

ОТЗЫВ

официального оппонента Ковалёва Константина Львовича 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»

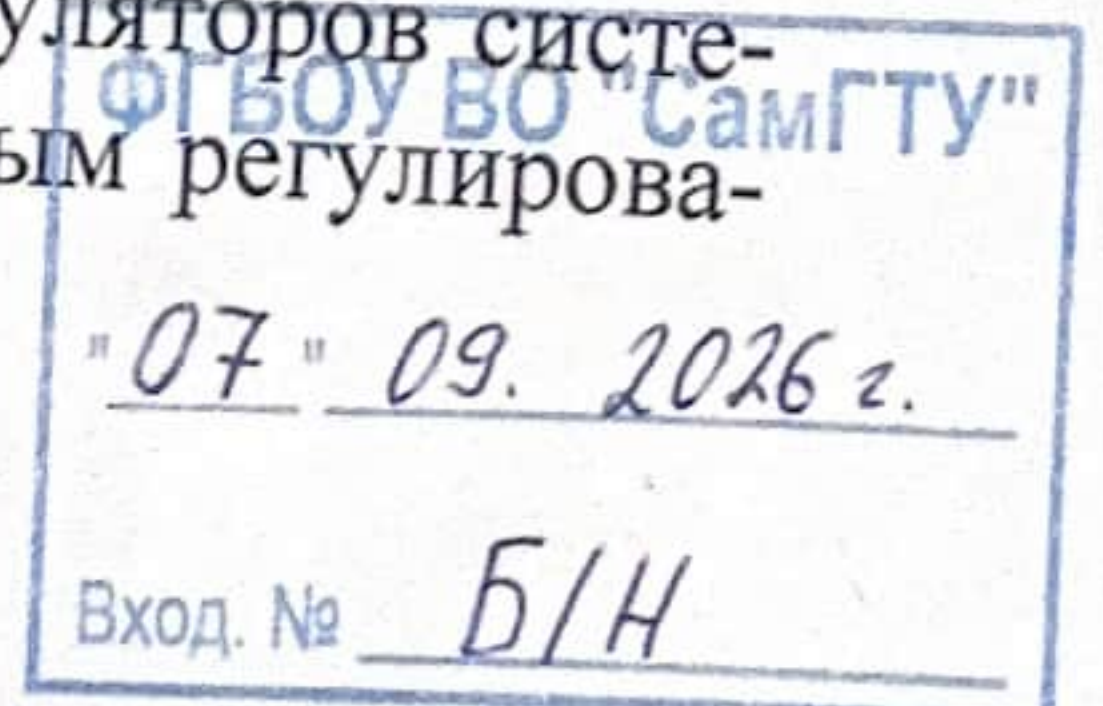
Актуальность исследования. Электромагнитные подшипники (ЭМП) находят применение в электротехнических комплексах и системах подвеса вращающихся роторов, в которых использование традиционных подшипников качения или скольжения невозможно по разным причинам, например, из-за высокой скорости вращения или 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. Поэтому поиск решений по повышению энергоэффективности и жесткости электромагнитных подшипников является весьма актуальной задачей для научных и практических целей. Проведен анализ реализации раздельного управления радиальными электромагнитными подшипниками, в результате которого подтверждена возможность повышения жесткости электромагнитного подвеса и снижение собственного потребления электрической энергии электромагнитными подшипниками.

Считаю, что научная проблема, поставленная и решенная в диссертационной работе – актуальна.

Новизна исследований и полученных результатов.

Научная новизна. Научная новизна диссертационной работы 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 регулирова-



ние которых составило менее 5%, что подтверждает адекватность полученной новой математической модели электромагнитного подшипника как объекта управления.

В заключении отражены ключевые результаты и положения диссертационного исследования.

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

Степень обоснованности научных положений, выводов и рекомендаций.

Достоверность полученных результатов подтверждается хорошим совпадением расчетов с результатами компьютерного моделирования и натурных 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.

Замечания. Несмотря на высокий уровень диссертационной работы Костюкова В.Д. по ней имеются вопросы и замечания:

1. Во введении и обзоре отсутствуют ссылки на конкретных авторов, внесших большой вклад в работы по электромагнитным подшипникам, хотя в списке литературы они присутствуют.

2. Для устойчивой работы комплекса электромагнитных подшипников необходимо учитывать не только управление радиальными подшипниками, но и осевыми. В работе о системе управления осевыми подшипниками ничего не сказано. Какое влияние на работу радиальных подшипников оказывают осевые подшипники?

3. Обычно для описания работы ЭМП используют зависимости выходных параметров от тока магнитов. По каким причинам автор в качестве управляющих воздействий выбрал напряжение?

4. В некоторых выражениях (4.19, 4.20, 4.21, 4.37 и др.) автор не прибегает к разумному округлению значений коэффициентов, оставляя по 5 и более значащих цифр. Это затрудняет анализ представленных выражений, не повышая их точности.

5. Громоздкие выражения расчета коэффициентов передаточной функции (3.36) можно было из основного текста диссертации перенести в приложения.

6. Для удобства сравнения экспериментальных и расчетных графиков на рис.4.16 и 4.18 следовало бы совместить их в одних координатных осях.

7. Вывод многих математических выражений отсутствует.

8. Есть нарушения в оформлении диссертации с точки зрения ГОСТ.

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 демонстрирует, что система управления радиальным электромагнитным подшипником устойчива, несмотря на смещение центра магнитной системы и снижение напряжения питания. В работе 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 сохраняет устойчивость, в том числе и при пониженном напряжении питания электромагнитов.

Третья глава. В третьей главе работы описана найденная Костюковым В.Д. линеаризованная математическая модель радиального электромагнитного подшипника как объекта управления при раздельном регулировании напряжений противоположных магнитов, найдены передаточные функции по управляющему и возмущающему воздействию. Автор обращает внимание, что полученные передаточные функции справедливы для любого закона регулирования напряжений противоположных магнитов, в том числе и дифференциального, сравнивая в подтверждении этого новую математическую модель электромагнитного подшипника как объекта управления с ранее известной передаточной функцией, адекватность которой подтверждена натурными экспериментами. Разработана система управления электромагнитным подшипником с раздельным регулированием напряжений противоположных электромагнитов, а также методика параметрического синтеза регуляторов предложенной системы управления, учитывающая смещение центра магнитной системы, что позволяет произвести обоснованный расчёт параметров регуляторов. Приводится пример расчета и результаты компьютерного моделирования, подтверждающие что предложенная система управления электромагнитным подшипником с раздельным 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.

Четвёртая глава. В данной главе представлена структурная схема предложенной цифровой системы управления с раздельным регулированием напряжений противоположных магнитов, учитывающая квантование сигналов по времени. Проведено сравнительное моделирование непрерывных и дискретных передаточных функций электромагнитного подшипника, которое демонстрирует, что расхождение результатов не превышает 0,5%. В то же время, погрешность, которую дает найденная дискретная передаточная функция 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. Автором произведена верификация результатов компьютерного моделирования и натурных экспериментов, расхожде-

нием 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. 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 отдельным независимым регулированием напряжений противоположных электромагнитов позволяет повысить быстродействие и динамическую жесткость магнитного подвеса.

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

Введение. 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.

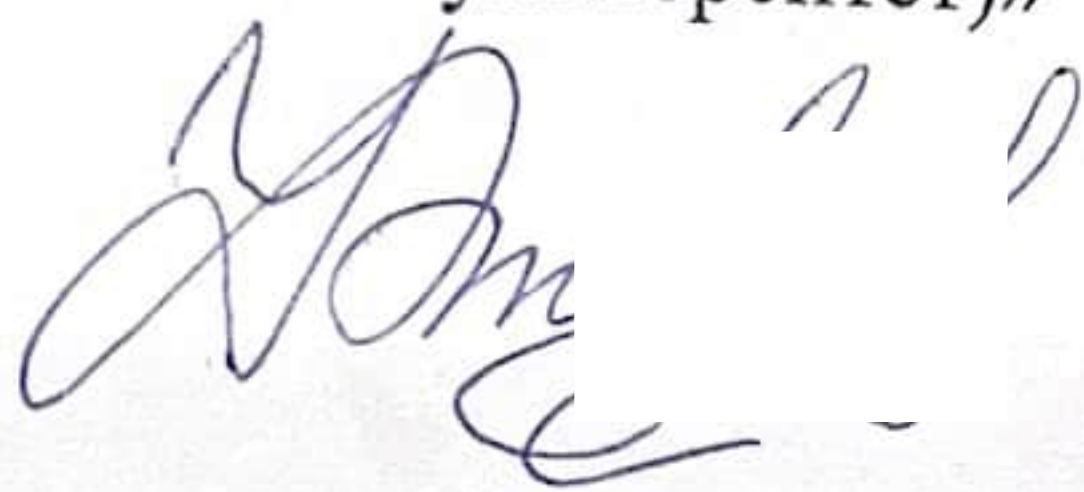
В первой главе представлены ключевые особенности реализации электромагнитного подвеса вращающихся роторов агрегатов с применением комплекта электромагнитных подшипников, обозначен его базовый состав и рассмотрено конструктивное исполнение агрегата с электромагнитными подшипниками. Рассмотрены известные 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 систем управления электромагнитными подшипниками.

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. Автором получены аналитические выражения, позволяющие проводить расчёт величины необходимого смещения. 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

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».

Официальный оппонент, доктор технических наук (05.09.01 – Электромеханика и электрические аппараты), зав. кафедрой 310 «Электроэнергетические, электромеханические и биотехнические системы» Федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет)»



Ковалев Константин Львович

13 июля 2026

года

Подпись Ковалева Константина Львовича заверяю

Директор дирекции Института № 3 МАИ



Ю.Г. Следков

Адрес Федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет)» 125993, г. Москва, Волоколамское шоссе, д. 4, корпус 57
Телефон: +7 499 158-00-10
E-mail: kaf310@mai.ru

С отзывом ознакомлен 07.09.2026

см Костюков В.Д.