

На правах рукописи

*Костю*

Костюков Владислав Дмитриевич

**ПОВЫШЕНИЕ ЭНЕРГОЭФФЕКТИВНОСТИ И ЖЕСТКОСТИ  
ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ ПОДШИПНИКОВ ЗА СЧЕТ ПРИМЕНЕНИЯ  
НЕСИММЕТРИЧНЫХ РЕЖИМОВ УПРАВЛЕНИЯ**

Специальность 2.4.2 – Электротехнические комплексы и системы

**АВТОРЕФЕРАТ**

Диссертации на соискание ученой степени  
кандидата технических наук

Самара – 2026

Работа выполнена на кафедре «Электромеханика и автомобильное электрооборудование» федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Самарский государственный технический университет».

Научный руководитель: **Макаричев Юрий Александрович**,  
доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой «Электромеханика и автомобильное электрооборудование» ФГБОУ ВО «Самарский государственный технический университет»

Официальные оппоненты: **Ковалёв Константин Львович**,  
доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой «Электроэнергетические, электромеханические и биотехнические системы» ФГБОУ ВО «Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет)», г. Москва

**Доманов Виктор Иванович**,  
кандидат технических наук, доцент, заведующий кафедрой «Электропривод и автоматизация промышленных установок» ФГБОУ ВО «Ульяновский государственный технический университет» (УлГТУ)

Ведущая организация: ФГБОУ ВО «Уфимский университет науки и технологий», г. Уфа

Защита диссертации состоится «06» октября 2026 г. в 10 часов 00 минут на заседании диссертационного совета 24.2.377.06 на базе федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Самарский государственный технический университет» по адресу: г. Самара, ул. Молодогвардейская, 244, Главный корпус, ауд. №200.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Самарского государственного технического университета (ул. Первомайская, 18), и на сайте ФГБОУ ВО «Самарский государственный технический университет» <https://24237706.samgtu.ru>

Отзывы по данной работе в двух экземплярах, заверенных печатью, просим направлять по адресу: Россия, 443100, Самара, ул. Молодогвардейская, 244, Главный корпус, Самарский государственный технический университет, ученому секретарю диссертационного совета 24.2.377.06; факс: (846) 278-44-00, email: [a-ezhova@yandex.ru](mailto:a-ezhova@yandex.ru)

Автореферат разослан «\_\_\_\_\_» \_\_\_\_\_ 2026 г.

Ученый секретарь диссертационного совета 24.2.377.06

кандидат технических наук, доцент



Е.В. Стрижакова

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

### **Актуальность темы.**

Электромагнитные подшипники (ЭМП) находят применение в электротехнических комплексах и системах подвеса вращающихся роторов, в которых использование традиционных подшипников качения или скольжения невозможно по разным причинам, например, из-за высокой скорости вращения или большой массы ротора. Они являются альтернативой гидростатических или гидродинамических подшипников скольжения в агрегатах, где к подшипниковым узлам предъявляются повышенные требования по снижению коэффициента трения, пожаро- и взрывобезопасности, надежности и сроку службы. В качестве примеров эффективного использования электромагнитного подвеса ротора можно назвать центробежные компрессоры газоперекачивающих агрегатов, высокоскоростные шпиндели, гироскопы и гиродины.

Электромагнитные подшипники в соответствии с принципами их работы потребляют электрическую энергию. Например, величина потребляемой мощности в различных режимах для ЭМП турбоагрегатов газоперекачивающих агрегатов с массой ротора 1000 и более килограмм составляет 2-15 кВт. От значения этой мощности зависят не только расходы на электроэнергию, но и стоимость силового преобразователя, а также аккумуляторной батареи с системой бесперебойного питания на ее основе, которые являются обязательной частью комплекса ЭМП. Поэтому поиск способов снижения потребления электрической энергии электромагнитными подшипниками является актуальной задачей.

Отличительной особенностью электромагнитного подшипника как объекта управления является его неустойчивость, поэтому он принципиально не может работать без системы управления, замкнутой по датчику положения ротора или стабилизированной иным способом. То есть каждая ось современного электромагнитного подвеса ротора представляет собой цифровой следящий электропривод, выбор параметров регуляторов которого обеспечивает устойчивость и требуемые жесткостные свойства электромагнитного подшипника. Следует отметить, что повышение жесткости электромагнитного подшипника приводит к

снижению колебаний ротора под воздействием внешних возмущающих воздействий. Кроме того, повышение жесткости опор приводит к изменению собственных механических резонансных частот ротора, смещая их в более высокочастотную область, что благоприятно сказывается на повышении надежности и срока безаварийной работы газоперекачивающего агрегата. В связи с этим разработка новых принципов построения и методик синтеза цифровых систем управления электромагнитными подшипниками, позволяющих повысить динамическую жесткость подшипников, также является актуальной задачей.

Разработка цифровых систем управления электромагнитными подшипниками, использующих новые способы регулирования напряжений электромагнитов и обеспечивающих снижение потребляемой электрической энергии, невозможно реализовать без математического описания ЭМП как объекта управления, что, безусловно, подтверждает актуальность задачи определения новых непрерывных и дискретных математических моделей электромагнитных подшипников.

### **Степень разработанности темы.**

Разработке и совершенствованию электромагнитных подшипников посвящены работы большого количества Российских и зарубежных ученых. Среди российских ученых следует, прежде всего, отметить работы В.П. Верещагина, Ю.Н. Журавлева, А.П. Сарычева, Ю.А. Макаричева, А.В. Старикова, И.С. Ткаченко и других авторов. Среди зарубежных авторов следует выделить труды L. Brenkacz, J.E. Chrisinger, D.P. Fleming, W. Zhang.

Однако, большинство этих работ посвящены электромагнитным подшипникам, в которых используется так называемый дифференциальный закон регулирования токов противоположных магнитов, когда увеличение напряжения на одном магните приводит к пропорциональному уменьшению напряжения на противоположном магните. Такой закон регулирования предопределяет величину потребляемой активной мощности электромагнитным подшипником. Кроме того, большинство известных математических моделей электромагнит-

ного подшипника как объекта управления соответствуют именно дифференциальному закону регулирования. Как показал анализ работ по исследуемой теме, проблемы, возникающие при несимметричных режимах работы ЭМП, освещены недостаточно полно, а некоторые аспекты, вообще не нашли своего отражения в научных статьях, что позволило сформулировать цель и задачи диссертации.

**Объект исследования** – радиальный электромагнитный подшипник ротора с горизонтальной осью вращения.

**Предмет исследования** – процессы, протекающие в радиальных электромагнитных подшипниках при смещении центра магнитной системы относительно оси вращения и раздельном управлении напряжениями противоположных магнитов.

**Цель работы** – разработка и параметрический синтез электротехнического комплекса электромагнитных подшипников с независимым регулированием напряжений противоположных полюсов, обеспечивающих повышение жесткости опор и снижение потребления электрической энергии.

**Задачи диссертационного исследования:**

1. Определение величины смещения центра магнитной системы радиального электромагнитного подшипника, компенсирующего в номинальном режиме вес ротора и обеспечивающего снижение потребляемой мощности.
2. Анализ устойчивости и работоспособности системы управления электромагнитным подшипником при смещении оси вращения и вариации напряжения питания.
3. Разработка линеаризованной математической модели электромагнитного подшипника при раздельном управлении напряжениями противоположных магнитов и смещении оси вращения ротора относительно центра магнитной системы.
4. Разработка цифровой системы управления магнитным подвесом ротора и его дискретной математической модели для раздельного регулирования напряжений противоположных магнитов, учитывающих смещение оси вращения относительно центра магнитной системы.

### **Научная новизна:**

1. Разработана линеаризованная математическая модель радиального электромагнитного подшипника, отличающаяся учетом возможности отдельного регулирования напряжений противоположных электромагнитов и смещения оси вращения ротора относительно центра магнитной системы.

2. Получено аналитическое выражение, позволяющее определить величину смещения центра магнитной системы электромагнитного подшипника относительно оси вращения, для которой происходит компенсация силы веса ротора при равных токах в противоположных магнитах.

3. Разработана система управления радиальным электромагнитным подшипником со смещенным центром магнитной системы, отличающаяся наличием двух каналов регулирования напряжений противоположных магнитов.

4. Предложена методика параметрического синтеза регуляторов системы управления электромагнитным подшипником с отдельным регулированием напряжений противоположных магнитов, отличающаяся учетом смещения центра магнитной системы относительно оси вращения ротора.

5. Разработана дискретная математическая модель электромагнитного подшипника, отличающаяся учетом отдельного цифрового регулирования напряжений противоположных магнитов.

### **Практическая значимость результатов работы:**

1. Смещение центра магнитной системы относительно оси вращения ротора, на рассчитанную рациональную величину, способствует снижению собственного электропотребления электромагнитными подшипниками.

2. Предложенная СУ ЭМП с отдельным регулированием напряжений противоположных магнитов позволяет повысить быстродействие и динамическую жесткость магнитного подвеса.

### **Методы исследований.**

В работе использовались методы теоретических основ электротехники, теории современных систем управления, непрерывного прототипа, линеаризации нелинейных дифференциальных уравнений и численного моделирования.

## **Основные положения, выносимые на защиту:**

1. Линеаризованная математическая модель радиального электромагнитного подшипника, для отдельного регулирования напряжений противоположных электромагнитов и смещения оси вращения ротора относительно центра магнитной системы.

2. Аналитические выражения и результаты расчета величины смещения центра магнитной системы радиального электромагнитного подшипника относительно оси вращения, при которой происходит компенсация силы веса ротора при равных токах в противоположных магнитах.

3. Система управления электромагнитным подшипником с отдельным регулированием напряжений противоположных магнитов.

4. Методика параметрического синтеза регуляторов системы управления радиальным электромагнитным подшипником и его дискретная математическая модель для отдельного регулирования напряжений противоположных магнитов.

**Достоверность** полученных результатов подтверждается хорошим совпадением расчетов с результатами компьютерного моделирования и натуральных экспериментов, а также с результатами, полученными другими авторами.

## **Реализация результатов работы**

В основу методики и программы расчета системы электромагнитного подвеса перспективного турбонагнетателя БТК-Э железнодорожного дизеля (НПО «Штурм» г. Самара) положены ключевые результаты и положения диссертационной работы, которые применялись на этапе проектирования и промышленной реализации.

Алгоритм и программа расчета параметров регуляторов системы управления электромагнитными подшипниками применяются в учебном процессе ФГБОУ ВО «Самарский государственный технический университет» при подготовке магистрантов кафедры электромеханики и автомобильного электрооборудования в курсе «Оптимизация электротехнических комплексов и систем».

### **Апробация работы.**

Основные положения и результаты работы докладывались и обсуждались на Всероссийской научно-практической конференции «Ашировские чтения» (г. Самара, 2023), Всероссийской научно-практической конференции «Ашировские чтения» (г. Самара, 2024), Международной научно-практической конференции молодых учёных «Энергия молодёжи для нефтегазовой индустрии» (г. Альметьевск, 2023), ЛШ Всероссийской научно-практической конференции «Фёдоровские чтения» (Москва, 2023).

**Соответствие паспорту специальности.** Научная квалификационная работа на соискание ученой степени кандидата технических наук выполнена в соответствии с паспортом специальности 2.4.2 – «Электротехнические комплексы и системы» и соответствует пункту 3 – «Разработка, структурный и параметрический синтез электротехнических комплексов и систем, их оптимизация, а также разработка алгоритмов эффективного управления» и пункту 4 – «Исследование работоспособности и качества функционирования электротехнических комплексов и систем в различных режимах, при разнообразных внешних воздействиях...».

### **Публикации.**

По теме диссертации опубликованы 14 печатных работ общим объемом 6,4 п.л., в том числе 8 статей в ведущих рецензируемых научных журналах и изданиях из перечня ВАК РФ и 2 патента на изобретение.

**Личный вклад автора** состоит в аналитическом решении задачи расчета рациональной величины смещения центра магнитной системы электромагнитного подшипника относительно оси вращения ротора; в определении передаточных функций электромагнитного подшипника с учетом возможности отдельного регулирования напряжений противоположных электромагнитов; в разработке системы управления электромагнитными подшипниками с отдельным регулированием напряжений противоположных магнитов и методики синтеза ее

регуляторов; в разработке дискретной математической модели цифровой системы управления электромагнитным подшипником с отдельным регулированием напряжений противоположных магнитов.

### **Структура и объем работы**

Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения, библиографического списка и приложения. Основная часть работы изложена на 138 страницах машинописного текста, иллюстрирована 58 рисунками и 16 таблицами. Библиографический список содержит 109 наименований на 13 страницах.

### **ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ**

**Во введении** представлена тема диссертационного исследования, посвященного разработке несимметричных режимов работы радиальных электромагнитных подшипников, подтверждена ее актуальность и перспективность дальнейшего совершенствования систем электромагнитного подвеса вращающихся роторов агрегатов, сформулирована цель работы и обозначен перечень решаемых задач для ее достижения, определена научная новизна и практическая значимость ключевых положений и результатов диссертации.

**В первой главе** представлены ключевые особенности реализации электромагнитного подвеса вращающихся роторов агрегатов с применением комплекта электромагнитных подшипников, обозначен его базовый состав и рассмотрено конструктивное исполнение агрегата с ЭМП. Рассмотрены известные линеаризованные математических модели и передаточные функции электромагнитного подшипника как объекта управления, отмечены их недостатки и возможности применения. Представлены ключевые принципы построения цифровых систем управления электромагнитными подшипниками и рассмотрены известные дискретные математические модели СУ ЭМП.

**Во второй главе** предложено для ротора, расположенного горизонтально, произвести компенсацию силы его веса за счет смещения центра магнитной системы радиального ЭМП относительно оси вращения ротора (рисунок 1). Это даёт возможность снизить опорное напряжения питания подшипника и уменьшить потери электрической энергии в обмотках электромагнитов.

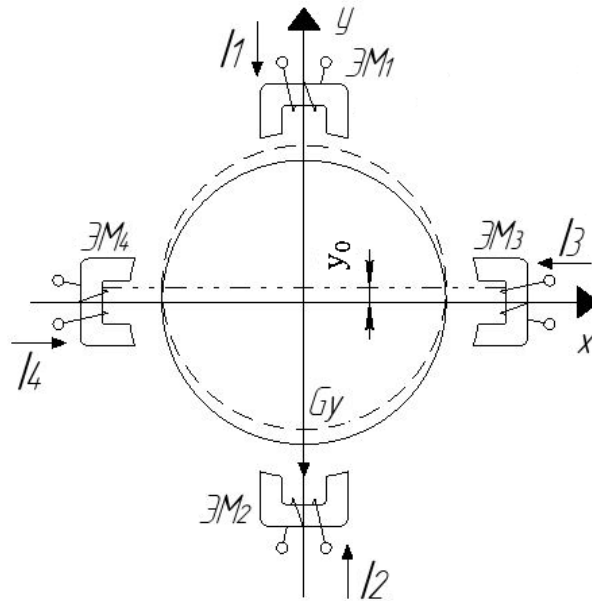


Рисунок 1 – Расчетная схема радиального электромагнитного подшипника с учетом смещения центра магнитной системы относительно оси вращения

Каждый радиальный электромагнитный подшипник имеет две пары электромагнитов: ЭМ1 и ЭМ2 по оси  $y$  и ЭМ3 и ЭМ4 по оси  $x$ . Катушки электромагнитов запитываются системой напряжений, обеспечивающей протекание в них токов  $I_1$ ,  $I_2$ ,  $I_3$  и  $I_4$ . При этом каждый электромагнит, расположенный на статоре агрегата, работает на притяжение ротора электромагнитного подшипника, закрепленного на вращающемся валу. Предположим, что ось  $y$  расположена вертикально, тогда вся сила веса ротора будет прикладываться к электромагнитам ЭМ1 и ЭМ2. Движение ротора в поле электромагнитов по оси  $y$  будет описываться системой уравнений (1):

$$\left. \begin{aligned} m \frac{d^2 y}{dt^2} &= k_{FI} \left[ \frac{I_1^2}{(\delta - y)^2} - \frac{I_2^2}{(\delta + y)^2} \right] - G_y + F_{gy}; \\ U_1 &= R_1 I_1 + \frac{2k_{FI}}{\delta - y} \frac{dI_1}{dt} + \frac{2k_{FI} I_1}{(\delta - y)^2} \frac{dy}{dt}; \\ U_2 &= R_2 I_2 + \frac{2k_{FI}}{\delta + y} \frac{dI_2}{dt} - \frac{2k_{FI} I_2}{(\delta + y)^2} \frac{dy}{dt}, \end{aligned} \right\}, \quad (1)$$

где  $k_{FI} = \frac{F_{эм0} \delta^2}{I_{100}^2 - I_{200}^2}$  – конструктивный коэффициент электромагнитного подшипника;  $I_1$  и  $I_2$  – токи в обмотках противоположных электромагнитов;  $\delta$  – зазор между статором и ротором при расположении ротора в центре магнитной системы;  $I_{100}$  и  $I_{200}$  – значения токов первого и второго электромагнитов, при которых создается сила  $F_{эм0}$ , действующая на ротор в центральном положении;  $y$  – перемещение ротора относительно центра магнитной системы по соответствующей оси подшипника;  $G_y$  – сила веса, приходящаяся на одну ось подшипника;  $F_{ey}$  – возмущающая внешняя сила, действующая по оси  $y$ ;  $R_1$  и  $R_2$  – активное сопротивление каждой из обмоток;  $U_1$  и  $U_2$  – напряжения, подаваемые на обмотки электромагнитов ЭМ1 и ЭМ2.

В статическом режиме при отсутствии внешней возмущающей силы  $F_{ey}$ , дифференциальном законе регулирования напряжений, равенстве сопротивлений  $R_1 = R_2 = R$ , равенстве токов в противоположных магнитах  $I_1 = I_2 = \frac{U}{2R}$  и смещении ротора относительно центра на величину  $y_0$  первое уравнение в системе (1) можно записать следующим образом

$$k_{FI} \left[ \frac{U^2}{4R^2 (\delta - y_0)^2} - \frac{U^2}{4R^2 (\delta + y_0)^2} \right] - mg = 0, \quad (2)$$

где  $m$  – масса ротора, приходящаяся на одну ось;  $g$  – ускорение свободного падения.

Найдено аналитическое решение уравнения (2), позволяющее определить величину смещения магнитной системы радиального ЭМП, обеспечивающего компенсацию силы веса ротора при равенстве токов в противоположных электромагнитах за счет перераспределения воздушных зазоров

$$y_0 = \sqrt{v_1} - \sqrt{v_2} - \sqrt{v_3}. \quad (3)$$

где  $v_1 = A + B - \frac{a}{3}$ ;  $v_{2,3} = -\frac{A+B}{2} - \frac{a}{3} \pm j \frac{\sqrt{3}}{2} (A-B)$ ,

$$A = \sqrt[3]{\frac{\delta^6}{27} + \frac{k_{эм2}^2 U^4 \delta^2}{128 R^4 m^2 g^2} + \sqrt{\frac{k_{эм2}^4 U^8 \delta^4}{16384 R^8 m^4 g^4} + \frac{k_{эм2}^2 U^4 \delta^8}{1728 R^4 m^2 g^2}}};$$

$$B = \sqrt[3]{\frac{\delta^6}{27} + \frac{k_{эм2}^2 U^4 \delta^2}{128 R^4 m^2 g^2} - \sqrt{\frac{k_{эм2}^4 U^8 \delta^4}{16384 R^8 m^4 g^4} + \frac{k_{эм2}^2 U^4 \delta^8}{1728 R^4 m^2 g^2}}}.$$

Подтверждена адекватность полученных аналитических выражений на примере расчета величины смещения центра магнитной системы относительно оси вращения ротора двух агрегатов с электромагнитными подшипниками, отличающиеся массогабаритными характеристиками: опытный образец турбоагрегата 6ТК-Э дизеля локомотива и нагнетателя газоперекачивающего агрегата ГПА Ц-16. Методом компьютерного моделирования показано, что смещение центра магнитной системы относительно оси вращения ротора позволяет снизить напряжение питания и ток катушек электромагнитного подшипника на 16,6%, а потребляемую мощность – на 30%. При этом график всплытия ротора со страховочных подшипников (рисунок 2) демонстрирует, что система управления радиальным электромагнитным подшипником устойчива, несмотря на смещение центра магнитной системы и снижение напряжения питания.

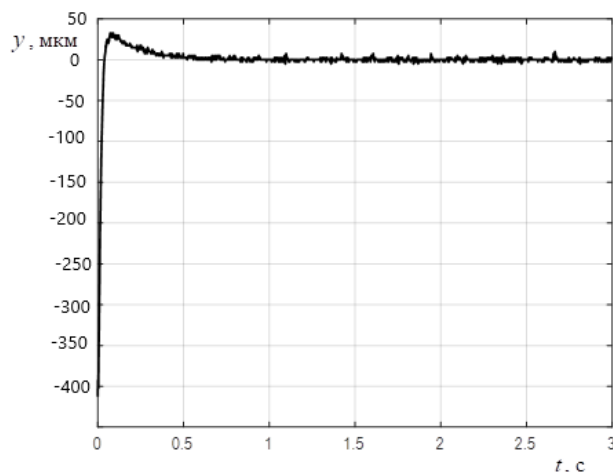


Рисунок 2 – Расчетный график всплытия ротора ГПА-Ц16 со страховочных подшипников при смещении центра магнитной системы и снижении напряжения питания

Проанализирована устойчивость системы управления электромагнитным подшипником при параметрах регуляторов, выбранных для центрального положения ротора относительно магнитной системы, во всем возможном диапазоне перемещения ротора в рамках зазора страховочных подшипников. Показано, что система управления будет сохранять устойчивость, в том числе и при пониженном напряжении питания электромагнитов.

**В третьей главе** найдена линеаризованная математическая модель радиального электромагнитного подшипника как объекта управления при раздельном регулировании напряжений противоположных магнитов. Получены передаточные функции по управляющим напряжениям  $U_1$  и  $U_2$  двух противоположных магнитов и по основному возмущающему воздействию – внешней силе, действующей на ротор  $F_{\text{вн}}$

$$W_{U_1}(p) = \frac{y(p)}{U_1(p)} = \frac{k_{U_1}(b_{01}p + 1)}{a_0p^4 + a_1p^3 + a_2p^2 + a_3p - 1}, \quad (4)$$

$$W_{U_2}(p) = \frac{y(p)}{U_2(p)} = -\frac{k_{U_2}(b_{02}p + 1)}{a_0p^4 + a_1p^3 + a_2p^2 + a_3p - 1}, \quad (5)$$

$$W_{F_{\text{вн}}}(p) = \frac{y(p)}{F_{\text{вн}}(p)} = \frac{(T_1p + 1)(T_2p + 1)}{(k_{Fy} - d_5 + d_6)(a_0p^4 + a_1p^3 + a_2p^2 + a_3p - 1)}. \quad (6)$$

$$\text{где } k_{U_1} = \frac{d_3}{k_{Fy} - d_5 + d_6}; \quad b_{01} = T_2; \quad a_0 = \frac{mT_1T_2}{k_{Fy} - d_5 + d_6}; \quad a_1 = \frac{m(T_1 + T_2)}{k_{Fy} - d_5 + d_6};$$

$$a_2 = \frac{m + d_1T_2 + d_2T_1 - k_{Fy}T_1T_2}{k_{Fy} - d_5 + d_6}; \quad a_3 = \frac{d_1 + d_2 + (d_5 - k_{Fy})T_2 - (d_6 + k_{Fy})T_1}{k_{Fy} - d_5 + d_6}.$$

$$k_{U_2} = \frac{d_4}{k_{Fy} - d_5 + d_6}; \quad b_{02} = T_1.$$

Показано, что полученные передаточные функции справедливы для любого закона регулирования напряжений противоположных магнитов, в том числе и дифференциального. В связи с этим произведена оценка адекватности новой математической модели электромагнитного подшипника как объекта управления

методом сравнения с ранее известной передаточной функцией, адекватность которой подтверждена натурными экспериментами. Основная особенность полученных передаточных функций заключается в возможности учета начальных значений скорости перемещения ротора и производных токов.

Разработана система управления электромагнитным подшипником с отдельным регулированием напряжений противоположных электромагнитов (рисунок 3).

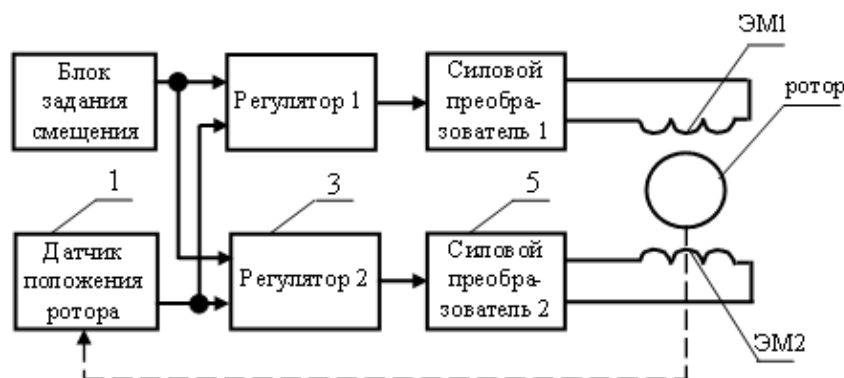


Рисунок 3 – Функциональная схема системы управления электромагнитным подвесом ротора с отдельным регулированием напряжений противоположных электромагнитов

Структурная схема непрерывного прототипа предложенной системы управления электромагнитным подшипником с отдельным регулированием напряжений электромагнитов приведена на рисунке 4.

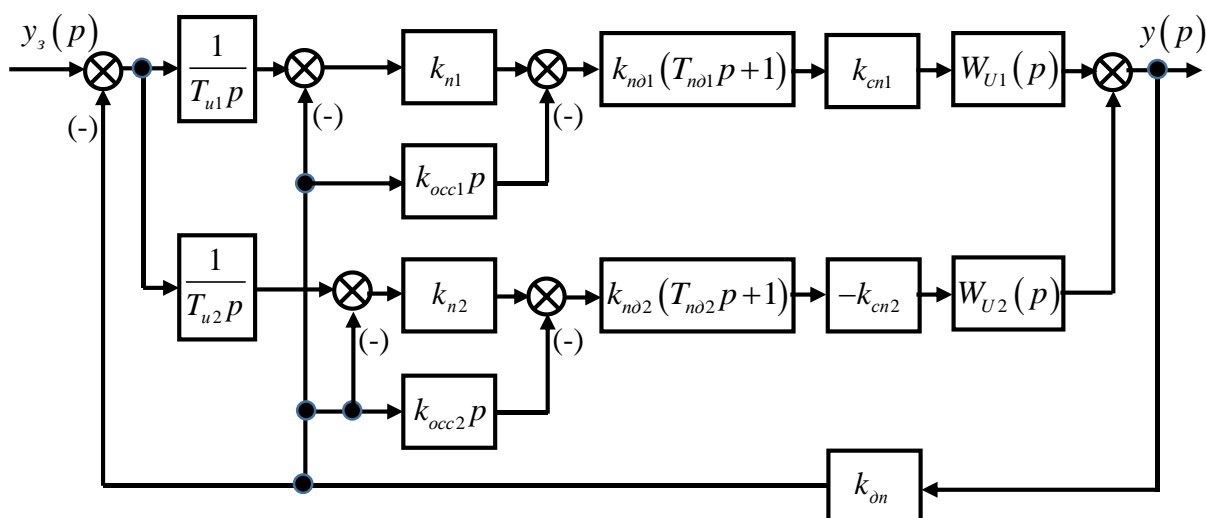


Рисунок 4 – Структурная схема непрерывного прототипа предложенной системы управления электромагнитным подшипником

Разработана методика параметрического синтеза регуляторов предложенной системы управления, которая заключается в расчете параметров регуляторов по формулам

$$\left. \begin{aligned} T_{n\partial 1} &= 3T_1; T_{n\partial 2} = 3T_2; \\ k_{occ1} &= k_{occ2} = \frac{2\xi(k_{21} - 1)b_{03}\sqrt{a_{04}b_{03}} + (k_{21} - 1)a_{04}b_{13} - a_1b_{03}}{k_{n\partial 1}k_{cn1}k_{U1}k_{\partial n}T_{n\partial 1}b_{01}b_{03}}; \\ k_{n1} &= k_{n2} = k_{n\partial 1} = k_{n\partial 2}; \\ T_{u1} &= 3,5T_{u1.зр}; T_{u2} = 3,5T_{u2.зр}, \end{aligned} \right\} \quad (7)$$

где  $\xi$  – произвольно задаваемый параметр демпфирования колебаний;  $k_{cn1}$  и  $k_{cn2}$  – коэффициента передачи силовых преобразователей для первого и второго электромагнитов;  $k_{\partial n}$  – коэффициент передачи датчика положения;  $T_{u1.зр}$  и  $T_{u2.зр}$  – значения постоянных времени интегральных регуляторов, при которых системы управления каждого из противоположных магнитов находятся на границе устойчивости;  $b_{03} = T_{n\partial 1}b_{01}$ ;  $b_{13} = T_{n\partial 1} + b_{01}$ ;  $a_{04} = \frac{a_0}{k_{n1}k_{n\partial 1}k_{cn1}k_{U1}k_{\partial n} - 1}$ .

Приведен пример расчета и компьютерное моделирование, которые показали, что предложенная система управления электромагнитным подшипником с отдельным регулированием напряжений противоположных электромагнитов позволяет повысить быстродействие системы при отработке управляющих воздействий, как минимум в 2 раза, а динамическую жесткость подшипника – в 1,25 раза.

**В четвертой главе** разработана структурная схемы предложенной цифровой системы управления с отдельным регулированием напряжений противоположных магнитов с учетом квантования по времени (рисунок 5).

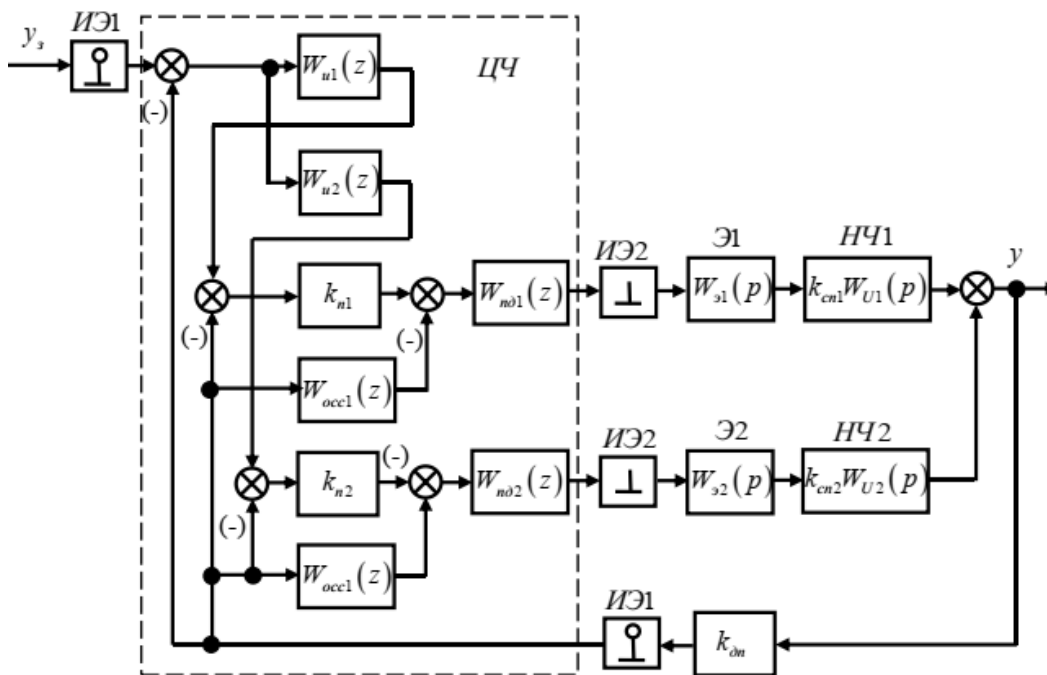


Рисунок 5 – Структурная схема цифровой системы управления электромагнитным подшипником с отдельным регулированием напряжений противоположных магнитов с учетом процесса квантования по времени

На структурной приняты следующие обозначения: ЦЧ – цифровая часть, в которую входят все регуляторы; НЧ1 и НЧ2 – непрерывные части системы, включающие в себя силовые преобразователи и электромагниты; ИЭ1 и ИЭ2 – импульсные элементы первого и второго рода; Э1 и Э2 –экстраполяторы нулевого порядка, функции которых выполняют силовые преобразователи. Проанализированы корни знаменателей непрерывных передаточных (4) – (6) и с учетом этого найдены дискретные передаточные функции непрерывных частей с учетом экстраполяторов нулевого порядка

$$W_{01}(z) = \frac{b_{04}z^3 + b_{14}z^2 + b_{24}z + b_{34}}{z^4 + a_{14}z^3 + a_{24}z^2 + a_{34}z + a_{44}}, \quad (8)$$

$$W_{02}(z) = \frac{b_{05}z^3 + b_{15}z^2 + b_{25}z + b_{35}}{z^4 + a_{14}z^3 + a_{24}z^2 + a_{34}z + a_{44}} \quad (9)$$

и всей предложенной цифровой системы управления электромагнитным подшипником:

$$W_{эм}(z) = \frac{y(z)}{y_3(z)} = \frac{b_{012}z^6 + b_{112}z^5 + b_{212}z^4 + b_{312}z^3 + b_{412}z^2}{z^7 + a_{112}z^6 + a_{212}z^5 + a_{312}z^4 + a_{412}z^3 + a_{512}z^2 + a_{612}z + a_{712}}, \quad (10)$$

где коэффициенты  $b_{04} - b_{34}$ ,  $b_{05} - b_{35}$ ,  $b_{012} - b_{412}$ ,  $a_{14} - a_{44}$ ,  $a_{112} - a_{712}$  имеют сложную взаимосвязь с параметрами электромагнитного подшипника, регуляторов и периода квантования по времени  $T$  (формулы приведены в тексте диссертации).

Сравнительное моделирование непрерывных (4), (5) и дискретных (8), (9) передаточных функций непрерывных частей электромагнитного подшипника показало, что расхождение результатов не превышает 0,5%. В то же время, погрешность, которую дает найденная дискретная передаточная функция (10) по сравнению с аналогичной непрерывной составляет 3,4%. Эти результаты свидетельствуют об адекватности полученных дискретных передаточных функций и возможности их применения на этапе проектирования электромагнитных подшипников.

Для верификации математических моделей электромагнитного подшипника было также проведено сравнение результатов компьютерного моделирования и натурных экспериментов, проведенных на цифровой системе управления радиальным электромагнитным подшипником нагнетателя газоперекачивающего агрегата ГПА Ц-16 (рисунок 6).



Рисунок 6 – Нагнетатель газоперекачивающего агрегата ГПА Ц-16  
с электромагнитными подшипниками

Показано, что при смещении ротора относительно центра магнитной системы на 30 мкм расхождение времени переходного процесса по графикам, полученным в ходе эксперимента (рисунок 7) и методом моделирования (рисунок 8), не превышает 5%.

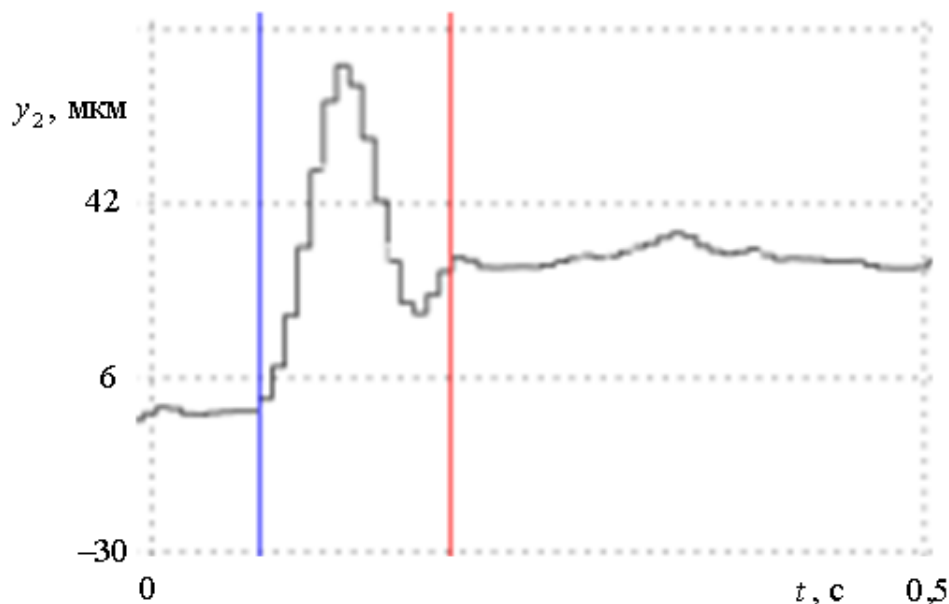


Рисунок 7 – График изменения координаты  $y_2$  (задний подшипник) при перемещении ротора из нулевого положения в смещенное относительно центра на 30 мкм (эксперимент)

Действительно, анализ графика, полученного в ходе эксперимента, показывает, что из нулевого положения (синий визир) до координаты 29 мкм (красный визир) ротор перемещается за 0,125 с. По результатам моделирования время достижения координаты 29 мкм (что соответствует красному визиру в эксперименте) составляет 0,13 с.

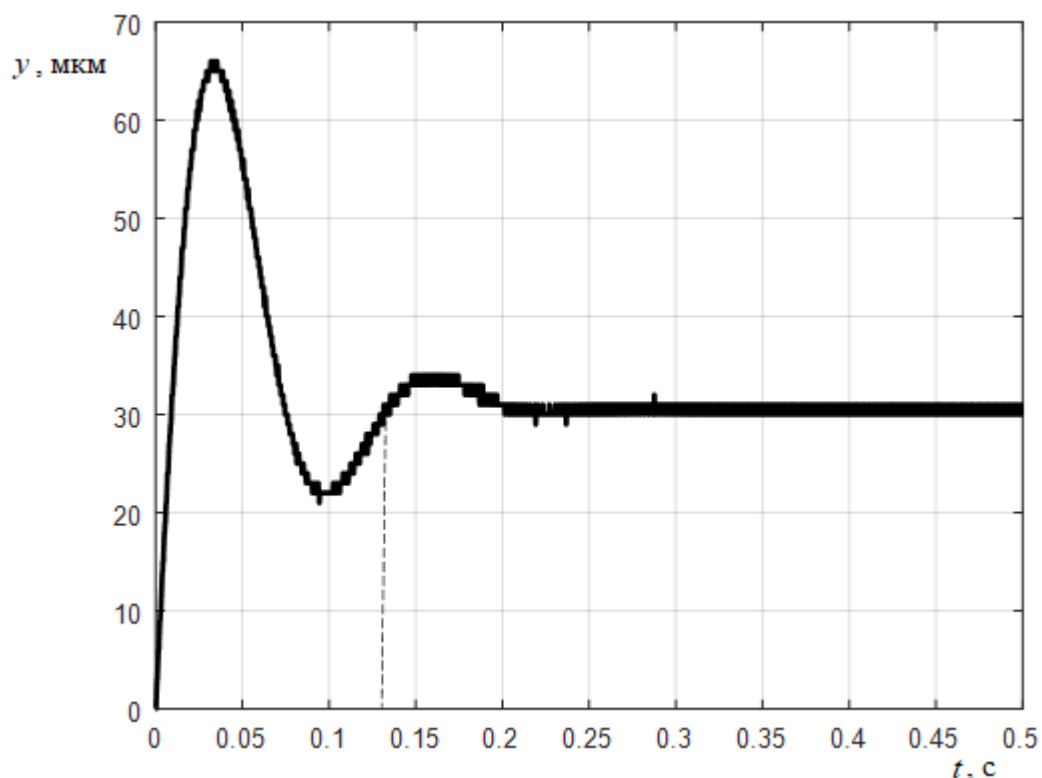


Рисунок 8 – График переходного процесса по управляющему воздействию на 30 мкм (моделирование)

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В диссертационной работе решена задача разработки и параметрического синтеза электротехнического комплекса электромагнитных подшипников с отдельным независимым регулированием напряжений противоположных полюсов, обеспечивающих повышение жесткости опор и снижение потребления электрической энергии.

В процессе решения данной задачи получены следующие основные результаты.

1. Анализ технической литературы по теме исследования показал, что известные принципы построения СУ ЭМП с горизонтальной осью вращения, а также их математические модели, предназначены для обеспечения работы ЭМП в центральном положении ротора и не позволяют использовать эффект перераспределения зазоров в верхнем и нижнем электромагнитах подшипника с целью экономии потребляемой электрической энергии.

2. Найденные аналитические выражения, позволяют определить рациональную величину смещения центра магнитной системы электромагнитного подшипника относительно оси вращения, обеспечивающую компенсацию силы веса ротора при равных токах в противоположных магнитах.

3. Доказано, что смещение центра магнитной системы подшипника, компенсирующего вес ротора, при дифференциальном законе регулировании напряжениями, позволяет снизить потребление электромагнитами электроэнергии до 30% и не влияет на устойчивость системы управления при настройках регуляторов, выбранных для центрального положения ротора.

4. Разработанная новая линеаризованная математическая модель ЭМП как объекта управления, содержащая передаточные функции и структурные схемы, справедлива для любого положения ротора, различных способов регулирования напряжений противоположных электромагнитов с учетом начальных значений скорости перемещения ротора и производных токов.

5. Доказана адекватность полученных передаточных функций ЭМП как объекта управления, причем расхождение численных значений коэффициентов знаменателей этих функций с коэффициентами знаменателя известной передаточной функции, справедливой только для дифференциального закона регулирования напряжений противоположных магнитов, не превышает 0,9%.

6. Разработана система управления электромагнитным подшипником с раздельным регулированием напряжений противоположных электромагнитов, позволяющая повысить быстродействие системы при обработке управляющих воздействий, как минимум в 2 раза, а динамическую жесткость подшипника – в 1,25 раза.

7. Разработана методика параметрического синтеза регуляторов предложенной системы управления, которая представляет собой совокупность формул, позволяющих произвести обоснованный расчет настроек регуляторов с учетом величины смещения центра магнитной системы относительно оси вращения и обеспечить монотонный характер переходных процессов во всем возможном диапазоне перемещений ротора.

8. Получены дискретные передаточные функции электромагнитного подшипника как объекта управления, которые позволяют исследовать динамические свойства цифровых систем управления магнитными опорами при заданном структурном построении, различных законах регулирования напряжений противоположных магнитов и произвольном начальном положении ротора с учетом величины периода дискретизации.

9. Предложенная дискретная передаточная функция цифровой СУ, позволяет в процессе проектирования определить требования к времени исполнения алгоритма программы и характеристикам производительности контроллера или микроконтроллера, планируемого в дальнейшем для технической реализации системы управления электромагнитного подвеса ротора. Погрешность, возникающая при описании процессов, протекающих в предложенной цифровой СУ ЭМП, не превышает 3,4%.

10. Проведено сравнение результатов компьютерного моделирования с результатами натуральных экспериментов, которое доказывает адекватность новой математической модели электромагнитного подшипника как объекта управления. Расхождение по времени переходного процесса достижения заданного перемещения ротора по результатам моделирования и эксперимента составляет менее 5%.

### **Перспективы дальнейшей разработки темы**

Дальнейшая работа по данной теме может быть ориентирована на следующие направления:

1. Синтез цифровой системы управления электромагнитным подшипником с отдельным регулированием напряжений и минимумом регуляторов.

2. Поиск соотношения опорных напряжений силовых преобразователей противоположных магнитов, обеспечивающего дальнейшее снижение потребляемой мощности.

3. Разработка методов косвенного форсирования напряжений на обмотках электромагнитов для компенсации их инерционности.

## СПИСОК ПУБЛИКАЦИЙ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

### В периодических изданиях, рекомендованных ВАК:

1. Стариков А.В. Определение рациональной величины смещения центра магнитной системы электромагнитного подшипника / А.В. Стариков, **В.Д. Костюков** // Вестник Самарского государственного технического университета, серия «Технические науки» Т.31, №3 – 2023. – Самара: СамГТУ, 2023. – С. 115 – 124.

2. Стариков А.В. Анализ работы электромагнитных подшипников при смещении центра магнитной системы относительно оси вращения и вариации напряжения питания / А.В. Стариков, **В.Д. Костюков** // Вестник Самарского государственного технического университета, серия «Технические науки» Т.31, №1 – 2023. – Самара: СамГТУ, 2023. – С. 103 – 113.

3. Стариков А.В. Анализ устойчивости системы управления электромагнитным подшипником с учётом вариации его параметров / А.В. Стариков, Д.Ю. Рокало, **В.Д. Костюков** // Научно-технический журнал «Вопросы электротехнологии» №2 (39) – 2023. – Саратов: Саратовский гос. Ун-т. им. Гагарина Ю.А., 2023. – С. 66 – 73.

4. **Костюков В.Д.** Линеаризованная математическая модель электромагнитного подшипника при независимом управлении напряжениями противоположных магнитов / **В.Д. Костюков**, А.В. Стариков, В.Н. Козловский, О.В. Пантюхин // Известия Тульского государственного университета, серия «Технические науки» выпуск 9 – 2023. – Тула: Изд-во ТулГУ, 2023. – с. 388 – 392.

5. **Костюков В.Д.** Определение ограничений на быстродействие и жесткость радиальных электромагнитных подшипников нагнетателя газоперекачивающего агрегата / **В.Д. Костюков**, А.В. Стариков // Научно-технический журнал «Вопросы электротехнологии» №2 (39) – 2023. – Саратов: Саратовский гос. тех. Ун-т. им. Гагарина Ю.А., 2023. – С. 96 – 102.

6. **Костюков В.Д.** Выбор параметров регуляторов электромагнитного подшипника при смещении центра магнитной системы относительно оси вращения

ротора / **В.Д. Костюков**, Г.А. Крылов, А.В. Стариков, Ю.А. Макаричев // Научно-технический журнал Вопросы электротехнологии, № 4 (45) – 2024. – Саратов: Саратовский гос. тех. Ун-т. им. Гагарина Ю.А., 2024. – С. 62 – 70.

7. **Костюков В.Д.** Дискретная математическая модель электромагнитного подшипника при независимом управлении напряжениями противоположных магнитов / **В.Д. Костюков**, Г.А. Крылов, А.В. Стариков, В.Н. Козловский // Известия Тульского государственного университета, серия «Технические науки» выпуск 9 – 2025. – Тула: Изд-во ТулГУ, 2025. – с. 186 – 195.

8. **Костюков В.Д.** Дискретная математическая модель цифровой системы управления электромагнитным подшипником с отдельным регулированием напряжений противоположных магнитов двигателем / **В.Д. Костюков**, Г.А. Крылов, А.В. Стариков // Вопросы электротехнологии, № 4 (49), 2025. – С. 71 – 78.

#### **Публикации в других изданиях**

9. Стариков А.В. Анализ работы радиальных электромагнитных подшипников нагнетателя газоперекачивающего агрегата при смещении центра магнитной системы / А.В. Стариков, **В.Д. Костюков**, М.Д. Мочалов // Ашировские чтения: сб. трудов Всероссийской Науч.-практ. конференции том 2 – 2023. – Самара: СамГТУ, 2023. – С. 213 – 221.

10. Стариков А.В. Анализ работоспособности электромагнитного подшипника при снижении напряжения питания и рациональном смещении центра магнитной системы / А.В. Стариков, **В.Д. Костюков** // Фёдоровские чтения – 2023: ЛП Всероссийская научно-практическая конференция с международным участием (с элементами научной школы для молодёжи) «Фёдоровские чтения 2023». – Москва: МЭИ, 2023. – С. 202 – 208.

11. **Костюков В.Д.** Оценка работоспособности радиальных электромагнитных подшипников нагнетателя газоперекачивающего агрегата при смещении центра магнитной системы и снижении напряжения питания / **В.Д. Костюков** // Сборник материалов Международной научно-практической конференции молодых учёных «Энергия молодёжи для нефтегазовой индустрии» – 2023. – Альметьевск: Альметьевский гос. нефтяной институт (АГНИ), 2023. – 6 с.

12. **Костюков В.Д.** Разработка системы управления магнитным подвесом ротора нагнетателя газоперекачивающего агрегата с независимым регулированием токов электромагнитов / **В.Д. Костюков**, Ю.А. Макаричев, А.В. Стариков // Ашировские чтения: сб. трудов Всероссийской Науч.-практ. конференции – Самара: СамГТУ, 2024. – С. 320 – 329.

### **Патенты**

13. Патент на изобретение № 2831082 Система управления электромагнитным подвесом ротора / А.В. Стариков, Ю.А. Макаричев, **В.Д. Костюков** // Оpubл.: 02.12.2024, Бюл. №34.

14. Патент России № 2845412. Система управления электромагнитным подвесом ротора / А.В. Стариков, **В.Д. Костюков**, Г.А. Крылов (Россия) // Оpubл.: 18.08.2025, Бюл. № 23.

Автореферат отпечатан с разрешения диссертационного совета 24.2.377.06 ФГБОУ ВО «Самарский государственный технический университет» (протокол № 9 от 01.07.2026г.)  
Заказ № 139. Тираж 100 экз.  
Отпечатано на ризографе.  
ФГБОУ ВО «Самарский государственный технический университет» Отдел типографии и оперативной полиграфии  
443100, г. Самара, ул. Молодогвардейская, 244.