

РАЗРАБОТКА ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЙ УСТАНОВКИ ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЯ НЕСУЩЕЙ СПОСОБНОСТИ ОДНОСТЕПЕННОГО МАГНИТНОГО ПОДВЕСА РОТОРА

Р.Р. Бадыков

renatbadykov@gmail.com

А.О. Ломачёв

al.lomachev@gmail.com

М.А. Бенедюк

benedyuk00@bk.ru

Е.М. Григорьев

grigory1287@gmail.com

Самарский университет, г. Самара, Российская Федерация

Аннотация

Создана установка для изучения динамики и несущей способности одноступенного магнитного подвеса ротора. Проведена оценка предлагаемой установки с учетом ее потенциального использования. С помощью установки исследована возможность создания подвеса ротора на основе гибридных активных магнитных подшипников. При использовании гибридных активных магнитных подшипников подвес ротора позволит заменить существующие классические активные магнитные подшипники, применяемые в вакуумной, криогенной и насосной технике и сократить расходы на электроэнергию, не изменяя геометрических параметров корпусов существующих агрегатов. Проведено экспериментальное исследование характеристик осевого активного электромагнита (получена минимальная необходимая мощность для удержания ротора в вертикальном положении). Создана конечно-элементная модель осевого активного магнитного подшипника. Выполнено сравнение результатов расчета модели с экспериментальными данными и тарирование индуктивного преобразователя перемещения. Спроектирована и изготовлена экспериментальная установка одноступенного магнитного подвеса ротора. Собрана электрическая схема для контроля экспериментальной установки. Приведена программа для пропорционально-интегрально-дифференциально-го регулятора и описан принцип ее действия применительно к указанной установке

Ключевые слова

Магнитный подвес ротора, осевой магнит, пропорционально-интегрально-дифференциальный регулятор (ПИД-регулятор), гибридный магнитный подшипник, электронная система управления

Поступила 12.11.2021

Принята 03.06.2022

© Автор(ы), 2022

Введение. Магнитным подвесом ротора является система опор осей, валов и других вращающихся деталей, работающая по принципу магнитной левитации, таким образом, опора является механически бесконтактной. Активный магнитный подшипник (АМП) — это управляемое электромагнитное устройство, которое удерживает вращающуюся часть машины (ротор) в заданном положении относительно неподвижной части (статора). Электромагниты создают электромагнитную силу, притягивающую элементы ротора [1, 2]. Силами притяжения, действующими на ротор со стороны электромагнитов, управляют с помощью электронной системы управления. Активный магнитный подвес создает отрицательную жесткость, т. е. чем ближе элемент ротора к электромагниту, тем с большей силой он к нему притягивается. Поэтому для его работы необходима система регулирования, которая будет поддерживать равновесное положение ротора при действии внешних сил [3]. Конструктивно АМП состоит из электромеханической (подшипник) и электронной систем управления.

Экспериментальная установка разработана для изучения возможности создания магнитного подвеса ротора в магнитном поле с помощью гибридных магнитных подшипников, а также для создания программы управления одноступенным магнитным подвесом.

Основным преимуществом гибридных подшипников, как и классических активных подшипников, является устойчивость к агрессивным средам, что позволяет использовать их при низкой температуре в условиях вакуума или невесомости. Согласно исследованиям [3–7], применение гибридных магнитных подшипников позволяет уменьшить (в 1,5–2 раза) потребление электроэнергии подвесом ротора по сравнению с использованием классических АМП. В то же время отсутствие контакта между ротором и подшипником определяет его высокую износостойкость. Следует учитывать, что проблемы с магнитным полем могут привести к разрушению узла, нагрев магнитов (в результате работы электрического тока) — к необходимости использования системы охлаждения и что роль систем управления выполняют сложные электрические схемы [8, 9].

В настоящее время электромагнитные подвесы широко применяются в установках перекачки природного газа, при этом более 50 % газоперекачивающих агрегатов в России оснащаются электромагнитными подвесами [10]. За счет теоретического уменьшения массы и необходимой мощности электромагнитного подвеса при использовании гибридных подшипников по сравнению с классическими подвесами АМП предложенная схема может найти широкое применение, например, в гироскопах, инерционных накопителях энергии и др. [3].

Исследование осевого магнитного подшипника. Исследование характеристик магнитного подвеса ротора включает в себя исследование характеристик электромагнита, являющегося частью осевого АМП экспериментальной установки. Экспериментальная установка создана для изучения возможности подвеса ротора в магнитном поле с использованием гибридных АМП. Гибридные магнитные подшипники представляют собой комбинацию из АМП (осевых и радиальных) и постоянных магнитов. Согласно результатам выполненных расчетов, предлагаемая компоновка позволит снизить на 50 % потребляемую мощность, что также положительно повлияет на массу блоков питания системы и сократит на 15 % стоимость системы для осевого магнита заданных габаритных размеров (рис. 1) [4]. Однако предварительно необходимо подтвердить результаты моделирования АМП на примере классического осевого электромагнита, для чего разработана конечно-элементная модель электромагнита для различных условий работы и проведены экспериментальные исследования для подтверждения результатов расчета.

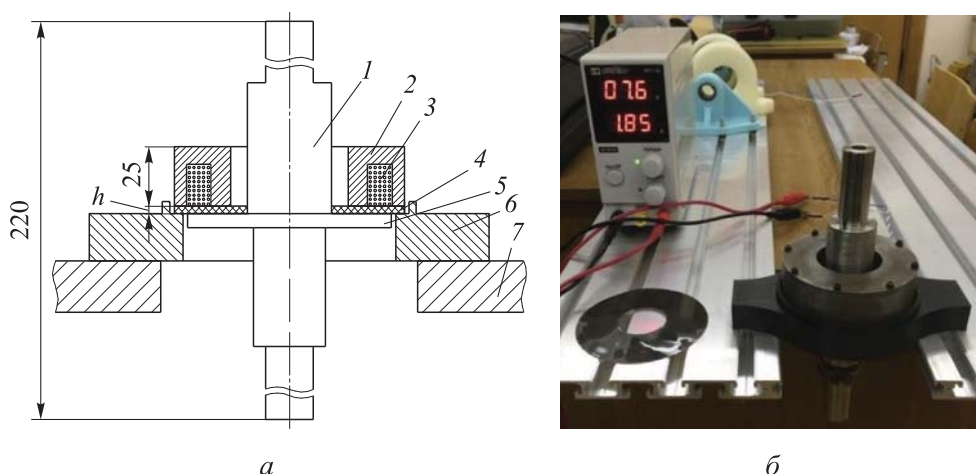


Рис. 1. Схема (а) и внешний вид (б) экспериментальной установки:
 1 — вал; 2 — электромагнит; 3 — медная обмотка; 4 — прокладка; 5 — диск вала;
 6 — корпус; 7 — опора

Экспериментальная установка (см. рис. 1) состоит из вала 1 (изготовлен из коррозионно-стойкой стали 12Х18Н10Т) массой 1,223 кг, электромагнита 2 с медной обмоткой 3, блока питания с возможностью регулирования тока и напряжения, прокладок 4 различной толщины h , имитирующих зазор между магнитом и диском 5 вала (изготовлен из электротехнической стали марки 10880). Электромагнит установлен вертикально в корпусе 6, расположенном на двух опорах 7. Корпус и прокладки выполнены из диа-

магнетика полилактида (PLA) на 3D-принтере. Для вычисления массы ротора создана 3D-модель в CAD-программе SolidWorks.

Программа FEMM 4.2 (свободно распространяемое программное обеспечение для решения задач методом конечных элементов по теории электромагнитного поля) использована для создания конечно-элементной модели электромагнита. Дополнительно заданы следующие характеристики: число витков 225, диаметр медной проволоки 0,511 мм, корпус электромагнита выполнен из стали M19 Steel (отечественный аналог — сталь марки 10880). Конечно-элементная модель электромагнита (рис. 2) осесимметричная, двумерная. Сила, создаваемая электромагнитом, зависит от числа витков, силы тока и зазора h (при неизменных геометрических размерах электромагнита) [2].

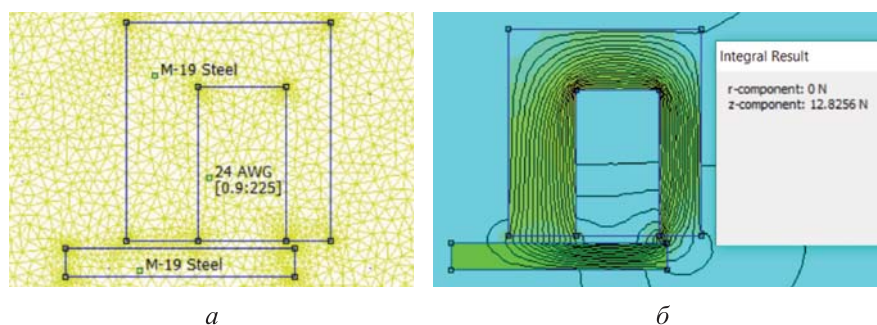


Рис. 2. Конечно-элементная модель электромагнита с зазором 0,9 мм (а); результаты расчета (б)

Экспериментально определена минимальная сила тока, необходимая для удержания ротора (компенсация силы тяжести), при различных значениях зазора h . К установленному в корпусе магниту притягивался закрепленный на валу диск. В зависимости от его толщины с помощью лабораторного блока питания определяли минимальную силу тока, необходимую для удержания ротора. Затем, используя программу FEMM 4.2, рассчитывали модель электромагнита для исследуемых значений зазора и силы тока. Разработанная конечно-элементная модель имеет следующие характеристики: характер задачи осесимметричный, число элементов 5045, число витков 225, проволока (медный кабель 24AWG) диаметром 0,511 мм, материал диска и корпуса магнита — сталь марки 10880.

Результаты исследования

Зазор h , мм	3,0	2,15	0,9
Сила тока, А	2,2	1,77	0,9

Вертикальная сила, Н:			
расчетная	11,821	2,325	12,83
экспериментальная	12,06	12,06	12,06
Разность результатов расчета			
и экспериментальных данных, %	2,03	2,15	6,35

Установлено, что разность результатов расчета и полученных экспериментальных данных не превысила 6,35 % для заданных значений зазора. Результаты исследования позволяют применять метод конечных элементов и программу FEMM 4.2 для решения задач по исследованию и созданию магнитных подшипников для подвески ротора.

Для создания АМП собрана установка, принципиальная схема которой приведена на рис. 3. Датчик перемещения 1 измеряет смещение подвешиваемого ферромагнитного тела 2 из заданного положения равновесия. Сигнал измерения обрабатывается регулятором 3. Усилитель мощности 4, питаемый от внешнего источника электроэнергии 5, преобразует этот сигнал в управляющий ток в обмотке электромагнита 6, который создает силу магнитного притяжения так, что нарушенное положение равновесия восстанавливается [3].

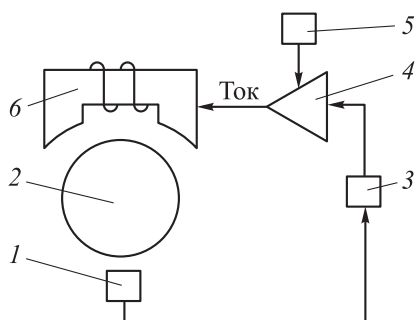


Рис. 3. Принципиальная схема работы подвеса ротора с применением одноступенного АМП:

1 — датчик перемещения; 2 — ферромагнитное тело; 3 — регулятор;
4 — усилитель мощности; 5 — внешний источник электроэнергии;
6 — электромагнит

Установка представляет собой осевой магнитный подвес ротора с двумя осевыми АМП. Такая компоновка позволяет исследовать невращающуюся систему, поскольку применен только осевой подшипник, используемый в роторах. Таким образом, ротор имеет одну степень свободы — осевое перемещение, ограниченное осевым АМП. Однако при добавлении радиальных подшипников можно исследовать системы, вращающиеся со скоростью до $10\,000\text{ мин}^{-1}$. Для работы при более высоких скоростях вращения требуется балансировка ротора. При этом АМП позволяет работать системе и при наличии статической неопределенности, частичном перекосе ротора и изменении направления вращения ротора. Конструкция собранной установки приведена на рис. 4.

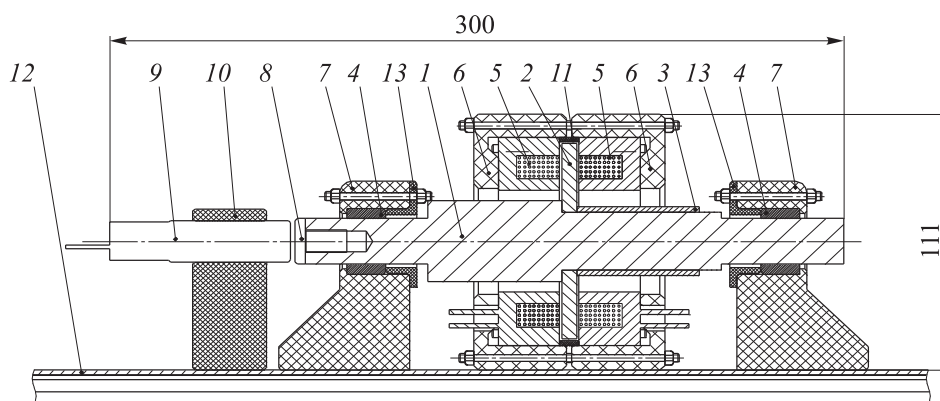


Рис. 4. Схема экспериментальной установки для исследования динамики осевого магнитного подвеса ротора:

1 — ротор; 2 — диск; 3 — втулка; 4 — подшипники скольжения; 5 — АМП; 6 — опоры АМП; 7 — опоры подшипников скольжения; 8 — болт; 9 — индукционный датчик; 10 — опора датчика; 11 — кольцо; 12 — рабочий стол; 13 — втулки

Электромеханическую часть составляют: ротор 1 массой 0,895 кг из стали 12X18H10T и диск 2 массой 0,244 кг из магнитного металла, закрепленный на роторе; втулка 3 массой 0,085 кг; АМП 5; опоры 6, удерживающие АМП; проставочное кольцо 11; осевые подшипники скольжения 4; опоры подшипников скольжения 7; болт 8 и втулки 13; индукционный датчик 9 и его опора; рабочий стол 12. На рабочий стол 12 установлена опора датчика, корпуса осевых подшипников и корпуса магнитов 5. В корпусные детали, выполненные из пластика (3D-печать), установлены индукционный датчик, осевые подшипники скольжения и магниты. Между магнитами вставлен диск, закрепленный на валу втулкой и винтом. Для более точной работы принято решение выполнить вал и втулку из диамагнетика, чтобы они не взаимодействовали с активными магнитами. Диск изготовлен из ферромагнитного материала, так как он обеспечивает заданное положение вала в осевом направлении. Винт выполнен из ферромагнитной стали для обеспечения работы индукционного датчика. Между магнитами установлено проставочное кольцо для обеспечения суммарного осевого зазора 1 мм.

Использованы два разных типа датчиков: 1) индуктивный преобразователь перемещения ISAB A41A-43P-5-P; 2) вихретоковый преобразователь AP2000A-08.05.0. Применение оптических датчиков ограничено из-за потенциальной возможности работы установки в загрязненных или агрессивных средах, поэтому данный тип датчиков не рассматривался.

Согласно техническим характеристикам индуктивного преобразователя перемещения, его линейная зона рабочего зазора находится в диапа-

зоне 1,25...4,00 мм, нелинейность составляет менее 3 %. Проведено тарирование преобразователя перемещений на универсальной испытательной машине QUASAR 25, имеющей точность перемещения траверсы 0,1 мкм (рис. 5). Установлено, что в требуемом диапазоне измерений 2...4 мм нелинейность составляет менее 1 % при коэффициентах линейной зависимости $a = 2,32143$ и $b = -0,62143$. Данное значение нелинейности удовлетворяет требованиям по обеспечению работоспособности активного магнитного подвеса ротора. Сравнение результатов тарирования и линейной зависимости приведено на рис. 6. Дополнительно при подборе коэффициентов использован вихретоковый датчик AP2000A-08.05.0, передаточная характеристика которого имеет линейную зависимость. При изменении расстояния от торца пробника до объекта в диапазоне 0...3,5 мм выходное напряжение меняется от 0 до 14,6 В.



Рис. 5. Тарирование индуктивного преобразователя перемещения ISAB A41A-43P-5-P

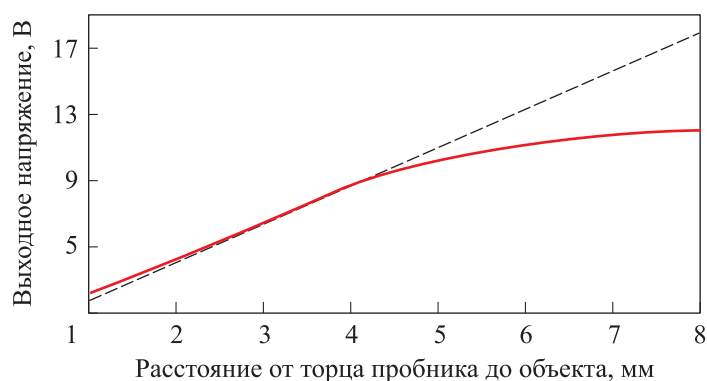


Рис. 6. Сравнение результатов тарирования (—) и расчета линейной зависимости (---)

Сигнал с датчика обрабатывается электронной системой управления и магнитные силы возвращают ротор в исходное положение. Электронную систему управления представляют индуктивный датчик положения с блоком питания, микроконтроллер ESP32, транзисторы с биполярным переходом 2N3904, полевые транзисторы P60NF06, резисторы различного сопротивления и лабораторный блок питания. Микроконтроллер имеет максимальное выходное напряжение 3,3 В, что недостаточно для создания необходимого магнитного поля. В связи с этим принято решение применить *n*-канальные полевые транзисторы P60NF06, что позволит подавать большой ток на магнит при подаче сигнала с микроконтроллера.

Индуктивный датчик является аналоговым. Для работы датчика необходимо с помощью АЦП, встроенного в плату, преобразовывать аналоговый сигнал в цифровой, вследствие этого возникают помехи [11]. Для выравнивания сигнала внедрен медианный фильтр, что негативно повлияло на быстродействие [12]. На первом этапе в качестве микроконтроллера использовалась плата Arduino UNO для отработки системы управления. На втором этапе для повышения быстродействия микроконтроллера применялась микросхема ESP32. Приведем следующие сравнительные характеристики микроконтроллеров Arduino UNO (числитель) и ESP32 (знаменатель): тактовая частота 16/240 МГц; АЦП 10-бит/12-бит; широтно-импульсная модуляция (ШИМ) 8-бит/10-бит.

Используя информацию, поступающую с датчиков положения, электронная система управляет положением ротора путем изменения тока в электромагнитах. В качестве закона управления выбран пропорционально-интегрально-дифференциальный регулятор (ПИД-регулятор), который позволяет выбрать наиболее подходящий режим работы [13].

Пропорциональная составляющая — это разность текущих значений с датчика и установки $P = \text{setpoint} - \text{input}$. Такая разность называется ошибкой регулирования (насколько далеко находится система от заданного значения), чем больше ошибка, тем больше управляющий сигнал. Если система пришла к заданному значению, то ошибка равна нулю, следовательно, и управляющий сигнал равен нулю. В результате этого пропорциональная составляющая не сможет привести систему к равновесному состоянию.

Интегральная составляющая суммирует с собой ту же ошибку (разность текущего и заданного значений), умноженную на период дискретизации системы, т. е. на время, прошедшее с предыдущего расчета (dt): $I = I + (\text{setpoint} - \text{input})dt$.

Дифференциальная составляющая представляет собой разность текущей и предыдущей ошибок, разделенную на время dt между измерениями. Эта составляющая реагирует на изменение сигнала с датчика, чем сильнее это изменение, тем большее значение прибавляется к общей сумме. Дифференциальная составляющая предназначена для быстрых систем вследствие своей способности регулировать резкость компенсации [3, 13, 14]:

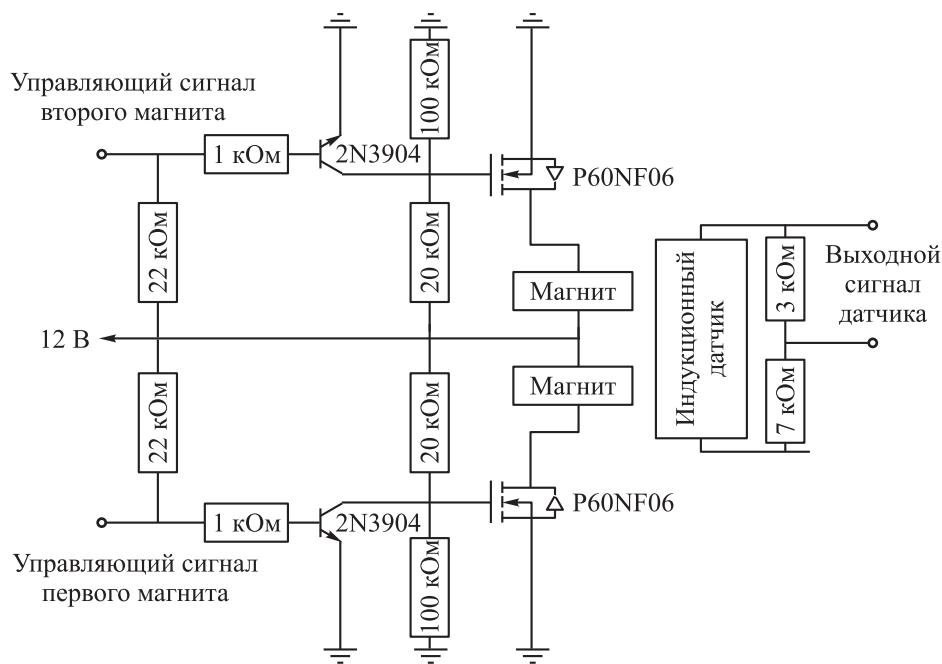
$$D = \frac{\text{setpoint} - \text{input} - \text{prevErr}}{dt};$$
$$\text{prevErr} = \text{err}.$$

Настройка ПИД-регулятора происходит вручную подбором коэффициентов kP , kD , kI , определенных в коде программы электронной системы управления. Коэффициенты полагаются подобранными, если ротор устанавливается в равновесное состояние по прошествии заданного временного интервала. Коэффициенты являются наиболее удачно подобранными, если установка выходит на рабочий режим менее чем за 1 с. Следует также учесть случай, когда положение датчика изменено. В такой ситуации предлагается алгоритм, который перед запуском основного цикла работы установки получает значения крайних точек и рассчитывает необходимые коэффициенты для исключения погрешности, связанной со смещением датчика.

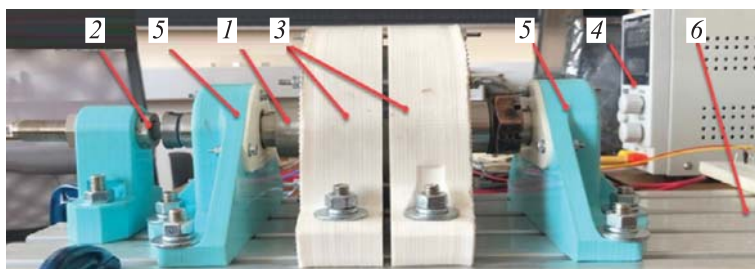
В зависимости от положения вала установки с индукционного датчика идет различное напряжение в диапазоне значений 2...10 В. Управляющая плата не может считывать такое напряжение, для этого устанавливается делитель напряжения, который позволяет обработать весь диапазон положений вала. Значения, полученные с датчика, проходят медианный фильтр для устранения шумов. Отфильтрованный результат отправляется в ПИД-регулятор. Основываясь на значениях коэффициентов, генерируют значение, которое отправляется на магниты с помощью ШИМ — процесса управления мощностью методом пульсирующего включения и выключения потребителя энергии [15, 16].

Управляющий сигнал с платы поступает на полевой транзистор (MOSFET) P60NF06, тем самым позволяя напряжению с блока питания поступить на магнит. Ввиду малости максимального напряжения (3,3 В), подаваемого платой ESP32, для открытия полевого транзистора в схему включен транзистор 2N3904. Управляющий сигнал с платы поступает на транзистор 2N3904, который открывает затвор у полевого транзистора P60NF06. Управляющий сигнал изначально подает половину тока (ток сме-

щения) на магниты, в случае перемещения вала (отклонения от положения равновесия под действием внешних сил) ток смещения на одном электромагните уменьшается, а на другом — возрастает на такое же значение для возвращения вала на исходную позицию [14]. Электронная схема экспериментальной установки приведена на рис. 7, а, фотография собранной установки — на рис. 7, б.



а



б

Рис. 7. Электронная схема (а) экспериментальной установки (вид сбоку, б):
1 — ротор; 2 — индукционный датчик; 3 — АМП; 4 — блок питания; 5 — осевые подшипники скольжения; 6 — рабочий стол

Заключение. С использованием лабораторного блока питания экспериментально определена минимальная сила тока, необходимая для удержания ротора (для компенсации силы тяжести) при различных значениях за-

зора. Проведен расчет модели электромагнита для исследуемого значения зазора и определенной силы тока с использованием программы FEMM 4.2. Разность результатов расчета и полученных экспериментальных данных не превышает 6,35 % для заданных значений зазора. Полученные результаты позволяют в дальнейшем использовать метод конечных элементов и программу FEMM 4.2 для решения задач по исследованию и созданию гибридных магнитных подшипников для подвески ротора.

В ходе создания экспериментальной установки собрана электронная цепь для управления напряжением, подаваемым на магниты. Время выполнения одной итерации программы составляет 112 мкс, частота работы микроконтроллера с управляющей программой — 9 кГц, потребляемая магнитами мощность в режиме покоя — 3 Вт.

Создана установка для исследования несущей способности одноступенного магнитного подвеса ротора со следующими теоретическими характеристиками: несущая способность 3,5 кг, суммарный вес установки 7,5 кг, габаритные размеры 300 и 111 мм.

ЛИТЕРАТУРА

- [1] Казаков Л.А. Электромагнитные устройства РЭА. М., Радио и связь, 1991.
- [2] Солнышкин Н.И. Теоретические основы электротехники. Моделирование электромагнитных полей. Псков, Изд-во ПсковГУ, 2013.
- [3] Журавлев Ю.Н. Активные магнитные подшипники. Теория, расчет, применение. СПб., Политехника, 2003.
- [4] Maslen E., Allaire P., Noh M., et al. Magnetic bearing design for reduced power consumption. *J. Tribol.*, 1996, vol. 118, no. 4, pp. 839–846.
DOI: <https://doi.org/10.1115/1.2831617>
- [5] Родин И.Ю., Арсланова Д.Н., Амосков В.М. и др. Технология комбинированных магнитолевитационных подвесов для высокоскоростного движения. *Тр. XVII Междунар. конф. «Электромеханика, электротехнологии, электротехнические материалы и компоненты»*. Алушта, Знак, 2018, с. 229–231.
- [6] Фирсов А.А., Амосков В.М., Арсланова Д.Н. и др. Комбинированный электромагнитный подвес с пониженным энергопотреблением для магнитолевитационных транспортных систем. *Актуальные проблемы электромеханики и электротехнологий АПЭЭТ-2017*. Екатеринбург, УрФУ, 2017, с. 85–89.
- [7] Zad H.S., Khan T.I., Lazoglu I. Design and adaptive sliding mode control of hybrid magnetic bearings. *IEEE Trans. Ind. Electron.*, 2017, vol. 65, no. 3, pp. 2537–2547.
DOI: <https://doi.org/10.1109/TIE.2017.2739682>
- [8] Верещагин В.П., Рогоза А.В. Моделирование процессов управления электромагнитами в системах магнитного подвеса. *Вопросы электромеханики. Труды ВНИИЭМ*, 2013, т. 136, № 5, с. 3–8.

- [9] Zhang W., Zhu H. Radial magnetic bearings: an overview. *Results Phys.*, 2017, vol. 7, pp. 3756–3766. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.rinp.2017.08.043>
- [10] Макриденко Л.А., Сарычев А.П., Абдурагимов А.С. и др. Методы проектирования систем электромагнитных подшипников в АО «Корпорация «ВНИИЭМ». *Вопросы электромеханики. Труды ВНИИЭМ*, 2016, т. 152, № 3, с. 3–14.
- [11] Yu J., Zhu C.S. A sensor-fault tolerant control method of active magnetic bearing in flywheel energy storage system. *IEEE VPPC*, 2016. DOI: <https://doi.org/10.1109/VPPC.2016.7791595>
- [12] Spece H., Fittro R., Knospe C. Optimization of axial magnetic bearing actuators for dynamic performance. *Actuators*, 2018, vol. 7, no. 4, art. 66. DOI: <https://doi.org/10.3390/act7040066>
- [13] Изосимова Т.А., Евдокимов Ю.К. Методика проектирования активного магнитного подвеса в составе роторной машины с автоматической системой управления. *Информационные технологии в электротехнике и электроэнергетике. Матер. XI Всерос. науч.-техн. конф.* Чебоксары, ЧГУ, 2018, с. 98–101.
- [14] Whitlow Z.W., Fittro R.L., Knospe C.R. Dynamic performance of segmented active magnetic thrust bearings. *IEEE Trans. Magn.*, 2016, vol. 52, no. 11, art. 8300711. DOI: <https://doi.org/10.1109/TMAG.2016.2587700>
- [15] Амосков В.М., Андреев Е.Н., Беляков В.А. и др. Разработка систем контроля рабочего зазора магнитных подвесов левитационного транспорта. *Транспортные системы и технологии*, 2016, т. 2, № 2, с. 39–42. DOI: <https://doi.org/10.17816/transsyst20162239-42>
- [16] Rossi M., Dezza F.C., Mauri M., et al. Rotor position estimation in a large air gap active magnetic bearing. *Proc. 11th IEEE CPE-POWERENG*, 2017, pp. 258–263. DOI: <https://doi.org/10.1109/CPE.2017.7915179>

Бадыков Ренат Раисович — канд. техн. наук, старший преподаватель кафедры конструкции и проектирования двигателей летательных аппаратов Самарского университета (Российская Федерация, 443086, г. Самара, Московское ш., д. 34).

Ломачёв Алексей Олегович — студент магистратуры, лаборант-исследователь кафедры конструкции и проектирования двигателей летательных аппаратов Самарского университета (Российская Федерация, 443086, г. Самара, Московское ш., д. 34).

Бенедюк Максим Андреевич — студент кафедры конструкции и проектирования двигателей летательных аппаратов Самарского университета (Российская Федерация, 443086, г. Самара, Московское ш., д. 34).

Григорьев Егор Максимович — студент магистратуры, лаборант-исследователь кафедры конструкции и проектирования двигателей летательных аппаратов Самарского университета (Российская Федерация, 443086, г. Самара, Московское ш., д. 34).

Просьба ссылаться на эту статью следующим образом:

Бадыков Р.Р., Ломачёв А.О., Бенедюк М.А. и др. Разработка экспериментальной установки для исследования несущей способности одностепенного магнитного подвеса ротора. *Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Сер. Машиностроение*, 2022, № 4 (143), с. 4–18. DOI: <https://doi.org/10.18698/0236-3941-2022-4-4-18>

**DEVELOPMENT OF AN EXPERIMENTAL SETUP TO STUDY
THE LOAD-CARRYING CAPACITY OF A SINGLE-STAGE
MAGNETIC ROTOR SUSPENSION**

R.R. Badykov

renatbadykov@gmail.com

A.O. Lomachev

al.lomachev@gmail.com

M.A. Benedyuk

benedyuk00@bk.ru

E.M. Grigoriev

grigory1287@gmail.com

Samara University, Samara, Russian Federation

Abstract

An installation for studying the dynamics and carrying capacity of a single-stage magnetic rotor suspension has been created. The evaluation of the proposed installation with regard to its potential use was carried out. The possibility of creating a rotor suspension based on hybrid active magnetic bearings was investigated with the help of the setup. If hybrid active magnetic bearings are used, the magnetic rotor suspension will allow to replace the existing classical active magnetic bearings used in vacuum, cryogenic and pumping equipment, reducing the energy costs without changing the geometric parameters of the existing units' housings. Experimental research of characteristics of axial active electromagnet is conducted (minimum power required to keep the rotor in vertical position is obtained). A finite-element model of the axial active magnetic bearing is created. The calculation results of the model are compared with the experimental data and the inductive transducer is calibrated. Experimental installation of a single-step rotor magnetic suspension is designed and manufactured. An electrical circuit for controlling the experimental setup is assembled. The program for PID-controller is given and its principle of operation is described with respect to the specified installation

Keywords

*Magnetic rotor suspension,
axial magnet, PID-controller,
hybrid magnetic bearing,
electronic control system*

Received 12.11.2021

Accepted 03.06.2022

© Author(s), 2022

REFERENCES

- [1] Kazakov L.A. Elektromagnitnye ustroystva REA [Electromagnetic devices of RAA]. Moscow, Radio i svyaz Publ., 1991.
- [2] Solnyshkin N.I. Teoreticheskie osnovy elektrotekhniki. Modelirovanie elektromagnitnykh poley [Theoretical fundamentals of electrical engineering. Simulation of electromagnetic fields]. Pskov, Pskov SU Publ., 2013.
- [3] Zhuravlev Yu.N. Aktivnye magnitnye podshipniki. Teoriya, raschet, primeneniye [Active magnetic bearings. Theory, calculation, application]. St. Petersburg, Politekhnik Publ., 2003.
- [4] Maslen E., Allaire P., Noh M., et al. Magnetic bearing design for reduced power consumption. *J. Tribol.*, 1996, vol. 118, no. 4, pp. 839–846.
DOI: <https://doi.org/10.1115/1.2831617>
- [5] Rodin I.Yu., Arslanova D.N., Amoskov V.M., et al. [Technology of combined magnetology suspension for high-speed traffic]. *Tr. XVII Mezhdunar. konf. "Elektromekhanika, elektrotekhnologii, elektrotekhnicheskie materialy i komponenty"* [Proc. XVII Int. Conf. Electromechanics, Electrotechnologies, Electromechanic Materials and Components]. Alusha, Znak Publ., 2018, pp. 229–231 (in Russ.).
- [6] Firsov A.A., Amoskov V.M., Arslanova D.N., et al. [Combined electromagnetic suspension with reduced energy consumption for magnetogenic transport systems]. *Aktualnye problemy elektromekhaniki i elektrotekhnologiy APEET-2017* [Topical Problems of Electromechanics and Electrical Technologies APEET-2017]. Ekaterinburg, UrFU Publ., 2017, pp. 85–89 (in Russ.).
- [7] Zad H.S., Khan T.I., Lazoglu I. Design and adaptive sliding mode control of hybrid magnetic bearings. *IEEE Trans. Ind. Electron.*, 2017, vol. 65, no. 3, pp. 2537–2547.
DOI: <https://doi.org/10.1109/TIE.2017.2739682>
- [8] Vereshchagin V.P., Rogoza A.V. Design and adaptive sliding mode control of hybrid magnetic bearings. *Voprosy elektromekhaniki. Trudy VNIIEM* [Electromechanical Matters. VNIIEM Studies], 2013, vol. 136, no. 5, pp. 3–8 (in Russ.).
- [9] Zhang W., Zhu H. Radial magnetic bearings: an overview. *Results Phys.*, 2017, vol. 7, pp. 3756–3766. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.rinp.2017.08.043>
- [10] Makridenko L.A., Sarychev A.P., Abduragimov A.S., et al. VNIIEM methods for electromagnetic bearing design. *Voprosy elektromekhaniki. Trudy VNIIEM* [Electromechanical Matters. VNIIEM Studies], 2016, vol. 152, no. 3, pp. 3–14 (in Russ.).
- [11] Yu J., Zhu C.S. A sensor-fault tolerant control method of active magnetic bearing in flywheel energy storage system. *IEEE VPPC*, 2016.
DOI: <https://doi.org/10.1109/VPPC.2016.7791595>
- [12] Spece H., Fittro R., Knospe C. Optimization of axial magnetic bearing actuators for dynamic performance. *Actuators*, 2018, vol. 7, no. 4, art. 66.
DOI: <https://doi.org/10.3390/act7040066>
- [13] Izosimova T.A., Evdokimov Yu.K. [Method of designing an active magnetic suspension in a rotary machine with an automatic control system]. *Informatsionnye tekhnologii*

v elektrotekhnike i elektroenergetike Mater. XI Vseros. nauch.-tekh. konf. [Information Technologies in Electrical Engineering and Power Engineering. Proc. XI Russ. Sc.-Tech. Conf.]. Cheboksary, Cheboksary SU Publ., 2018, pp. 98–101 (in Russ.).

[14] Whitlow Z.W., Fittro R.L., Knospe C.R. Dynamic performance of segmented active magnetic thrust bearings. *IEEE Trans. Magn.*, 2016, vol. 52, no. 11, art. 8300711.

DOI: <https://doi.org/10.1109/TMAG.2016.2587700>

[15] Amoskov V.M., Andreev E.N., Belyakov V.A., et al. Dynamic measurements of train-to-track air gap for levitated transport. *Transportnye sistemy i tekhnologii* [Transportation Systems and Technology], 2016, vol. 2, no. 2, pp. 39–42 (in Russ.).

DOI: <https://doi.org/10.17816/transsyst20162239-42>

[16] Rossi M., Dezza F.C., Mauri M., et al. Rotor position estimation in a large air gap active magnetic bearing. *Proc. 11th IEEE CPE-POWERENG*, 2017, pp. 258–263.

DOI: <https://doi.org/10.1109/CPE.2017.7915179>

Badykov R.R. — Cand. Sc. (Eng.), Senior Lecturer, Department of Aircraft Engine Design and Construction, Samara University (Moskovskoe shosse 34, Samara, 443086 Russian Federation).

Lomachev A.O. — Master's Degree Student, Laboratory Assistant-Researcher, Department of Aircraft Engine Design and Construction, Samara University (Moskovskoe shosse 34, Samara, 443086 Russian Federation).

Benedyuk M.A. — Student, Department of Aircraft Engine Design and Construction, Samara University (Moskovskoe shosse 34, Samara, 443086 Russian Federation).

Grigoriev E.M. — Master's Degree Student, Laboratory Assistant-Researcher, Department of Aircraft Engine Design and Construction, Samara University (Moskovskoe shosse 34, Samara, 443086 Russian Federation).

Please cite this article in English as:

Badykov R.R., Lomachev A.O., Benedyuk M.A., et al. Development of an experimental setup to study the load-carrying capacity of a single-stage magnetic rotor suspension. *Herald of the Bauman Moscow State Technical University, Series Mechanical Engineering*, 2022, no. 4 (143), pp. 4–18 (in Russ.).

DOI: <https://doi.org/10.18698/0236-3941-2022-4-4-18>