

РӘСӘЙ ФЕДЕРАЦИЯҢЫ ФӘН ҺӘМ
ЮҒАРЫ БЕЛЕМ БИРЕҮ МИНИСТРЛЫҒЫ
ЮҒАРЫ БЕЛЕМ БИРЕҮ
ФЕДЕРАЛЬ ДӘҮЛӘТ БЮДЖЕТ МӘҒАРИФ
УЧРЕЖДЕНИЕҢЫ

«ӨФӨ ФӘН ҺӘМ ТЕХНОЛОГИЯЛАР
УНИВЕРСИТЕТЫ»
(Өфө университеты)

Заки Валиди урамы, 32, Өфө калаһы, БР, 450076



МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО
ОБРАЗОВАНИЯ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ
ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ
БЮДЖЕТНОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ
УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ

«УФИМСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ НАУКИ И
ТЕХНОЛОГИЙ»

(Уфимский университет, УУНиТ)

Заки Валиди ул., 32, Уфа, РБ, 450076

тел.: 8 (347) 272-63-70 e-mail: rector@uust.ru https://uust.ru
ОКПО 79067778 ОГРН 1220200037474 ИНН/КПП 0274975591/027401001

от _____ 20 _____ г. № _____
на № _____ от _____

УТВЕРЖДАЮ

Проректор по научной работе
ФГБОУ ВО «Уфимский университет
науки и технологий»,
И.Ф. м.н., доцент

И.Ф. Шарафуллин

17 сентября 2026 г.



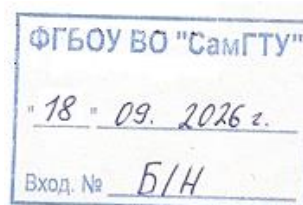
ОТЗЫВ ВЕДУЩЕЙ ОРГАНИЗАЦИИ

на диссертационную работу Костюкова Владислава Дмитриевича на тему «Повышение энергоэффективности и жесткости электромагнитных подшипников за счет применения несимметричных режимов управления», представленную на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 2.4.2 – «Электротехнические комплексы и системы»

Актуальность темы исследования

Электромагнитные подшипники (ЭМП) находят применение в электро-технических 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. Поэтому поиск решений по повышению энергоэффективности и жесткости электромагнитных подшипников является весьма актуальной задачей для научных и практических целей.

Электромагнитные подшипники в соответствии с принципами их работы потребляют электрическую энергию. От значения этой мощности зависят не только расходы на электроэнергию, но и стоимость аккумуляторной батареи с системой бесперебойного питания на ее основе, которая является обязательной частью комплекса ЭМП. Поэтому поиск способов снижения потребления электрической энергии электромагнитными подшипниками также является актуальной задачей.



012436

Костюковым В.Д. был произведён анализ разработки цифровых систем управления электромагнитными подшипниками, использующих новые способы регулирования напряжений электромагнитов и обеспечивающих снижение потребляемой электрической энергии, в результате которого подтверждена возможность повышения жесткости электромагнитного подвеса и снижение собственного потребления электрической энергии электромагнитными подшипниками.

Научная новизна диссертации заключается в следующих положениях:

1. Разработана линеаризованная математическая модель радиального электромагнитного подшипника, отличающаяся учетом возможности раздельного 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 раздельным регулированием напряжений противоположных магнитов, отличающаяся учетом смещения центра магнитной системы относительно оси вращения ротора.

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

Практическая значимость результатов диссертационной работы заключается в том, что смещение центра магнитной системы относительно оси вращения ротора, на рассчитанную, по разработанной методике, рациональную величину, способствует снижению собственного электропотребления электромагнитными подшипниками. Кроме того, предложенная система управления электромагнитными подшипниками с раздельным независимым регулированием напряжений противоположных электромагнитов позволяет повысить быстродействие и динамическую жесткость магнитного подвеса.

Структура и содержание работы

Диссертация состоит из введения, четырёх глав, библиографического списка, заключения и двух приложений.

Во введении представлена тема диссертационного исследования, подтверждена ее актуальность и перспективность дальнейшего развития, сформулирована цель работы и обозначен перечень решаемых задач, сформулирована научная новизна и практическая значимость ключевых положений и результатов диссертации.

В первой главе произведён анализ известных линеаризованных математических моделей и передаточных функций электромагнитного подшипника как объекта управления, рассмотрены их недостатки и возможности применения. Рассмотрены известные принципы построения цифровых систем управления электромагнитными подшипниками, а также их дискретные математические модели. Представлена конструктивная реализация электромагнитного подвеса, обозначен его базовый состав и особенности реализации.

Во второй главе представлено решение задачи по поиску рациональной величины смещения центра магнитной системы, обеспечивающей компенсацию веса ротора и снижение потребления электрической энергии электромагнитными подшипниками. Получены следующие результаты:

- Найдены аналитические выражения, позволяющие определить величину смещения центра магнитной системы электромагнитного подшипника относительно оси вращения, при которой происходит компенсация силы веса ротора при равных токах в противоположных магнитах.

- Доказано, что смещение центра магнитной системы электромагнитного подшипника относительно оси вращения ротора не влияет на устойчивость системы управления при настройках регуляторов, выбранных для центрального положения ротора.

- Проведены расчеты рациональной величины смещения центра магнитной системы двух различных по своим массогабаритным и мощностным характеристикам агрегатов: турбоагрегат 6ТК-Э дизеля локомотива и нагнетатель газоперекачивающего агрегата Ц-16.

- Результаты компьютерного моделирования подтверждают, что предложенное техническое решение по снижению потребления электроэнергии магнитными подшипниками может быть распространено на весь спектр подобных опор.

В третьей главе была найдена линеаризованная математическая модель радиального электромагнитного подшипника как объекта управления для возможности реализации независимого регулирования напряжений противоположных магнитов, представленная передаточными функциями по управляющим и возмущающему воздействиям, а также структурными схемами.

На основании новой линеаризованной математической модели был предложен вариант реализации системы управления электромагнитным подшипником с отдельным регулированием напряжений противоположных электромагнитов. Автором приводится подробная методика параметрического синтеза регуляторов предложенной системы управления, учитывающая смещение центра магнитной системы, что позволяет произвести обоснованный расчёт параметров регуляторов. Представлен пример расчета и результаты компьютерного моделирования, подтверждающие что предложенная система управления электромагнитным подшипником с отдельным регулированием напряжений противоположных электромагнитов, позволяет повысить быстродействие системы управления электромагнитным подшипником, а также динамическую жесткость электромагнитного подшипника.

В четвертой главе представлена структурная схема предложенной цифровой системы управления с отдельным регулированием напряжений противоположных магнитов. Найдены дискретные передаточные непрерывной частоты системы, в которую входят электромагниты и силовые преобразователи, которые выполняют ещё и функцию экстраполяторов нулевого порядка. Сравнительное моделирование непрерывных и дискретных передаточных функций электромагнитного подшипника показывает их хорошее совпадение, погрешность не превышает 0,5%. Была найдена дискретная передаточная функция цифровой системы управления электромагнитным подшипником с отдельным регулированием напряжений противоположных электромагнитов, полученная в ходе исследования, которая, как отмечает автор, позволяет на этапе проектирования определить требования к периоду замыкания программного цикла и характеристикам производительности контроллера или микроконтроллера, планируемого в дальнейшем для технической реализации системы управления электромагнитным подвесом ротора.

Подтверждена адекватность новой математической модели электромагнитного подшипника как объекта управления, путём сравнения автором результатов компьютерного моделирования с результатами натуральных экспериментов. Погрешность составляет менее 5%.

В заключении представлены основные результаты и положения, достигнутые в рамках диссертационного исследования.

В приложениях представлены акты, подтверждающие практическое использование результатов диссертационной работы в ООО НПО «Штурм» и учебном процессе ФГБОУ ВО СамГТУ.

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

Публикации. По теме диссертации опубликованы 14 печатных работ, из них 8 статей в ведущих рецензируемых научных журналах и изданиях из перечня ВАК РФ и 2 патента на изобретение.

По диссертации имеются следующие замечания.

1. В применяемых в настоящее время на практике радиальных электромагнитных подшипниках для распределения силы веса ротора полюса, как правило, располагаются под углом 45° к вертикальной оси. Почему в выражениях 2.1, 2.2 и далее это не учитывается?

2. Почему смещение оси ротора для компенсации его веса рассчитывается при условии равенства токов в противоположных магнитах? Разве это условие обязательное?

3. Почему на рис.2.13 сигналы датчика имеют строго прямоугольную форму? В реальных датчиках такая форма сигналов практически не достижима.

4. Имеются описки, к примеру на странице 17 автореферата «дискетные передаточные функции».

5. В автореферате рисунки представлены в черно белом виде, а в пояснении к ним (рис.7) описываются графики как цветные («синий», красный визир»).

Заключение

Указанные замечания не снижают ценности выполненной работы. В целом диссертационная работа «Повышение энергоэффективности и жесткости электромагнитных подшипников за счет применения несимметричных режимов управления» является законченным исследованием и соответствует п 9. «Положения о присуждении учёных степеней» ВАК, утверждённого Постановлением Правительства РФ от 24.09.2013 г. №842, а её автор, Костюков Владислав Дмитриевич, заслуживает присуждение учёной степени кандидата технических наук по специальности 2.4.2 «Электротехнические комплексы и системы».

Диссертационная работа Костюкова В.Д., а также отзыв ведущей организации рассмотрены и одобрены на научном семинаре кафедры «Электромеханика» Уфимского университета науки и технологий (протокол № 5 от 15 сентября 2026 г.).

Отзыв составил:

Доктор технических наук,

профессор кафедры электромеханики

Исмагилов Флюр Рашитович

Подпись Исмагилова Ф. Р. заверяю:

Ученый секретарь Ученого совета

Уфимского университета науки и технологий

Ефименко Наталья Вячеславовна



Сведения об организации:

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Уфимский университет науки и технологий»,

Адрес: 450076, Республика Башкортостан, г. Уфа, ул. Заки Валиди, 32, телефон: +7 (347) 272-63-70, e-mail: rector@uust.ru, сайт: <https://uust.ru>.

С отзовом ознакомлен 18.09.2026 г. Костюков В.Д.