

Разработка измерительной системы электромагнитного подвеса

А. Д. Стоцкая, А. Е. Дубровин, Г. В. Бельский
Санкт-Петербургский государственный электротехнический
университет «ЛЭТИ» им. В.И. Ульянова (Ленина)
adstotskaya@etu.ru

Аннотация. Работа посвящена разработке и программно-аппаратной реализации реальной измерительной системы, служащей для определения положения вала ротора внутри электромагнитного подшипника (подвеса) и являющейся неотъемлемой частью системы управления электромагнитным подвесом. В работе описана реализованная измерительная система электромагнитного подвеса. Измерительная система выполнена на базе индуктивных датчиков положения Efectoriод IG6087, платформы NI ELVIS II, среды разработки и исполнения программ LabVIEW и управляется виртуальным прибором, позволяющим в реальном времени отслеживать координаты геометрического центра поперечного сечения стальной цапфы, а также визуализировать его положение внутри электромагнитного подвеса в режиме реального времени.

Ключевые слова: активный магнитный подшипник; измерительная система; индуктивные датчики положения; LabVIEW

I. ВВЕДЕНИЕ

В современном мире, где повсеместно применяются всевозможные механические системы (двигатели, редукторы, передачи и прочее), важную роль играют узлы соединения подвижных элементов, в которых необходимо обеспечить свободное перемещение деталей относительно друг друга с минимальным трением [1]. Задача уменьшения трения особо остро встает при проектировании приводных устройств, где скорость вращения ротора может достигать сотен тысяч оборотов в минуту, что не может не вызывать сильный нагрев от трения вращающихся друг относительно друга деталей [2]. Для решения данной задачи в большинстве случаев применяется механический подшипниковый узел. Однако механическое трение, возникающее в нём, оказывает сильное влияние на рабочие характеристики технических устройств. В качестве альтернативы выступают бесконтактные электро-магнитные подвесы, позволяющие избавиться от данной проблемы.

Одной из проблем применения электромагнитного подвеса является повышенные требования к точности измеряемого сигнала положения ротора [3]. На основании данного сигнала системой управления формируется управляющее воздействие – ток управления, позволяющий формировать электромагнитные силы, удерживающие

ротор в бесконтактном положении. Поскольку зазор между ротором и статором подвеса очень мал (в рассматриваемом случае 2 мм), для штатной работы системы необходимо с высокой точностью определять положение вращающегося ротора внутри электромагнитного подвеса. Чем точнее измерен сигнал положения, тем устойчивее и надежнее система в целом.

II. ОПИСАНИЕ РАЗРАБАТЫВАЕМОЙ СИСТЕМЫ

Объектом разработки и исследования является измерительная система стенда с электромагнитным подвесом, состоящая из активного магнитного подшипника, датчиков положения, устройства сбора и обработки информации и вычислительного узла. Для измерительной системы разработано специальное программное обеспечение в пакете NI LabVIEW, обеспечивающее отображение информации о положении ротора в режиме реального времени.

A. Активный магнитный подшипник

Магнитный подвес (подшипник) — элемент опоры осей, валов и других деталей, работающих на принципе магнитной левитации. Различают пассивные и активные магнитные подшипники. Активные (электромагнитные) подшипники (АМП) наиболее распространены, по сравнению с пассивными, поскольку высокоэнергетические магниты для пассивных магнитных подвесов находятся только на стадии разработки [4].

Конструкция АМП похожа на конструкцию статора электрической машины переменного тока и представляет собой набор шихтованных пластин из ферромагнитного материала в форме окружности с зубцами, направленными внутрь, и выполняющими роль сердечников, на которых располагаются обмотки электромагнитов. Внутри статора располагается цапфа, выполненная из ферромагнитного материала и жестко скрепленная с валом ротора. На рис. 1. представлена конструкция АМП.

Для интеграции АМП в проектируемое приводное устройство, необходимо обеспечить бесперебойное функционирование узла за счет введения системы автоматического управления. Что в свою очередь предполагает наличие измерительных каналов,

обеспечивающих непрерывное измерение положения ротора внутри АМП.

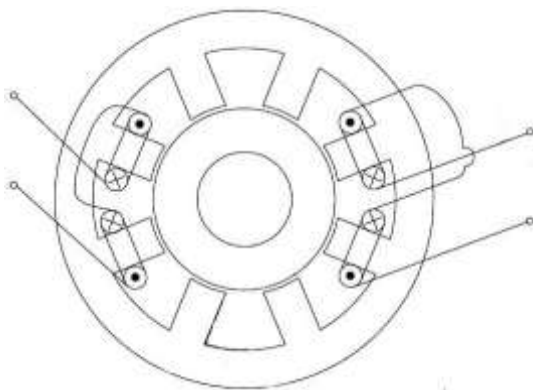


Рис. 1. Конструкция АМП

В. Датчики положения ротора

Для определения положения цапфы в электромагнитном подвесе используются индуктивные аналоговые датчики Efectoriод IG6087 в количестве двух или четырёх штук (в зависимости от схемы измерения). Технические характеристики данного датчика представлены в табл. 1 [5].

ТАБЛИЦА I ТЕХНИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ДАТЧИКА Efectoriод IG6087

Технические характеристики	Значения параметров
Рабочее напряжение, В	15...30, постоянное
Аналоговый выход по напряжению, В	0...10; (Линейный градиент: 2,22 В/мм; для подхода с передней стороны и для цели сделанной из слабой стали: 18 x 18 x 1 мм)
Потребление тока, мА	< 20
Диапазон измерения, мм	0,5...5
Поправочный коэффициент	сталь: 1 / нерж.сталь: 0,7 / латунь: 0,5 / алюминий: 0,4 / медь: 0,3
Отклонение от линейности аналогового выхода, %	± 3 %; (от U _{Amax})
Повторяемость аналогового выхода, %	± 2 %; (от U _{Amax})
Время отклика, мс	менее 10

С. Устройство сопряжения

Для обработки аналоговых сигналов, получаемых от индуктивных датчиков, используется образовательная платформа для проектирования и создания прототипов NI ELVIS II, выполненная на базе среды графической разработки NI LabVIEW.

III. Калибровка индуктивных датчиков положения

Для обеспечения удовлетворительной точности измерений индуктивными датчиками положения, необходимо учитывать параметры объекта. В целевой системе объектом является полая стальная цапфа цилиндрической формы с внешним диаметром, равным 40 мм. Поскольку в паспортных данных индуктивных

датчиков градиент аналогового выхода по напряжению указан для эталонного предмета, сделанного из слабой стали с размерами 18 x 18 x 1 мм, необходимо определить зависимость выходного напряжения датчика от расстояния до цилиндрической стальной цапфы. При этом следует добиться необходимой точности и повторяемости результатов измерений.

Чтобы решить поставленную задачу была использована система позиционирования объекта для станка с числовым программным управлением, представляющая собой каретку, перемещающуюся по направляющим под воздействием червячной передачи и обеспечивающая точность перемещения вплоть до сотых миллиметра. При повороте вала на 360° каретка смещается на 5 мм. Для привода червячной передачи и, соответственно, перемещения каретки был использован шаговый двигатель FL57STH76-2804B. Управление двигателем осуществляется посредством драйвера SMART MOTOR DEVICES SMSD-4.2. Драйвер обеспечивается электрической энергией блоком питания EAGLERISEE ESE350-12.

Чтобы определить зависимость выходного напряжения индуктивного датчика положения от расстояния до стальной цапфы, нужно сопоставить выходное напряжение датчика каждому значению расстояния от датчика до цапфы с некоторым шагом и аппроксимировать получившуюся зависимость. Чем меньше выбранный шаг, тем больше значений и тем точнее характеристика. В связи с этим, целесообразно автоматизировать процесс измерения.

Для автоматизации процесса измерения был применена платформа NI ELVIS II. Выход индуктивного датчика положения подключён к аналоговому входу платформы. Напряжение 20 В подаётся на датчик от регулируемого DC-DC преобразователя XL6009, который в свою очередь подключён к блоку питания ПК [6].

В результате проведённых измерений удалось установить зависимость выходного напряжения индуктивного датчика от расстояния до стальной цапфы и рассчитать градиент выходного напряжения: $k=2,365$ В/мм, что отличается от заявленного в паспортных данных значения – это может быть обусловлено цилиндрической формой цапфы, а также погрешностями измерения. График полученной зависимости изображён на рис. 2.

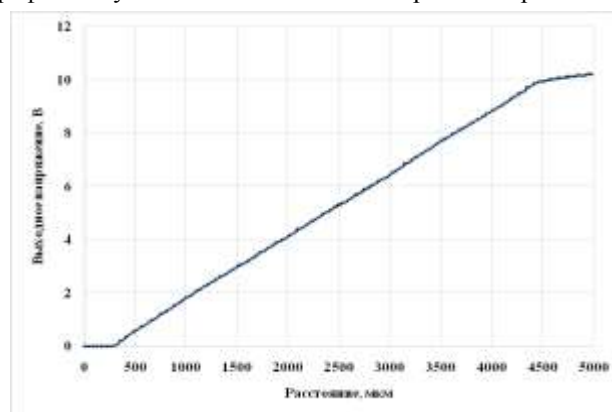


Рис. 2. Зависимость выходного напряжения индуктивного датчика положения от расстояния до стальной цапфы

В полученной зависимости наблюдаются 3 зоны: зона нечувствительности ($0 \dots l_{\text{lim}} = 0,45$ мм), линейная зона ($0,45 \dots l_{\text{max}} = 4,825$ мм), и зона насыщения (более 4,825 мм). Из этого следует, что для исправной работы измерительной системы, необходимо, чтобы положение цапфы в электромагнитном подвесе было таким, что значение до датчика не выходило бы за пределы линейной зоны.

В соответствии с полученными данными, можно вывести формулу для определения расстояния, лежащего в пределах линейной зоны датчика:

$$l = ((x - u_{\text{min}})/k) + l_{\text{min}}$$

где u_{min} (В) – значение выходного напряжения датчика положения на левой границе линейного участка; l_{min} (мм) – левая граница линейного участка; k (В/мм) – градиент выходного напряжения; x (В) – текущее выходное напряжение датчика. Подставив численные значения, получим:

$$l = ((x - 0.11783)/2.365) + 0.45$$

Данная формула будет использоваться для каждого датчика ввиду их идентичности

IV. ИССЛЕДОВАНИЕ ВОЗМОЖНОСТЕЙ ИЗМЕРИТЕЛЬНОГО КАНАЛА

А. Формирование канала измерения

Для обеспечения левитации цапфы внутри электромагнитного подвеса необходимо знать положение цапфы в поперечном сечении подвеса. Таким образом, достаточно определить положение поперечного сечения цапфы на плоскости и, следовательно, требуется ввести плоскую систему координат, в частности, декартову (прямоугольную). Начало координат удобно расположить в геометрическом центре поперечного сечения электромагнитного подвеса.

Поскольку форма и размеры цапфы не изменяются, поперечное сечение цапфы можно идеализировать кругом с диаметром, равным внешнему диаметру цапфы, а за координаты цапфы принять координаты геометрического центра круга, совпадающего с геометрическим центром поперечного сечения цапфы. Чтобы определить искомые координаты, в идеальном случае необходимо и достаточно двух датчиков положения (по одному на каждую из координат), но в реальных условиях из-за нелинейности характеристик датчиков для обеспечения большей точности измерения целесообразно использовать четыре датчика (по два на каждую из координат). Датчики удобно расположить на осях координат – в таком случае не требуется перерасчёт показаний датчиков, но в реальных системах датчики обычно располагаются на осях, смещённых на угол, равный 45 градусам относительно введённой системы координат (рис. 3).

Для того чтобы результаты измерения датчиков находились в линейной зоне датчики должны располагаться друг от друга не дальше 49,55 мм. Датчики прикреплены к корпусу, выполненному из АБС-пластика.

Данная конструкция надевается на корпус электромагнитного подшипника, что обеспечивает устойчивое положение датчиков относительно подвеса. Изображения собранной конструкции приведено на рис. 4.

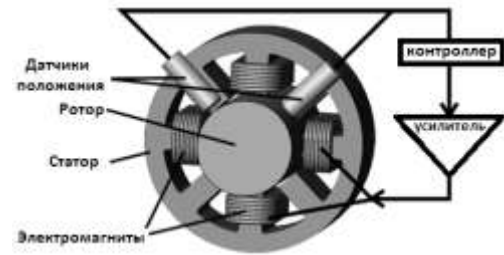


Рис. 3. Упрощённая модель электромагнитного подвеса



Рис. 4. Собранная конструкция измерительной системы

В. Расчет положения геометрического центра

Так как датчики положения измеряют расстояние до стенки цапфы, то для определения координат геометрического центра её поперечного сечения необходимо сделать перерасчёт. Рассмотрим случай, когда используется по одному датчику в канале и он расположен на оси. Тогда для каждой оси формула перерасчёта для соответствующей координаты выглядит следующим образом:

$$X = l - l_0$$

где l_0 – расстояние от датчика, до стенки цапфы при её центральном положении.

Для повышения точности измерений рекомендуется использовать по два датчика на каждую координату – конечным результатом измерения будет являться среднее арифметическое результатов измерений каждого отдельно взятого датчика. Тогда для каждой оси формула перерасчёта для соответствующей координаты будет выглядеть следующим образом:

$$X = \frac{(l_1 - l_0) - (l_2 - l_0)}{2} = \frac{l_1 - l_2}{2}$$

где l_1 – результат измерения первого датчика, расположенного с отрицательной стороны оси; l_2 –

результат измерения второго датчика, расположенного с положительной стороны оси.

Если датчики расположить на осях, смещённых относительно осей координат на некоторый, то для определения координат геометрического центра поперечного сечения цапфы необходимо применить следующее преобразование координат:

$$X' = X \cos(\alpha) - Y \sin(\alpha)$$

$$Y' = Y \cos(\alpha) + X \sin(\alpha)$$

где X' и Y' – координаты в новой (повёрнутой) системе координат; X и Y – координаты в исходной системе координат, α – угол поворота новой системы координат относительно исходной. Подставляя значение 45 градусов в указанные ранее формулы получим выражение для каждой из координат:

$$X' = 0.707X - 0.707Y$$

$$Y' = 0.707X + 0.707Y$$

С. Результаты исследований

В процессе тестирования были исследованы два режима работы системы: режим 1 – система с 2 датчиками (один датчик в каждом измерительном канале); режим 2 – система с 4 датчиками (два датчика в каждом измерительном канале)

На рис. 5 приведен пользовательский интерфейс программы, позволяющей в режиме реального времени производить измерение положения цапфы в различных режимах работы.

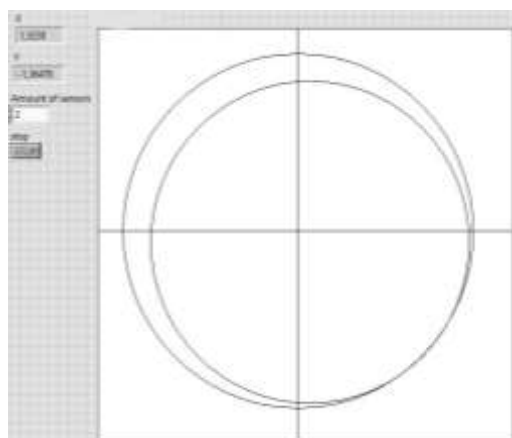


Рис. 5. Визуализация результатов измерений

Упрощённый пользовательский интерфейс состоит из области отображения координат цапфы, меню выбора количества датчиков, задействованных в измерении, кнопки «СТОП» для остановки работы системы и окно визуализации положения цапфы. Здесь внутренний круг представляет собой модель цапфы, а внешняя окружность – это окружность, вокруг которой установлены датчики. Внутренний круг меняет своё положение в соответствии с положением цапфы в режиме реального времени.

В табл. 2 представлен анализ результатов измерения неподвижной цапфы при различных режимах измерения.

ТАБЛИЦА 2 РЕЗУЛЬТАТЫ ИЗМЕРЕНИЯ НЕПОДВИЖНОЙ ЦАПФЫ ПРИ РАЗЛИЧНЫХ РЕЖИМАХ РАБОТЫ СИСТЕМЫ

Параметры	Режим 1	Режим 2
Координата X	1,5238	1,5866
Координата Y	-1,36478	-1,24129
ΔX , мм	0,0628	
ΔY , мм	0,12349	
ΔR , мм	0,13854	
$\Delta R/\delta$, %	6,92705	

На рис. 5 можно заметить отличие полученных координат геометрического центра поперечного сечения цапфы – это обуславливается наличием зоны нечувствительности у датчиков положения. В системе с четырьмя датчиками эта зона компенсируется показаниями парного датчика, расположенного на той же оси.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В результате проектирования и разработки измерительной системы можно сделать вывод о работоспособности измерительного канала и обеспечения требуемой точности измерений для поддержания бесперебойной работы станда. Если расположить датчики в корпусе с достаточно высокой точностью и обеспечить их работу только в линейной зоне, то можно полагать, что погрешность определения положения цапфы не будет превышать 0,1 мм.

На основе проведенных исследований можно предложить следующие пути модернизации системы для повышения точности измерений: калибровка датчиков на специальном сертифицированном оборудовании, размещение датчиков в корпусе на специальном оборудовании с высокой точностью позиционирования, разработка устройства сопряжения конкретно под реализованную измерительную систему.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- [1] G. Schweitzer, E.H. Maslen Magnetic Bearings. Theory, Design, and Application in Rotating Machinery (Berlin: Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2009. pp 1-24.)
- [2] Mark Jansen, Gerald Montague, Andrew Provenza, Alan Palazzolo High speed, high temperature, fault tolerant operation of a combination magnetic-hydrostatic bearing rotor support system for turbomachinery. NASA/TM-2004-212952 http://ntrs.nasa.gov/archive/nasa/casi.ntrs.nasa.gov/20040050626_2004048920.pdf
- [3] Ante Elez, Stjepan Car, Stjepan Tvorici Air Gap Magnetic Field – Key Parameter for Synchronous and Asynchronous Machine Fault Detection, International Review of Electrical Engineering (IREE), Vol 8, No 3 (2013), pp 981-988.
- [4] Магнитные подшипники общая характеристика, достоинства и недостатки, использование магнитных подшипников <http://myfta.ru/articles/magnitnye-podshipniki>
- [5] IG6087 - Индуктивный аналоговый датчик ifm electronic. <https://www.ifm.com/ru/ru/product/IG6087>.
- [6] Регулируемый DC-DC преобразователь XL6009 <https://roboshop.spb.ru/XL6009-step-up-down-module>