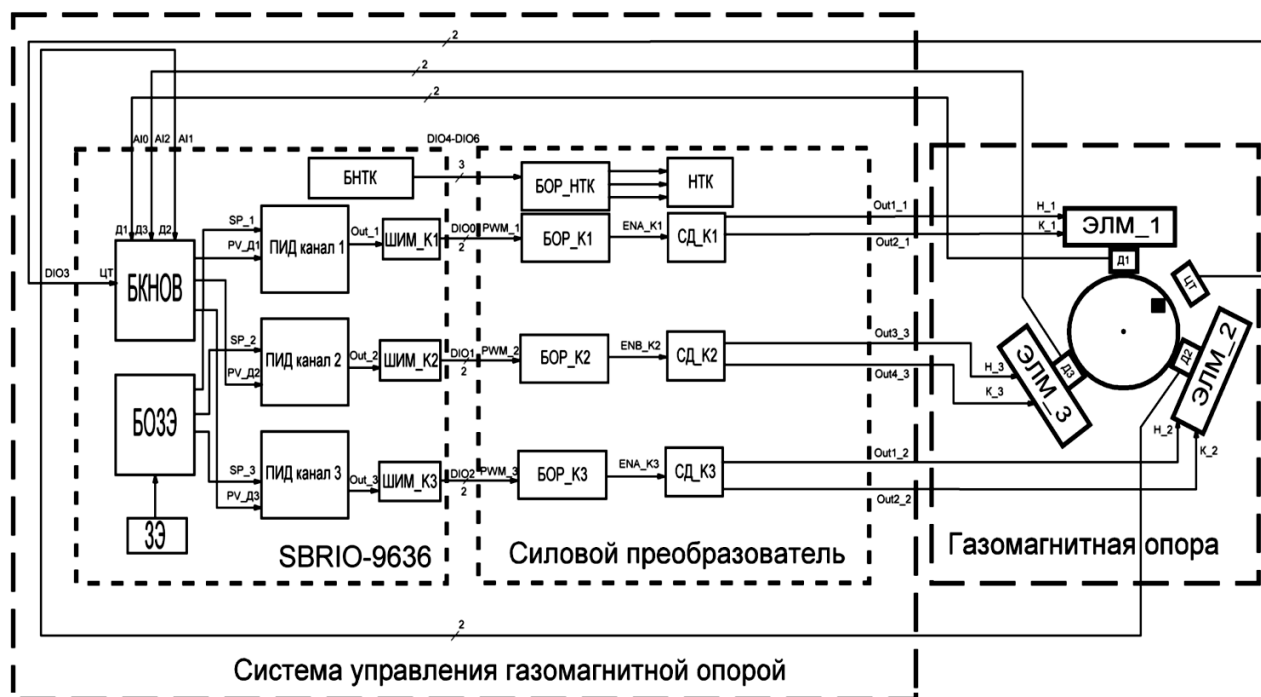


Рис. 11. Функциональная схема СУ ГМО

В предложенном варианте СУ ГМО каждый канал включает в себя следующие компоненты: датчик положения ротора, цифровой тахометр (один на систему), три электромагнита ЭЛМ\_1, 2, 3, раздвинутых на угол 120 градусов, блок оцифровки сигналов датчиков перемещения, блок компенсации неровности обработки вала, блок общего задания эксцентриситета, блок регуляторов ПИД, блок широтно-импульсной модуляции, блок опторазвязки, блок силового преобразователя, ротор с меткой для срабатывания оптопары. Погрешность измерений на данном испытательном стенде не превышает 10 %.

В режиме активного управления магнитным усилием исследована зависимость тягового усилия  $F$  от тока в обмотке электромагнита  $I$  при давлении наддува газа  $P=0,5$  МПа (рис. 12).

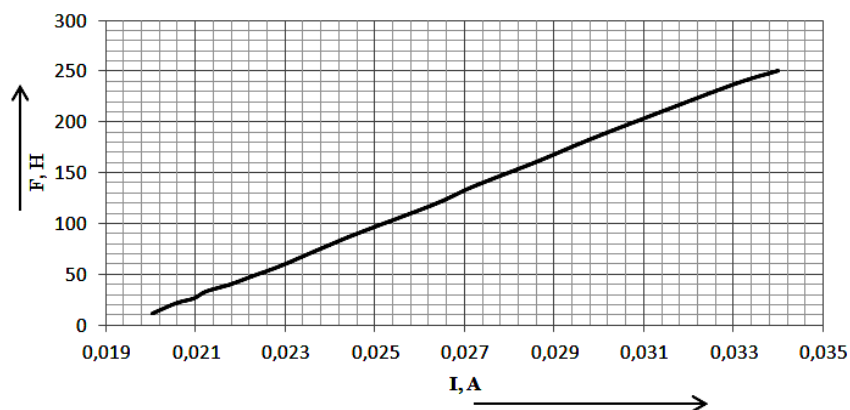


Рис. 12. Зависимость тягового усилия  $F$  от тока в обмотке электромагнита  $I$



Найденная экспериментальная зависимость хорошо согласуется с результатами моделирования тягового усилия электромагнита в зависимости от тока в программе Ansoft Maxwell (см. рис. 3).

Экспериментально исследована несущая способность ГМО в зависимости от относительного эксцентриситета  $\varepsilon$  без и при наличии магнитной тяги (рис. 13).

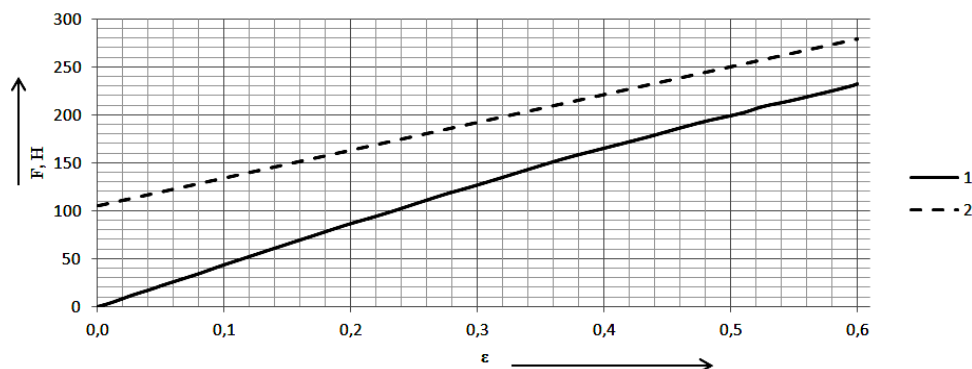


Рис. 13. Зависимость несущей способности ГМО от относительного эксцентриситета  $\varepsilon$ :  
1 – ГМО без магнитной тяги; 2 – ГМО с активным управлением магнитной тягой

Результаты исследования показывают, что ГМО с активным магнитным управлением (зависимость 2) имеет заметное преимущество по несущей способности по сравнению с ГМО без магнитной тяги (зависимость 1). Так, например, при относительном эксцентриситете 0,6 и силе тока в опоре 0,034 А грузоподъемность ГМО с активным магнитным управлением на 22 % выше, чем у газостатической опоры.

В работе экспериментальным путем исследован годограф оси вала в ГМО без и при наличии активного управления, который представлен на рис. 14.

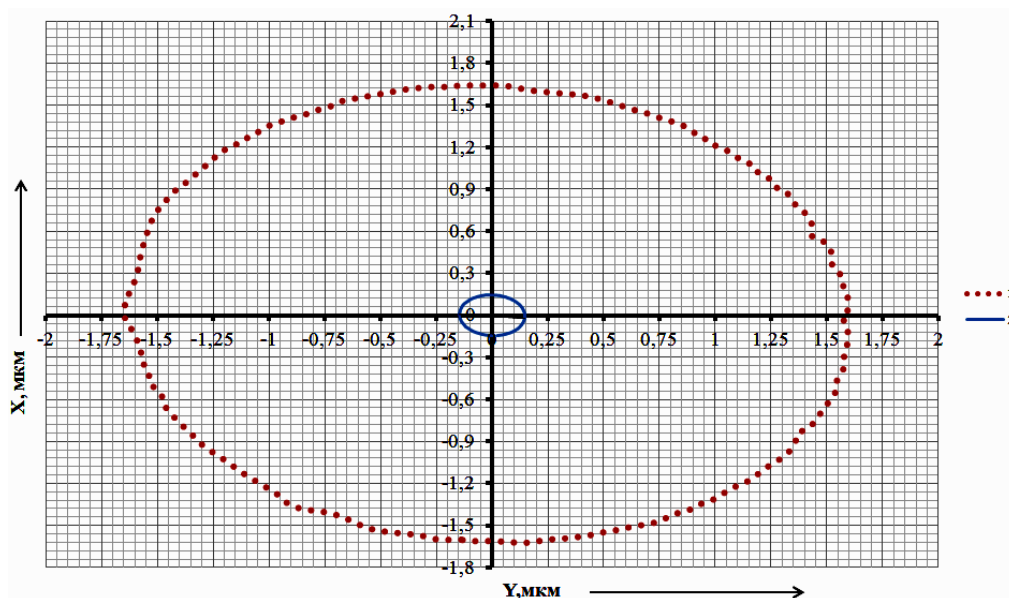


Рис. 14. Годограф оси ротора в опоре при  $n = 6200 \text{ мин}^{-1}$  и относительном эксцентриситете 0,6: 1 - ГМО без магнитной тяги, 2 - ГМО с активным управлением магнитной тягой

Экспериментально полученные траектории движения ротора показывают, что при выключенном управлении электромагнитами амплитуда размаха эллипса оси ротора достигает 1,56 мкм (траектория 1), а при активном управлении ГМО амплитуда размаха

эллипса оси ротора составляет 0,15 мкм (траектория 2). Уменьшение амплитуды размаха оси ротора позволяет повысить точность позиционирования и, соответственно, электрооборудования применяемого в металлообработке в 9,6 раза.

Выводы по главе:

1. Изготовлен опытный образец ГМО с продольным расположением магнитопроводов.
2. Усовершенствован стенд для исследования ГМО и алгоритмов обработки сигнала.
3. Разработан экспериментальный стенд для апробации СУ магнитным подвесом.
4. Разработана и изготовлена СУ, контроллер которой выполнен на базе быстродействующей программируемой логики.
5. Разработана программа управления ГМО.
6. Сняты экспериментальные зависимости тягового усилия от тока в обмотке электромагнита и несущей способности ГМО от относительного эксцентриситета.

## **ОСНОВНЫЕ ВЫВОДЫ И РЕЗУЛЬТАТЫ**

1. Предложены конструкции ГМО с низким магнитным торможением (патенты № 135747, № 134260), что позволяет использовать их в высокоскоростном электрооборудовании с повышенной точностью позиционирования ротора.

2. В среде имитационного моделирования электромагнитных процессов ANSYS Maxwell выявлено распределение магнитной индукции в магнитной цепи ГМО, показывающее отсутствие насыщенных участков в рабочем режиме.

3. Предложен алгоритм проектирования СУ, позволивший реализовывать цифровую СУ на базе ПЛИС. Работоспособность СУ подтверждена в среде имитационного моделирования Control Design and Simulation Module пакета LabVIEW и при проведении экспериментальных исследований. Реализация СУ на основе жесткой логики существенно повышает надежность ее работы.

4. Предложен алгоритм устранения ошибки измерения зазора из-за неидеальной округлости поверхности вала путём нахождения среднеарифметического значения измеренного зазора за определенное число целых периодов вращения ротора, позволяющий исключить влияние профиля поверхности вала на процесс управления.

5. Результаты экспериментальных исследований показали, что использование ГМО с активным управлением позволяет в номинальном режиме повысить точность вращения ротора в 9,6 раз и увеличить несущую способность на 22 %.

6. Результаты диссертационной работы использованы в производстве на ПАО "Амурский судостроительный завод" в виде проектно - конструкторской документации. Выполненные исследования послужили основой разработки системы управления для опытно-промышленного образца высокоскоростного электрошпинделя с передней управляемой ГМО для внутришлифовального станка 3К227А.

## **ПУБЛИКАЦИИ, ОТРАЖАЮЩИЕ ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ ДИССЕРТАЦИОННОЙ РАБОТЫ**

### ***Статьи в периодических изданиях, рекомендованных ВАК РФ:***

1. Ульянов А.В. Математическая модель управляемой газоманитной опоры/ А.В. Ульянов, С.М. Копытов, С.В. Стельмашук // Электротехнические комплексы и системы управления. – 2014. - №3. - С. 16-20.

2. Ульянов А. В. Оценка точности и устойчивости системы автоматического управления газоманитной опорой/ А.В. Ульянов, С.М. Копытов, С.В. Стельмашук // Электротехнические комплексы и системы управления. – 2015. - №3. - С. 1-4.

3. Ульянов А.В. Совершенствование конструкций газоманнитных опор высокоскоростных роторных машин/ С.М. Копытов, А.В. Космынин, А.В. Ульянов, В.С. Щетинин, А.С. Хвостиков // *Фундаментальные исследования*. – 2013. - №10-1. - С. 25-29.

4. Ульянов А.В. Повышение точности вращения валов высокоскоростных роторных систем/ А.В. Космынин, В.С. Щетинин, С.М. Копытов, А.В. Ульянов, А.С. Хвостиков // *Ученые записки КнАГТУ*. – 2013. - № 3. –1(15).- С. 47-51.

***Публикации в других источниках:***

5. Ульянов А.В. Способ измерения рабочего зазора бесконтактных подшипников/ С.М. Копытов, А. В. Космынин // *Современные наукоемкие технологии*. – 2013. - №3. - С. 40-42.

6. Ульянов А.В. Газоманнитная опора как объект управления/ А.В. Ульянов // «Наука XXI века: новый подход»: Материалы XI молодёжной международной научно-практической конференции студентов, аспирантов и молодых учёных 30-31 октября 2014 года, г. Санкт-Петербург. – North Charleston, SC, USA: CreateSpace, 2014. – С. 52-58.

7. Ульянов А.В. Газоманнитная опора с активным управлением магнитной силой/ А.В. Ульянов // *Научная дискуссия: вопросы технических наук*. № 4 (17): сборник статей по материалам XXI международной заочной научно-практической конференции. - М.: Изд. «Международный центр науки и образования», 2014. – С. 131-134.

8. Ульянов А. В. Система управления активно управляемой газоманнитной опорой/ А.В. Ульянов // *Современные тенденции технических наук: материалы III междунар. науч. конф.* (г. Казань, октябрь 2014 г.). - Казань: Бук, 2014. - С. 49-52.

9. Ульянов А.В. Совершенствование электромеханических систем газоманнитных опор высокоскоростных роторов для повышения эффективности их работы/ А.В. Ульянов // *Материалы XVII краевого конкурса молодых ученых и аспирантов*. – Хабаровск: Изд. ТОГУ, 2015. - 309 с.

10. Ульянов А.В. Разработка и моделирование газоманнитных опор/ С.М. Копытов, А.В. Космынин, В.С. Щетинин, А.С. Хвостиков // *Научно-техническое творчество аспирантов и студентов: материалы 43-й науч.-техн. конф. аспирантов и студентов*. – Комсомольск-на-Амуре: Изд. КнАГТУ, 2013. – Ч. 2. – С. 357-359.

***Патенты, программы для ЭВМ***

11. Пат. № 2545146 РФ Способ работы управляемого газоманнитного подшипникового узла и подшипниковый узел / Ульянов А.В., Копытов С.М., Космынин А.В., Щетинин В.С., Хвостиков А.С., Медведовская Ю.В., Смирнов А.В.; заявитель и патентообладатель Комсомольский-на-Амуре гос. техн. ун-т. - 2013142552/11; опубл.27.03.2015, бюл. № 9.

12. Пат. №135747 РФ Газоманнитный подшипниковый узел с поперечным расположением магнитопроводов / А.В. Космынин, В.С. Щетинин, С.М. Копытов, А.В. Ульянов; заявитель и патентообладатель Комсомольский-на-Амуре гос. техн. ун-т. - 2013113021/11; опубл.20.12.2013, бюл. № 35.

13. Пат. №134260 РФ Газоманнитный подшипниковый узел с продольным расположением магнитопроводов / А.В. Космынин, В.С. Щетинин, С.М. Копытов, А.В. Ульянов; заявитель и патентообладатель Комсомольский-на-Амуре гос. техн. ун-т. - 2013112963/11; опубл.10.11.2013, бюл. № 31.

14. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2012660515 Модуль построения годографа роторной системы / А.В. Ульянов, С.М. Копытов. - Зарегистр. в Реестре программ для ЭВМ 22.11.12.

15. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ Роспатента №2013617434 Определение зазора в газоманнитной опоре при неидеальной округлости вала / А.В. Ульянов, С.М. Копытов, А.С. Хвостиков. - Зарегистр. в Реестре программ для ЭВМ 14.08.2013.