

РАЗРАБОТКА ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЙ УСТАНОВКИ И ЧИСЛЕННОЙ МОДЕЛИ ОДНОСТЕПЕННОГО МАГНИТНОГО ПОДВЕСА РОТОРА

© 2023

- М. А. Бенедюк** студент института двигателей и энергетических установок; Самарский национальный исследовательский университет имени академика С.П. Королёва; benedyuk00@bk.ru
- А. О. Ломачев** студент института двигателей и энергетических установок; Самарский национальный исследовательский университет имени академика С.П. Королёва; al.lomachev@gmail.com
- Р. Р. Бадыков** доцент кафедры конструкции и проектирования двигателей летательных аппаратов; Самарский национальный исследовательский университет имени академика С.П. Королёва; renatbadykov@gmail.com
- К. В. Безбородова** студент института двигателей и энергетических установок; Самарский национальный исследовательский университет имени академика С.П. Королёва; krityborodova@gmail.com
- А. А. Юртаев** студент института двигателей и энергетических установок; Самарский национальный исследовательский университет имени академика С.П. Королёва; don.yurtaev2016@yandex.ru

В статье представлены результаты работ по созданию экспериментальной установки, её испытанию, а также по разработке численной модели одностепенного магнитного подвеса ротора с применением осевых электромагнитов. Основной целью создания установки является проверка результатов разработанной численной конечно-элементной модели одностепенного подвеса ротора. Для экспериментальной установки разработана система автоматического управления. Собрана электросхема на базе микроконтроллера ESP32 с тактовой частотой 240 МГц и широтно-импульсной модуляцией с разрядностью 10 бит. Разработана программа пропорционально-интегрально-дифференциального (ПИД) регулятора. Подобраны коэффициенты kP , kD , kI , используемые в коде программы электронной системы управления (ПИД-регулятора). Проведено экспериментальное исследование несущей способности осевого активного магнитного подшипника при воздействии внешней осевой силы. Определена потребная мощность осевого активного магнитного подшипника. Определена максимальная несущая способность установки для подобранных коэффициентов ПИД-регулятора. Создана осесимметричная конечно-элементная модель осевого активного магнитного подшипника в программе open-source FEMM 4.2. Рассчитана несущая способность установки для заданной величины силы тока. Результаты численного моделирования сравнены с полученными экспериментальными данными. Изложены основные принципы создания и работы экспериментальной установки и её численной модели.

Магнитный подвес ротора; осевой магнит; магнитный подшипник; электронная система управления; конечно-элементная модель; FEMM 4.2

Цитирование: Бенедюк М.А., Ломачев А.О., Бадыков Р.Р., Безбородова К.В., Юртаев А.А. Разработка экспериментальной установки и численной модели одностепенного магнитного подвеса ротора // Вестник Самарского университета. Аэрокосмическая техника, технологии и машиностроение. 2023. Т. 22, № 1. С. 41-50. DOI: 10.18287/2541-7533-2023-22-1-41-50

Введение

Магнитным подвесом ротора является система опор осей, валов и других вращающихся деталей, работающая на принципе магнитной левитации, то есть 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]. Магнитные силы притяжения, действующие на ротор со стороны электромагнитов, управляются с помощью электронной системы управления. Активный магнитный подвес создаёт отрицательную жёсткость, т.е. чем ближе элемент ротора к электромагниту, тем с большей силой он к нему притягивается. Поэтому для работы активного магнитного подвеса необходима система управления, которая поддерживает равновесное положение ротора при действии внешних сил [3]. Конструктивно АМП состоит из двух основных частей: электромеханической (подшипник) и электронной системы управления.

Целью создания экспериментальной установки с использованием осевого АМП является сравнение результатов численных и аналитических моделей с полученными экспериментальными данными и последующая доработка моделей. В дальнейшем планируется использование проверенных моделей для создания подвеса ротора в магнитном поле с использованием гибридных магнитных подшипников. Использование гибридных активных магнитных подшипников позволит снизить потребляемую мощность в сравнении с классической системой подвеса АМП. Это приведёт к теоретическому уменьшению массы всей системы и, как следствие, её стоимости.

Создание одностепенного магнитного подвеса ротора

Для создания активного магнитного подвеса была собрана экспериментальная установка, принципиальная схема которой показана на рис. 1.

Датчик перемещения 1 измеряет смещение подвешиваемого ферромагнитного тела 2 из заданного положения равновесия под действием внешней силы. 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 создаёт силу магнитного притяжения. Воздействие внешней силы восстанавливает нарушенное положение равновесия [3].

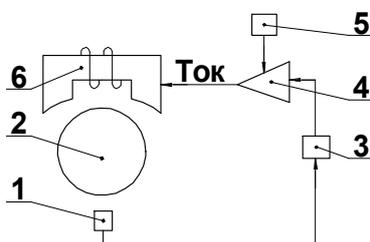


Рис. 1. Принципиальная схема работы подвеса ротора с применением одностепенного активного магнитного подшипника

Конструктивно установка представляет собой осевой магнитный подвес ротора с двумя осевыми электромагнитами (рис. 2).

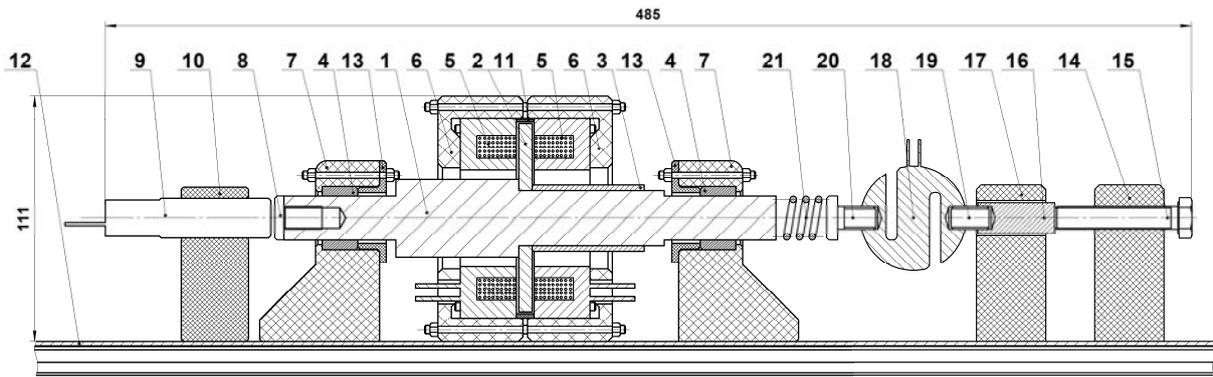


Рис. 2. Схема экспериментальной установки для исследования динамики осевого магнитного подвеса ротора

Электромеханическую часть составляют: ротор *1*, выполненный из стали 12x18н10т; диск *2*, закреплённый на роторе и выполненный из магнитного металла; втулка *3*; болт *8*; АМП *5*; опоры *6*, удерживающие АМП; проставочное кольцо *11* из алюминиевого сплава Д16; осевые подшипники скольжения *4*; опоры подшипников скольжения *7* и втулки *13*; индуктивный датчик *9* и его опора *10*; рабочий стол *12*.

На рабочий стол *12* установлена опора датчика *10*, корпуса осевых подшипников *7* и опоры магнитов *6*. Корпусные детали выполнены из пластика PLA, опоры магнитов – из пластика ABS (3D-печать). В корпусные детали установлены: индукционный датчик *9*, осевые подшипники скольжения *4* и магниты *5*. Между магнитами вставлен диск *2*, закреплённый на валу *1* с втулкой *3* и винтом *8*. Для более точной работы было принято решение делать вал и втулку из диамагнетика, чтобы они не взаимодействовали с активными магнитами. Диск и стальные корпуса магнитов изготовлены из ферромагнитного материала – электротехническая сталь 10880, т.к. благодаря ему обеспечивается заданное положение вала в осевом направлении. Винт выполнен из ферромагнитной стали для обеспечения работы индуктивного датчика. Между магнитами установлено проставочное кольцо *11* для обеспечения суммарного осевого зазора в 1 мм.

В корпус болта *14* вкручен болт *15*, который при затяжке воздействует на шток *16*, свободно перемещающийся в осевом направлении в корпусе *17*. Шток жестко связан с датчиком осевого усилия *18* посредством винтового соединения *19*. С противоположной стороны в датчик вкручен болт *20*, который воздействует на пружину *21*. При затяжке болта *14* обеспечивается постоянное усилие на ротор *1*.

Использованы два разных типа датчиков: индуктивный преобразователь перемещения ISAB A41A-43P-5-P и тензометрический датчик усилия DYLY-102S. Показания с датчика осевого усилия выводятся на внешний индикатор. При разработке активных магнитных подвесов ротора в качестве преобразователей перемещения могут быть применены как индуктивные, так и токовихревые датчики. Применение оптических датчиков ограничено в силу потенциальной возможности работы установки в грязных или агрессивных средах и поэтому в дальнейшем данный тип не рассматривался [3; 4].

Индуктивный датчик является аналоговым, но для работы необходимо преобразовывать аналоговый сигнал в цифровой при помощи внешнего аналого-цифрового преобразователя (АЦП) [5]. На первом этапе в качестве микроконтроллера использовалась плата Arduino UNO для отработки системы управления. Затем для повышения быстродействия микроконтроллера была использована микросхема ESP32 [6]. Их сравнительные характеристики приведены в табл. 1.

Таблица 1. Сравнение характеристик Arduino UNO и ESP32

Микроконтроллер	Тактовая частота	ШИМ
Arduino UNO	16 МГц	8-бит
ESP32	240 МГц	10-бит

Используя информацию, поступающую с датчиков положения, электронная система управляет положением ротора, изменяя ток в электромагнитах. В качестве закона управления выбран пропорционально-интегрально-дифференциальный регулятор (ПИД-регулятор), который позволяет выбрать наиболее подходящий режим работы [7].

Пропорциональная составляющая – это разность текущего значения с датчика и установки:

$$P = \text{setpoint} - \text{input}.$$

Данная разность называется ошибкой управления (насколько далеко находится система от заданного значения). Чем больше ошибка, тем больше будет управляющий сигнал. Однако если система пришла к заданной величине, то ошибка равна нулю, а следовательно управляющий сигнал также равен нулю. В результате этого «пропорциональная» составляющая не сможет привести систему к равновесному состоянию.

Интегральная составляющая I суммирует в саму себя ту же самую ошибку, разность текущего и заданного значения, умноженную на период дискретизации системы (на время, прошедшее с предыдущего расчета dt):

$$I = I + (\text{setpoint} - \text{input}) \cdot dt.$$

Дифференциальная составляющая D представляет собой разность текущей и предыдущей ошибки, поделённую на время между измерениями dt . Дифференциальная составляющая реагирует на изменение сигнала с датчика: чем сильнее происходит это изменение, тем большее значение прибавляется к общей сумме. Данная составляющая предназначена для быстрых систем из-за своей способности регулировать резкость компенсации [3; 7; 8].

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

$$\text{prevErr} = \text{err}.$$

Настройка ПИД-регулятора происходит «вручную» подбором коэффициентов kP , kD , kI , определённых в коде программы электронной системы управления. Коэффициенты считаются подобранными, если ротор устанавливается в равновесное состояние по прошествии заданного временного интервала. В результате настройки ротор установки при её запуске перемещается в состояние равновесия менее чем за 1 секунду. Перед началом работы установки происходит автоматическое определение равновесного положения ротора. Прописан алгоритм, который предварительно перед запуском основного цикла работы установки получает значения крайних точек и рассчитывает необходимые коэффициенты для того, чтобы устранить погрешность, связанную со смещением датчика.

В зависимости от положения вала установки с индукционного датчика на управляющую плату поступает сигнал в диапазоне от 2 до 10 В. Управляющая плата не способна считывать такое напряжение, для этого установлен делитель напряжения, который позволяет обработать весь диапазон положений вала. Полученный результат отправляется в ПИД-регулятор. Основываясь на значениях коэффициентов, генерируется значение, которое отправляется на магниты при помощи широтно-импульсной модуляции (ШИМ). ШИМ – это процесс управления мощностью методом пульсирующего включения и выключения потребителя энергии [9; 10].

Управляющий сигнал с платы поступает на полевой транзистор (MOSFET) P60NF06, тем самым позволяя напряжению с блока питания поступить на магнит. Ввиду того, что максимальное напряжение, которое способна подать плата ESP32 – 3.3 В, слишком мало для открытия полевого транзистора, в схему включен транзистор 2N3904. Управляющий сигнал с платы поступает на транзистор 2N3904, который, в свою очередь, открывает затвор у полевого транзистора P60NF06.

Управляющий сигнал изначально подаёт половину тока (ток смещения) на магниты, в случае перемещения вала (отклонения от положения равновесия под действием внешних сил) ток смещения на одном из электромагнитов уменьшается, а на другом возрастает на такую же величину для возвращения вала на исходную позицию [8]. Электронная схема системы управления установки представлена на рис. 3.

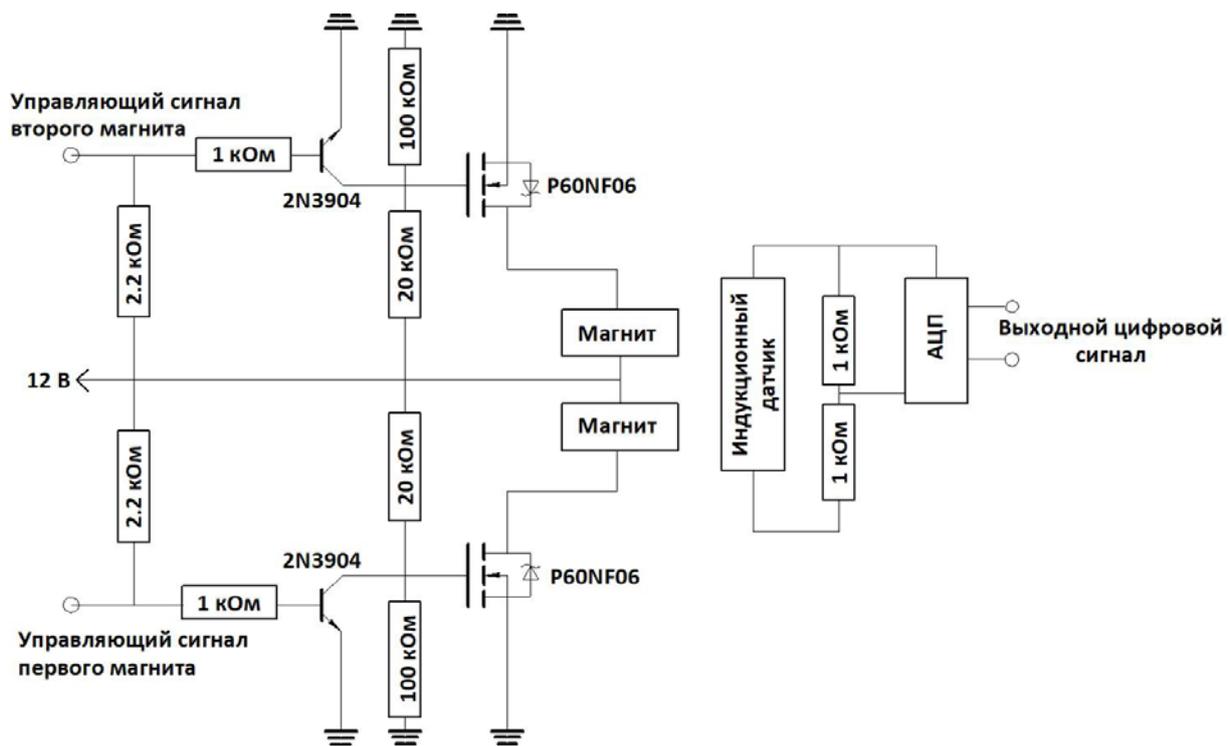


Рис. 3. Электронная схема системы управления экспериментальной установки

Ввиду того, что внешняя сила направлена справа налево, в соответствии с рис. 2 нагружается только один из электромагнитов (электромагнит 2 притягивает диск ротора к себе, сопротивляясь воздействию внешней силы), а затрачиваемая мощность другого магнита с увеличением внешнего усилия уменьшается (электромагнит 1 на рис. 4 и нижний в КЭ модели на рис. 5 соответственно). Следовательно сравниваться будут параметры с тягового магнита 2.

Создание конечно-элементной модели одностепенного магнитного подвеса ротора

Конечно-элементная модель осевого АМП была создана в программном обеспечении open source FEMM 4.2 (программа для решения задач методом конечных элементов по теории электромагнитного поля). В результате эксперимента для различных значений задаваемой осевой внешней силы замерены необходимые величины силы тока на каждом из активных магнитов. Полученные величины силы тока заданы как граничные условия для конечно-элементной модели. Также заданы следующие характеристики: количество витков – 118, диаметр медной проволоки – 0,511 мм, материал проволоки – медь, материал корпуса – M19 Steel (отечественный аналог – электротехническая сталь 10880). Конечно-элементная модель электромагнита, представленная на рис. 4, является осесимметричной, двухмерной. Зазор между диском и магнитами 1 мм с каждой стороны как в созданной численной модели, так и на экспериментальной установке. Модель состоит из 6300 элементов. После определения параметров численной модели был произведен расчёт несущей способности осевого активного магнитного подшипника.

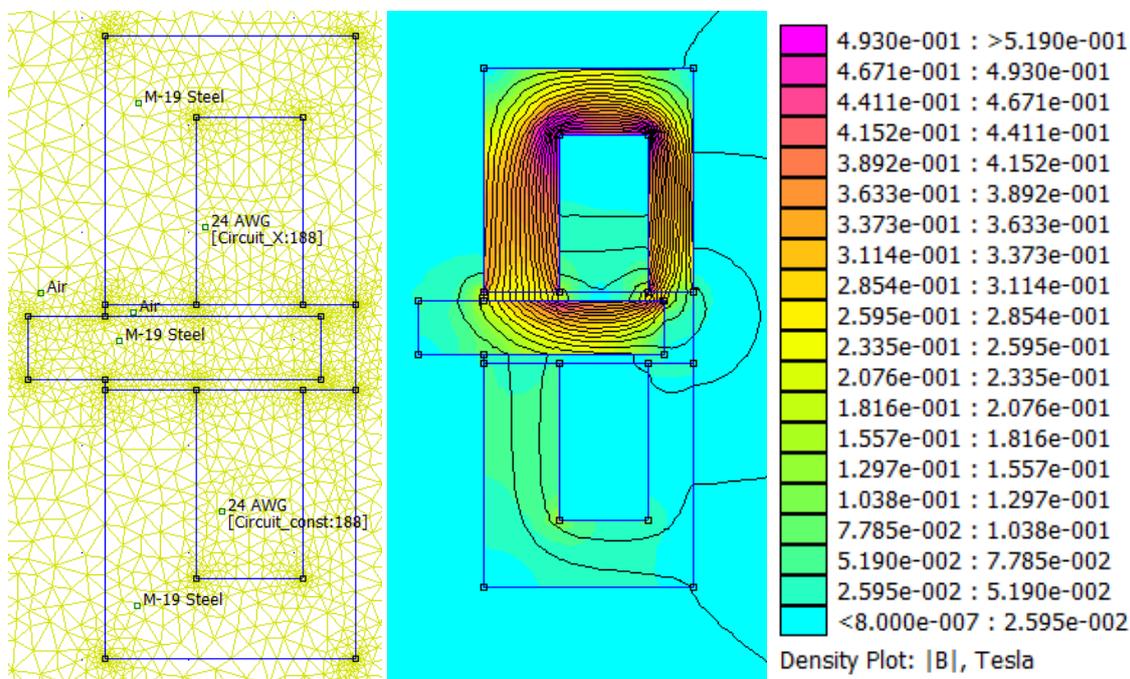


Рис. 4. Конечно-элементная модель одностепенного магнитного подвеса ротора и распределение магнитной индукции

Сравнение результатов расчёта и экспериментальных данных

При проведении эксперимента задавалось различное значение осевого усилия посредством пружинного механизма. Для каждой точки заданного осевого усилия после завершения переходного процесса определялись как общее напряжение и сила тока, подаваемые с блока питания, так и напряжения и сила тока на каждом из электромагнитов. Сравнение полученных данных приведено в табл. 2 и на рис. 5.

Таблица 2. Сравнение рассчитанных и экспериментальных данных 2-го (тягового) электромагнита

Параметр	Значение					
Экспериментальные данные						
Несущая способность, Н (кг)	9,81 (1)	19,52 (1,99)	29,63 (3,02)	39,24 (4)	49,15 (5,01)	59,15 (6,03)
Суммарная сила тока, А	0,88	1,21	1,49	1,7	1,88	2,09
Суммарное напряжение, В	12	12	12	12	12	12
Мощность суммарная, Вт	10,56	14,52	17,88	20,4	22,56	25,08
Сила тока на 1-м АМП, А	0,04	0,03	0,03	0,03	0,03	0,02
Напряжение на 1-м АМП, В	0,19	0,17	0,16	0,15	0,14	0,14
Мощность 1-го АМП, Вт	0,0076	0,0051	0,0048	0,0045	0,0042	0,0028
Сила тока на 2-м АМП, А	0,94	1,34	1,66	1,9	2,11	2,34
Напряжение на 2-м АМП, В	3,36	4,72	5,86	6,7	7,5	8,29
Мощность 2-го АМП, Вт	3,16	6,32	9,73	12,73	15,83	19,47
Расчётные данные						
Несущая способность, Н	10,21	20,83	32,08	42,02	51,86	63,83
Сила тока на 2-м АМП, А	0,94	1,34	1,66	1,9	2,11	2,34
Напряжение на 2-м АМП, А	3,34	4,76	5,9	6,75	7,5	8,29
Мощность 2-го АМП, Вт	3,14	6,38	9,79	12,83	15,82	19,46
Сравнение						
Разница осевого усилия, %	4,04	6,71	8,14	7,08	5,52	7,90
Разница потребной мощности, %	0,57	0,90	0,68	0,79	0,01	0,04

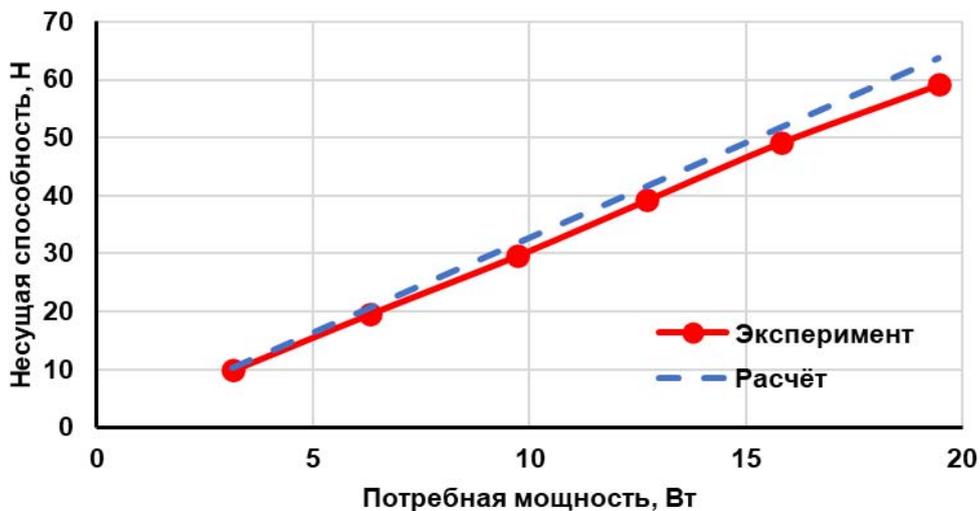


Рис. 5. Сравнение экспериментальной и расчётной несущей способности осевого активного магнитного подшипника

Установлено, что разница между результатами расчёта и полученными экспериментальными данными не превысила 10% по несущей способности, что объясняется погрешностями в изготовлении пластиковых опор для электромагнитов (магниты располагаются под углом к диску ротора). Разница между расчётной потребной мощностью и фактически замеренной на установке не превысила 1%. Также наблюдается падение напряжения на магните I при увеличении внешней силы, что соответствует принципу работы системы автоматического управления. Результаты исследования 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.

Заключение

Создана экспериментальная установка одноступенного магнитного подвеса ротора с применением активных магнитных подшипников. Написана программа ПИД-регулятора, разработана и собрана электронная цепь, которая позволяет управлять напряжением, подаваемым на магниты. Время, которое потребовалось на выполнение одной итерации программы, составило 112 мкс. Соответственно частота работы микроконтроллера с управляющей программой составила 9 кГц. Мощность, потребляемая магнитами в режиме покоя, составила 3 Вт.

В результате проделанной работы создана установка для исследования несущей способности одноступенного магнитного подвеса ротора со следующими характеристиками: несущая способность 6,5 кг; суммарная масса установки 8,5 кг; габаритные размеры 485 и 111 мм.

С использованием программы FEMM 4.2 произведён расчёт модели магнитного подвеса для замеренных величин силы тока. Установлено, что разница между результатами расчёта и полученными экспериментальными данными не превысила 10% по несущей способности и 1% по потребной мощности. Результаты исследования позволяют в дальнейшем использовать метод конечных элементов с заданными настройками и программу FEMM 4.2 для решения задач по исследованию и созданию гибридных магнитных подшипников для подвески ротора.

Библиографический список

1. Казаков Л.А. Электромагнитные устройства РЭА: справочник. М.: Радио и связь, 1991. 352 с.
2. Солнышкин Н.И. Теоретические основы электротехники. Моделирование электромагнитных полей. Псков: Издательство ПсковГУ, 2013. 64 с.
3. Журавлёв Ю.Н. Активные магнитные подшипники: Теория, расчёт, применение. СПб: Политехника, 2003 206 с.
4. Макриденко Л.А., Сарычев А.П., Абдурагимов А.С., Верещагин В.П., Рогоза А.В. Методы проектирования систем электромагнитных подшипников в АО Корпорация «ВНИИЭМ» // Вопросы электромеханики. Труды ВНИИЭМ. 2016. Т. 152, № 3. С. 3-14.
5. Yu J., Zhu Ch. A sensor-fault tolerant control method of active magnetic bearing in flywheel energy storage system // Proceedings of the IEEE Vehicle Power and Propulsion Conference (VPPC) (October, 17-20, 2016, Hangzhou, China). DOI: 10.1109/VPPC.2016.7791595
6. Spece H., Fittro R., Knospe C. Optimization of axial magnetic bearing actuators for dynamic performance // Actuators. 2018. V. 7, Iss. 4. DOI: 10.3390/act7040066
7. Изосимова Т.А., Евдокимов Ю.К. Методика проектирования активного магнитного подвеса в составе роторной машины с автоматической системой управления // Материалы XI Всероссийской научно-технической конференции «Информационные технологии в электротехнике и электроэнергетике» (08 июня 2018 г., Чебоксары). Чебоксары: Чувашский государственный университет имени И.Н. Ульянова, 2018. С. 98-101.
8. Whitlow Z.W., Fittro R.L., Knospe C.R. Dynamic performance of segmented active magnetic thrust bearings // IEEE Transactions on Magnetics. 2016. V. 52, Iss. 11. DOI: 10.1109/TMAG.2016.2587700
9. Амосков В.М., Андреев Е.Н., Беляков В.А., Васильев В.Н., Васильева О.С., Дёмина А.А., Капаркова М.В., Кухтин В.П., Ламзин Е.А., Ланцетов А.А.,

Ланцетов В.А., Ларионов М.С., Неженцев А.Н., Родин И.Ю., Самойлов С.К., Сычевский С.Е., Фирсов А.А., Шатиль Н.А. Разработка систем контроля рабочего зазора магнитных подвесов левитационного транспорта // Транспортные системы и технологии. 2016. Т. 2, № 2. С. 39-42. DOI: 10.17816/transsyst20162239-42

10. Rossi M., Dezza F.C., Mauri M., Carmeli M.S., Braghin F. Rotor position estimation in a large air gap active magnetic bearing // Proceedings of the 11th IEEE International Conference on Compatibility, Power Electronics and Power Engineering (CPE-POWERENG) (April, 4-6, 2017, Spain). P. 258-263. DOI: 10.1109/CPE.2017.7915179

DEVELOPMENT OF AN EXPERIMENTAL PLANT AND A NUMERICAL MODEL OF AN AXIAL MAGNETIC ROTOR SUSPENSION

© 2023

- M. A. Bedyuk** Student of the Institute of Engine and Power Plant Engineering; Samara National Research University, Samara, Russian Federation; benedyuk00@bk.ru
- A. O. Lomachev** Student of the Institute of Engine and Power Plant Engineering; Samara National Research University, Samara, Russian Federation; al.lomachev@gmail.com
- R. R. Badykov** Candidate of Science (Engineering), Associate Professor of the Department of Aircraft Engine Construction and Design; Samara National Research University, Samara, Russian Federation; renatbadykov@gmail.com
- K. V. Bezborodova** Student of the Institute of Engine and Power Plant Engineering; Samara National Research University, Samara, Russian Federation; kriyborodova@gmail.com
- A. A. Yurtaev** Student of the Institute of Engine and Power Plant Engineering; Samara National Research University, Samara, Russian Federation; don.yurtaev2016@yandex.ru

This article presents the results of the work on the creation of an experimental plant, its testing, as well as the development of a computational model of a rotor magnetic suspension with the use of axial electromagnets. The main purpose of producing the plant was to test the results of the developed numerical finite element model. An automatic control system was developed for the experimental installation. The electrical circuit was assembled on the basis of a ESP32 microcontroller with a clock frequency of 240 MHz and a PWM with a capacity of 10 bits. A PID-regulator program was developed. The coefficients kP , kD , kI used in the code of the electronic control system program (PID-controller) were selected. An experimental study of the bearing capacity of the axial active magnetic bearing under the influence of an external axial force was conducted. The required power of the axial active magnetic bearing was determined. The maximum load-bearing capacity of the installation for the selected coefficients of the PID-controller was determined. An axisymmetric finite-element model of the axial active magnetic bearing was created in the open-source program FEMM 4.2. The load-bearing capacity of the installation for a given current intensity value was calculated. The results of the numerical modelling were compared with the experimental data obtained. The basic principles of creation and operation of the experimental plant and its numerical model are outlined.

Rotor magnetic suspension; axial magnet; magnetic bearing; electronic control system; finite element model; FEMM 4.2

Citation: Bedyuk M.A., Lomachev A.O., Badykov R.R., Bezborodova K.V., Yurtaev A.A. Development of an experimental plant and a numerical model of an axial magnetic rotor suspension. *Vestnik of Samara University. Aerospace and Mechanical Engineering*. 2023. V. 22, no. 1. P. 41-50. DOI: 10.18287/2541-7533-2023-22-1-41-50

References

1. Kazakov L.A. *Elektromagnitnye ustroystva REA: spravochnik* [Electromagnetic devices in electronics: Handbook]. Moscow: Radio i Svyaz' Publ., 1991. 352 p.
2. Solnyshkin N.I. *Teoreticheskie osnovy elektrotekhniki. Modelirovanie elektromagnitnykh poley* [Theoretical foundations of electrical engineering. Simulation of electromagnetic fields]. Pskov: Pskov State University Publ., 2013. 64 p.
3. Zhuravlev Yu.N. *Aktivnye magnitnye podshipniki: Teoriya, raschet, primeneniye* [Active magnetic bearings: Theory, calculation, application]. SPB: Politekhnik Publ., 2003. 206 p.
4. Makridenko L.A., Sarychev A.P., Abduragimov A.S., Vereshchagin V.P., Rogoza A.V. VNIEM methods for electromagnetic bearing design. *Electromechanical Matters. VNIEM Studies*. 2016. V. 152, no. 3. P. 3-14. (In Russ.)
5. Yu J., Zhu Ch. A sensor-fault tolerant control method of active magnetic bearing in flywheel energy storage system. *Proceedings of the IEEE Vehicle Power and Propulsion Conference (VPPC) (October, 17-20, 2016, Hangzhou, China)*. DOI: 10.1109/VPPC.2016.7791595
6. Spece H., Fittro R., Knospe C. Optimization of axial magnetic bearing actuators for dynamic performance. *Actuators*. 2018. V. 7, Iss. 4. DOI: 10.3390/act7040066
7. Izosimova T.A., Evdokimov Yu.K. Metodika proektirovaniya aktivnogo magnitnogo podvesa v sostave rotornoy mashiny s avtomaticheskoy sistemoy upravleniya. *Materialy XI Vserossiyskoy nauchno-tekhnicheskoy konferentsii «Informatsionnye Tekhnologii v Elektrotekhnike i Elektroenergetike» (June, 08, 2018, Cheboksary)*. Cheboksary: Chuvash State University, 2018. P. 98-101. (In Russ.)
8. Whitlow Z.W., Fittro R.L., Knospe C.R. Dynamic performance of segmented active magnetic thrust bearings. *IEEE Transactions on Magnetics*. 2016. V. 52, Iss. 11. DOI: 10.1109/TMAG.2016.2587700
9. Amoskov V.M., Andreev E.N., Belyakov V.A., Vasiliev V.N., Vasilieva O.S., Dyomina A.A., Kaparkova M.V., Kukhtin V.P., Lamzin E.A., Lantzetov A.A., Lantzetov V.A., Larionov M.S., Nezhentzev A.N., Rodin I.Y., Samoilov S.K., Sytchevsky S.E., Firsov A.A., Shatil N.A. Dynamic measurements of train-to-track air gap for levitated transport. *Transportation Systems and Technology*. 2016. V. 2, no. 2. P. 39-42. (In Russ.). DOI: 10.17816/transsyst20162239-42
10. Rossi M., Dezza F.C., Mauri M., Carmeli M.S., Braghin F. Rotor position estimation in a large air gap active magnetic bearing. *Proceedings of the 11th IEEE International Conference on Compatibility, Power Electronics and Power Engineering (CPE-POWERENG) (April, 4-6, 2017, Spain)*. P. 258-263. DOI: 10.1109/CPE.2017.7915179