

ОТЗЫВ

официального оппонента Доманова Виктора Ивановича 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

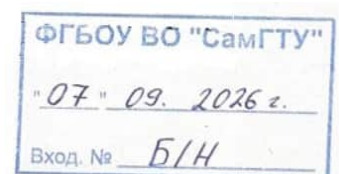
Электромагнитные подшипники (ЭМП) находят применение в электротехнических комплексах и системах подвеса вращающихся роторов, в которых использование традиционных подшипников качения или скольжения невозможно по разным причинам, например, из-за высокой скорости вращения или большой массы ротора. Электромагнитные подшипники в соответствии с принципами их работы потребляют электрическую энергию. Отличительной особенностью электромагнитного подшипника как объекта управления является его неустойчивость, поэтому он принципиально не может работать без системы управления, контролирующей положение вращающегося ротора по каждой оси относительно центра магнитной системы (датчики положения ротора по каждому каналу управления), или стабилизированной иным способом. 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.

Считаю, что проблема, выбранная Костюковым В.Д. для исследования, 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 отдельного регулирования напряжений.
2. Получено выражение, позволяющее определить величину смещения центра магнитной системы электромагнитного подшипника относительно оси вращения.
3. Разработана система управления радиальным электромагнитным подшипником со смещенным центром магнитной системы.
4. Предложена методика параметрического синтеза регуляторов системы управления электромагнитным подшипником с отдельным регулированием напряжений.



5. Разработана дискретная математическая модель электромагнитного подшипника.

Практическая значимость. Практическая значимость результатов диссертационной работы заключается в том, что:

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 электромагнитов позволяет повысить быстродействие и динамическую жесткость магнитного подвеса.

Диссертация Костюкова В.Д. состоит из введения, четырех глав, библиографического списка, заключения и приложения.

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.

Первая глава. Представлены особенности реализации электромагнитного подвеса вращающихся роторов агрегатов с применением комплекта электромагнитных подшипников, обозначен его состав и рассмотрено конструктивное исполнение агрегата с ЭМП. Рассмотрены известные линеаризованные математических модели и передаточные функции электромагнитного подшипника как объекта управления.

Вторая глава. Приведено аналитическое решение задачи определения величины смещения центра магнитной системы радиального электромагнитного подшипника относительно оси вращения ротора, обеспечивающей компенсацию силы веса при равенстве токов противоположных магнитов. Проанализировано функционирование электромагнитных подшипников при смещении центра магнитной системы и вариации напряжения питания. 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%.

Третья глава. Найдена линеаризованная математическая модель радиального электромагнитного подшипника как объекта управления при отдельном регулировании напряжений противоположных магнитов. Получены передаточные функции по управляющим напряжениям двух противоположных магнитов и по основному возмущающему воздействию – внешней силе, действующей на ротор. Произведен структурный синтез системы управления электромагнитным подшипником с отдельным регулированием напряжений электромагнитов. Разработана методика параметрического синтеза регуляторов предложенной системы управления и приведен пример расчета. Компьютерное моделирование показало, 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.

Четвёртая глава. Отмечено, что все современные системы управления электромагнитными подшипниками являются цифровыми, обладающими эффектами квантования сигналов по времени и уровню. В связи с этим разработаны структурные схемы предложенной системы управления с учетом квантования по времени. Проанализированы корни знаменателей новых непрерывных передаточных функций во всем возможном диапазоне перемещений ротора и изменения начальных значений токов. С учетом этого найдены дискретные передаточные функции непрерывной части цифровой системы управления ЭМП, в которой силовые преобразователи, регулирующие напряжения противоположных электромагнитов, выполняют также функции экстраполяторов нулевого порядка. Сравнительное моделирование непрерывных и дискретных передаточных функций показало расхождение результатов, не превышающее 0,5%, что свидетельствует об адекватности полученных дискретных передаточных функций.

Найдена дискретная передаточная функция разработанной цифровой системы управления электромагнитным подшипником с отдельным регулированием напряжений противоположных магнитов. Показано, что полученная дискретная передаточная функция достаточно точно описывает протекание процессов в предложенной цифровой системе управления ЭМП, поскольку величина найденной погрешности составляет менее 3,4%. Выполнено компьютерное моделирование, в программной среде Matlab, цифровой системы управления радиальным электромагнитным подшипником нагнетателя газоперекачивающего агрегата ГПА Ц-16 с дифференциальным законом регулирования напряжений противоположных магнитов с учетом новой математической модели объекта. Показано, что при смещении ротора относительно центра магнитной системы на 30 мкм расхождение времени переходного процесса по графику, полученного методом моделирования, с аналогичным временем, зафиксированным в ходе натурального эксперимента при запуске агрегата, не превышает 5%.

В заключении сформулированы основные результаты диссертационной работы.

Степень обоснованности научных положений, выводов и рекомендаций.

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.

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

1. На что влияет изменение нагрузки?
2. К чему может привести смещение центра магнитной системы?

3. Не рассмотрена принципиальная схема реализации силовой части.

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, кандидат

технических наук (05.09.03 – Электротехнические комплексы и системы), заведующий кафедрой «Электропривод и автоматизация промышленных установок» Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Ульяновский государственный технический университет».

19.08.2026

Доманов Виктор Иванович

Подпись Доманова Виктора Ивановича заверяю



Адрес Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Ульяновский государственный технический университет» 432027, г. Ульяновск, ул. Северный Венец, д. 32

Телефон: +7-(8422) 43-06-43

E-mail: rector@ulstu.ru

С отзывом ознакомлен 07.09.2026

к.т.н. Костюков В. Д.