3. Нгуен Куанг Кхоа. Проектирование и моделирование лопастных насосов в среде SolidWorks 2012 с использованием пакета FlowSimulation 2012 // Интеллектуальные электромеханические системы и комплексы специального назначения: материалы межотраслевого науч.-техн. семинара. Новочеркасск, 10–12 июня 2014 г. Юж.-Рос. гос. политехн. ун-т (НПИ). 2014. С. 128–133.

4. Нгуен Куанг Кхоа. Исследование электромеханического комплекса: вентильно-индукторный электропривод – центробежный насос // Изв. вузов. Электромеханика. 2016. № 4. С. 55–64.

5. Никифоров Б. В. Корабельные системы электродвижения: дис. ... д-ра техн. наук. СПб., 2006. 369 с.

6. Нгуен Куанг Кхоа. Методика моделирования вентильно-индукторных двигателей с помощью программ Elcut и MatlabSimulink // Изв. вузов. Электромеханика. 2016. № 2. С. 73–79.

7. Дубицкий С. Д. Elcut 5.1-платформа разработки приложений анализа полей // ExponentaPro. Математика в приложениях. 2004. № 1. С. 20–26.

8. Нгуен Куанг Кхоа, Фам Конг Тао, Фам Ван Бьен. Методика математического и экспериментального определения энергетических параметров вентильно-индукторного двигателя большой мощности двухпакетной конструкции // Успехи современной науки. 2016. Т. 4, № 9. С. 149–155.

9. Бычков М. Г., Сусси Р. С. Расчетные соотношения для определения главных размеров вентильно-индукторной машины // Электротехника. 2000. № 3. С. 15–19.

10. Сайт Телерадиокомпании «Алмазный край» АК «АЛРОСА» (ОАО). Прогресс на производстве. URL: http://trk-alrosa.ru/syuzhetyi/udachnyiy/2037-progress-na-proizvodstve.html (дата обращения: 31.10.2016).

A. P. Temirev, Nguyen Quang Khoa
South-Russian State Polytechnic University (NPI)

RESEARCH OF THE HIGH POWER TWO-PACKAGE SWITCHED RELUCTANCE MOTOR FOR PULP PUMPS GRAT-1800/67 OF A MINING EQUIPMENT

Researched the high power two-package switched reluctance motor 750 kW (SRM-750) for pulp pumps GRAT-1800/67 of mining equipment. Presents simulation of the SRM-750 as part of the pump the pump GRAT-1800/67 for single-pulse mode of switching. Presents dependences of main indexes of the SRM-750 on switching parameters, and on their basis created trajectories of control parameters, which allow to realize given mechanical characteristics and to ensure the quality of work SRM-750 in different modes. Experimental research of different modes of the SRM-750 to verify the functioning and management quality on selected switching parameters.

Switched reluctance motor (SRM), switched reluctance electric drive (SRD), electric drive, high power switched reluctance machine (HP SRM), pulp pump

УДК 62-531.7

И. С. Дымов, Д. А. Котин, Е. С. Кучер, Ю. В. Панкрац
Новосибирский государственный технический университет

Подход к реализации процесса активной стабилизации пространственного положения ротора устройств мехатроники

Рассматривается разработка и исследование технических решений вопроса центрирования пространственного положения ротора мехатронного устройства, применяемого в прецизионных технологических установках. Предлагается новый подход к решению проблемы стабилизации вращающейся части мехатронного устройства, основанный на активной текущей коррекции его пространственного положения. Приводятся описание способа реализации и результаты имитационного моделирования, подтверждающие перспективность направления исследования.

Мехатронное устройство, активная стабилизация, балансировка, регулятор пространственного положения

Согласно определению, мехатронное устройство объединяет в себе механическую, электротехническую, электронную, интеллектуальную (компьютерную) части [1]. Все они интегрированы в общий модуль и согласованно взаимодействуют друг с другом, а их работа подчинена одной общей задаче. При этом развитие какой-либо отрасли техники в отдельности неизбежно находит свое отражение в мехатронике в целом.

В настоящее время в связи с постоянным совершенствованием конструкции устройств электромеханики появляются новые требования к их эксплуатации. В частности, в связи с неуравновешенностью масс одной из основных проблем во время работы мехатронного устройства является несовпадение реальной оси вращения ротора с проектируемой осью [2]. Целью проводимого исследования служит синтез адаптивного алгоритма текущей стабилизации пространственного положения вращающейся части мехатронного устройства.

Виды неуравновешенностей и существующие методы балансировки. Различают несколько видов неуравновешенностей вращающейся части мехатронных устройств [3]. Статическая неуравновешенность – ось вращения ротора и его главная центральная ось инерции параллельны друг другу. Моментная неуравновешенность – ось вращения ротора и его главная центральная ось инерции пересекаются в центре масс ротора. Динамическая неуравновешенность – ось вращения ротора и его главная центральная ось инерции пересекаются не в центре масс. Динамическая неуравновешенность включает в себя первые два вида неуравновешенностей.

Причинами неравномерного распределения масс могут быть: разная толщина отдельных деталей, наличие в них вмятин, неодинаковый вылет лобовых частей обмотки и др. Любая деталь ротора может быть неуравновешенной в отдельности, в результате сдвига своей оси инерции относительно оси вращения. Все это при работе приводит к вибрации, которая через подшипник передается на корпус и основание электроустановки и ухудшает работу мехатронного устройства в целом. При этом нужно понимать, что наличие неуравновешенностей вращающихся масс – неизбежное явление, и связано оно прежде всего с качеством и технологией изготовления электротехнических устройств. Существует большое число отраслей точного производства – медицина, атомная, космическая, военная промышленность и т. д., где даже незначительные погрешности в осевом положении недопустимы и способны привести к необратимым последствиям.

На сегодняшний день известен лишь один способ устранения описанных неидеальностей – балансировка ротора мехатронного модуля на предприятии-изготовителе или предприятии, выполняющем его техническое обслуживание. Процесс балансировки заключается в совмещении оси инерции ротора с осью вращения посредством снятия металла, либо установкой уравновешивающих грузов в определенных местах по окружности ротора. Различают статический и динамический методы балансировки [3]. Статический метод осуществляется при не вращающемся роторе, установкой уравновешивающих грузов только на одном торце ротора, что делает его приемлемым только для коротких роторов тихоходных электрических машин. Динамический метод осуществляется для уравновешивания масс ротора, при котором уравновешивающий груз устанавливают на обоих торцах ротора с использованием специального измерительного оборудования и с установкой на специальные балансировочные стенды.

На практике при использовании указанных методов, а также по причине того, что расположение и массу уравновешивающего груза подбирают опытным путем, процесс балансировки занимает продолжительный период времени и результат достигается с достаточной погрешностью, что не всегда приемлемо.

В то же время в Японии, Америке и Европе (в том числе и в России) ведутся работы по созданию активных аэростатических шпинделей (ААШ), способных осуществлять функцию активной балансировки. К настоящему времени известны две базовые конфигурации ААШ.

На рис. 1 представлен ААШ, разработанный в Японии. Отклонение оси вращения ротора контролируется с помощью емкостных датчиков ($S1$–$S4$) в двух плоскостях, максимально разнесенных друг относительно друга вдоль оси вращения z. В каждой плоскости контроля установлены по два взаимноортогональных датчика: $S1$–$S3$ и $S2$–$S4$, соответственно. При этом датчики $S1$ и $S2$ расположены в плоскости управления X, а датчики $S3$ и $S4$ – в плоскости Y. Смещение оси вращения ротора в плоскости управления X осуществляется с помощью двух пар активных актюаторов (исполнительных устройств) $a1$–$a2$ и $b1$–$b2$. Смещение оси вращения ротора в плоскости управления Y осуществляется с помощью двух других пар активных актюаторов $c1$–$c2$ и $d1$–$d2$. Совместное действие обеих пар актюаторов позволяет реализовать четыре степени свободы движения оси ротора: в радиальном направлении по координатам X и Y и в угловом – по координатам φ и ψ. Каждая пара актюаторов $a1$–$a2$, $b1$–$b2$, $c1$–$c2$ и $d1$–$d2$ действует синхронно и точно в противоположном направлении [4].

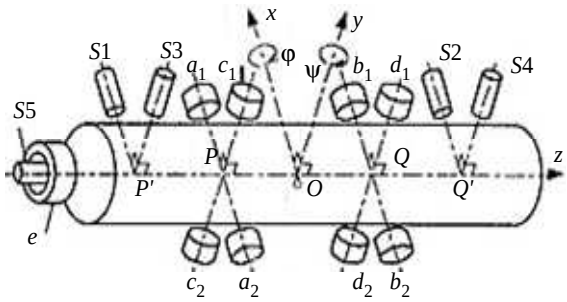

Рис. 1

Рис. 2

Другая базовая конфигурация, предложенная французскими исследователями, представлена на рис. 2.

Все корректирующие настройки монтируются на базовых плоскостях исходного шпинделя. В результате все актюаторы вращаются вместе с ротором шпинделя [5]. В схеме управления имеется специальный анализатор положения вала, состоящий из двух высокоточных шаров (сфер), смонтированных строго аксиально на главном роторе шпинделя, и пяти емкостных датчиков, четыре из которых контролируют боковые смещения сфер, а пятый – смещение ротора вдоль оси вращения.

Разработки иностранных ученых позволяют осуществлять активную стабилизацию пространственного положения ротора мехатронного устройства в ограниченном точностном диапазоне (как правило, не превышающем 5…10 мкм). Для прецизионных и ответственных областей науки и техники таких диапазонов точности зачастую не достаточно, соответственно встает задача поиска иного подхода к осуществлению процедуры активной стабилизации.

Предлагаемый подход к реализации метода активной стабилизации. В современной литературе достаточно подробно описаны научно-технические решения по применению активных магнитных подшипников (АМП) для различных областей промышленности, технологический характер которых связан с особыми требованиями, предъявляемыми к электромеханическим системам. Прежде всего, это высокие скорости вращения рабочих органов, специфические условия эксплуатации механизмов [6]. Вопросы электромагнитных процессов и математические модели АМП (другое название – магнитный подвес) рассмотрены в [7]. Однако необходимость разработки систем АМП связана прежде всего с технологической невозможностью использования типовых подшипников качения или скольжения. Вследствие этого для удержания ротора электродвигателя или исполнительного механизма в равновесном состоянии требуются определенные затраты электрической энергии (зависит от массы ротора, его частоты вращения и пр.). К тому же системы с АМП резервируются страховочными подшипниками качения для предотвращения сбоев технологического процесса.

Рассмотрим другое решение проблемы стабилизации осевого положения вращающейся части мехатронного устройства. Разработанный метод активного исключения осевых смещений ротора заключается в использовании иной по сравнению с аналогами исполнительной части системы стабилизации пространственного положения. Конструктивно ротор электродвигателя опирается на шарикоподшипниковый узел. В качестве объекта управления предлагается использовать две парные группы электромагнитов, установленных во взаимно перпендикулярных плоскостях. Каждая пара электромагнитов, установленных в одной плоскости, обеспечивает реверсивный характер перемещений в условиях центрирования оси вращения по ее координате в зависимости от сигналов с датчиков отклонения положения ротора по этой координате. Балансировка вращающегося ротора производится непрерывно на основе формируемого электромагнитного воздействия.

Функциональная схема конструкции и системы управления процессом активной стабилизации представлена на рис. 3. Предложенный подход подразумевает значительно меньшие в сравнении с АМП энергетические затраты, поскольку не требует от исполнительной части функции удержания ротора, а лишь корректирует его пространственное положение в микрометровом (или даже нанометровом) диапазоне перемещений согласно необходимым характеристикам высокоточного технологического процесса.

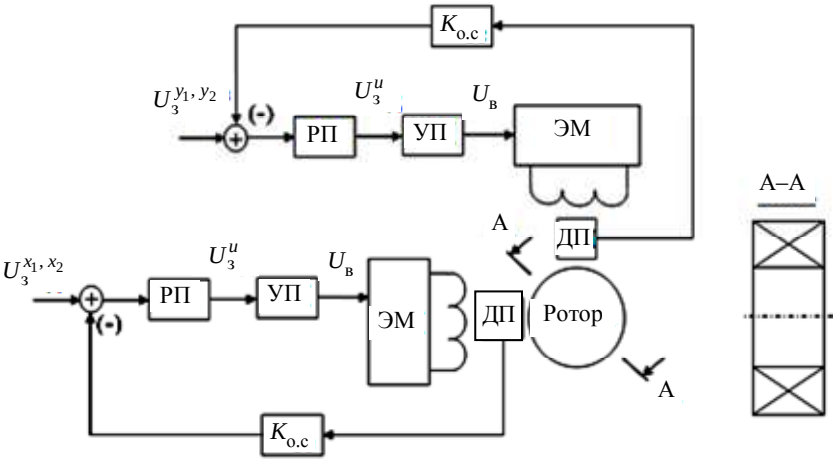

Рис. 3

На рис. 3 обозначены:

• $U_з^{x_1, x_2, y_1, y_2}$ – сигналы задания на отклонение в плоскостях X и Y соответственно, В;

• РП – регуляторы пространственного положения;

• УП – управляемый преобразователь;

• $U_з^u$ – сигнал задания на напряжение УП, В;

• ЭМ – электромагнит (объект управления);

• ДП – датчики пространственного положения ротора, фиксирующие его геометрическое отклонение по плоскостям X и Y;

• $K_{о.с}$ – коэффициент обратной связи по пространственному положению ротора.

В качестве ДП предполагается использовать фотоэлектрические преобразователи комбинированного типа (ФПКТ) [8], информационная часть которых способна обеспечить высокую точность измерений осевых смещений за счет самокоррекции угловой погрешности измерительного растра. Комбинированные свойства ФПКТ заключаются в возможности формирования на одном оптическом носителе топологии двух измерительных преобразователей (углового и линейного).

Выбор материала. В процессе производства электрической машины для мехатронного устройства необходимо напыление магнитного материала установленной толщины на поверхность ее вращающейся части.

Можно выделить несколько основных требований, предъявляемых к используемому материалу напыления, причем выбор критериев связан с тем, чтобы получить уменьшенную массу и объем напыления:

– достаточно высокая остаточная индукция (B_r), Тл;

– высокая коэрцитивная сила (H_c), кА/м;

– наибольшее максимальное энергетическое произведение $(BH)_{max}$, кДж/м^3;

– эффективное противодействие существующим размагничивающим полям при управлении одновременно несколькими электромагнитами;

– стабильность магнитных свойств во времени;

– умеренная стоимость.

Из известных в настоящее время магнитотвердых материалов (с учетом указанных требований, а также принимая во внимание их использование в виде порошка) целесообразно рассматривать микропорошковые композиции на основе редкоземельных элементов, например на основе сплавов кобальта (Co) и самария (Sm).

По сочетанию магнитных свойств (B_r и H_c) SmCo сплавы занимают промежуточное место между магнитами на основе сплавов неодима (Nd), железа (Fe), бора (B) и ферритовыми. Преимуществом SmCo соединений перед NdFeB является отличная коррозионная устойчивость, хорошая временная стабильность и стабильность параметров при высоких температурах, перед ферритами – в несколько раз большее значение энергетического произведения $(BH)_{max}$, перед магнитами из сплава ЮНДК (сплав железа (Fe), алюминия (Al), никеля (Ni), кобальта (Co)) – на порядок большая H_c. Поэтому магниты из SmCo целесообразно применять в случае необходимости получения минимальных размеров и веса напыления.

Исходя из всего вышесказанного предлагается к использованию композиция КС37А [9]. Значения основных магнитных параметров магнитотвердого материала указаны в таблице.

Марка материала	Остаточная магнитная индукция (B_r), Тл	Коэрцитивная сила (H_c), кА/м	Максимальное энергетическое произведение $(BH)_{\max}$, кДж/м^3
КС37А	0.82	560	130

Если представить участок напыления в качестве цилиндра небольшим диаметром и высотой, то можно найти величину силы, действующей со стороны ферромагнитного напыления на установленный напротив электромагнит. Согласно теории электрических и магнитных цепей, при учете, что магнитное сопротивления сердечника мало по сравнению с магнитным сопротивлением воздушного зазора, и, полагая, что магнитное поле в воздушном зазоре однородно, получим формулу для расчета величины силы электромагнита:

$$F = \frac{(iw)^2 \mu_0 \pi R^2}{x^2},$$

где i – ток в электромагните, А; w – число витков катушки электромагнита; $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7}$ – магнитная проницаемость воздуха, Гн/м; R – радиус напыления, м; x – расстояние от электромагнита до напыления, м.

Полученная сила характеризует затраченную магнитную энергию. Эта энергия расходуется на перемещения точки приложения силы на величину dx.

Формируя управляющие воздействия на электромагниты в замкнутой системе управления, где в качестве обратных связей используются величины осевых смещений вращающегося ротора мехатронного устройства, будем осуществлять процесс активной стабилизации [10]. На рис. 4 представлена разработанная структурная схема автоматической системы активной стабилизации.

Для описания разработанной структурной схемы приведены следующие обозначения:

• $U_з^{x,y}$ – сигнал задания на осевое отклонение, В;

• РП – регулятор пространственного положения;

• УП – управляемый преобразователь;

• K_w – коэффициент пропорциональности между потокосцеплением и магнитным потоком электромагнита;

• R – активное сопротивление катушки электромагнита;

• K_1 – коэффициент, характеризующий кривую намагничивания ферромагнитного напыления;

• K_2 – коэффициент пропорциональности между током возбуждения электромагнита и осевым перемещением ротора.

Методика расчета регулятора пространственного положения (КРП) и цифровое моделирование разработанной системы управления. Для управления током катушки электромагнита (как для плоскости X, так и для плоскости Y) предлагается использовать транзисторный широтно-импульсный преобразователь (ШИМ), работающий с достаточно высокими частотами коммутации (не ниже 3 кГц). В качестве корректора пространственного положения будем использовать пропорционально-интегральный регулятор.

Найдя передаточную функцию замкнутого контура регулирования пространственного положения и выразив из нее характеристический полином, приравниваем его к нормированному. Примем следующую настройку коэффициента формы $A_1 = 2$, что соответствует настройке по Баттерворту (определяющей колебательность переходного процесса по положению) и настройку среднегеометрического корня $\Omega_{КРП} = 2\pi f_{ШИМ}/500$ (определяющего быстродействие процесса регулирования).

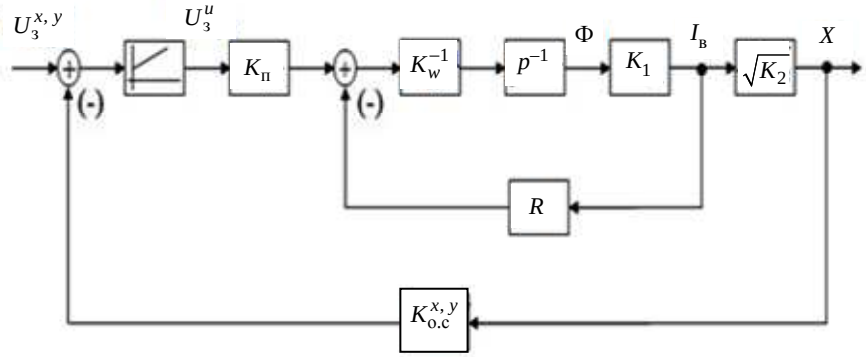

Рис. 4

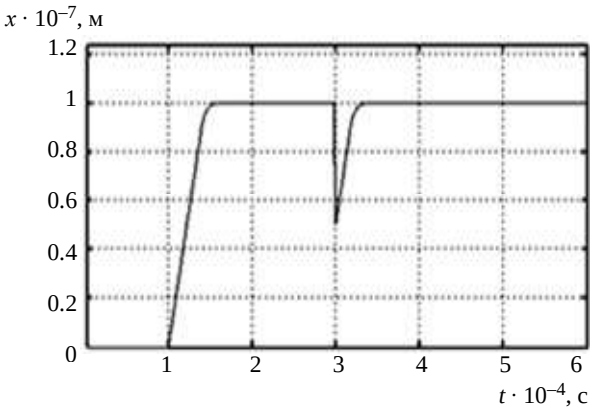

Рис. 5

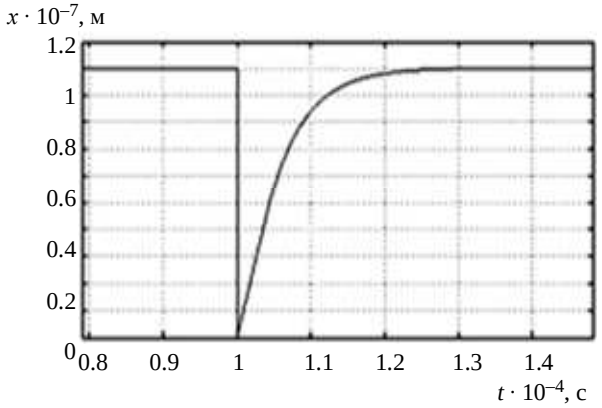

Рис. 6

Переходный процесс по управляющему и возмущающему воздействиям при регулировании пространственного положения, представлен на рис. 5. Переходной процесс только по возмущающему воздействию представлен на рис. 6.

Анализируя результаты цифрового моделирования предложенного подхода активной стабилизации пространственного положения ротора мехатронного устройства, можно сделать следующие выводы:

1. Синтезированная система автоматического управления обладает астатизмом как по управляющему, так и по возмущающему воздействию.

2. Качество переходных процессов удовлетворяет желаемым требованиям: время регулирования достаточно мало, для того чтобы это не сказывалось на ходе технологического процесса; отсутствие перерегулирования в динамических режимах исключит механические повреждения составных деталей и узлов мехатронных устройств.

3. В дальнейших исследованиях стоит рассматривать работу системы только по возмущающему воздействию, поскольку сама физическая природа неуравновешенности масс является возмущающим воздействием, отклоняющим реальные оси электрической машины от расчетных.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Готлиб Б. М., Вакалюк А. А. Введение в специальность «Мехатроника и робототехника»: курс лекций / УрГУПС. Екатеринбург, 2012. 134 с.

2. Дымов И. С., Котин Д. А. Проектирование адаптивной магнитной системы аэростатического шпинделя // Фундаментальные исследования. 2015. № 10. Ч. 2. С. 254–258.

3. Балансировка машин и приборов / В. А. Щепетильников, Ю. А. Самсаев, Т. П. Коздянинов и др.; под ред. В. А. Щепетильникова. М.: Машиностроение, 1979. 294 с.

4. Sato K., Horikawa O., Shimokohbe A. Improvement of spindle motion accuracy by a control type air rotary bearing // Proc. of the Japan/USA Symp. on Flexible Automation. 1996. Vol. 2. P. 1145–1150.

5. Combined Towards a 10 nm Run-out Rotation axis / M. Nicola, M. Hrouzek, M. Renier, M. Navizet, F. Comin // Int. Workshop on Mechanical Engineering Design of Synchrotron Radiation Equipment and Instrumentation. Grenoble, France, 2006.

6. Поляхов Н. Д., Стоцкая А. Д. Обзор способов практического применения активных магнитных подшипников // Науч. приборостроение. 2012. Т. 22, № 4. С. 5–18.

7. Стоцкая А. Д. Разработка и исследование математической модели электромагнитных процессов в радиальных активных магнитных подшипниках // Современные проблемы науки и образования. 2013. № 5. С. 153.

8. Повышение точностных параметров лазерных генераторов изображений с круговым сканированием для формирования прецизионных углоизмерительных структур / А. В. Кирьянов, В. А. Жмудь, И. Н. Томилов, Д. А. Котин, Д. О. Терешкин, А. В. Останин // Науч. вестн. Новосиб. гос. техн. ун-та. 2013. № 3 (52). С. 46–50.

9. ГОСТ 21559–76. Материалы магнитотвердые спеченные. М.: Изд-во стандартов, 1976.

10. Св. о гос. регистрации программы для ЭВМ № 2015663163. Программа алгоритма адаптивной системы активной стабилизации аэростатического шпинделя / И. С. Дымов, Д. А. Котин; Заявлено 26.10.2015; зарегистрировано в реестре программ для ЭВМ 11.12.2015.

I. S. Dymov, D. A. Kotin, E. S. Kucher, Yu. V. Pankratz
Novosibirsk State Technical University

APPROACH TO PROCESS IMPLEMENTATION OF ACTIVE STABILIZATION THE SPATIAL POSITION OF MECHATRONIC DEVICES ROTOR

Devoted to the development and the research of technical solutions centering problem of the spatial position of the mechatronic device rotor used in high-precision processing systems. A new approach to solving the problem of stabilizing the rotating element of the mechatronic device is offered, based on the active current updating of the spatial position. It is presented the approach description, results of the simulation, confirming the advances of the line research.

Mechatronic device, active stabilization, balancing, spatial position controller

УДК 62-523.2

С. Ю. Логинов
Псковский государственный университет

Наблюдатель состояния в осевом активном магнитном подвесе

Рассмотрены принципы построения системы управления осевым активным магнитным подвесом роторов. Представлена модель на основе цифрового ПД-регулятора, показано влияние ошибки датчика положения на устойчивость системы. Рассматриваются два варианта борьбы с шумом измерения: применение фильтра низких частот и наблюдателя состояния.

Осевой активный магнитный подвес, система управления, ПД-регулятор, уменьшение помех, наблюдатель состояния

Активные магнитные подвесы (АМП) роторов находят все более широкое применение в различных областях промышленности. Отсутствие механического контакта позволяет использовать их в сверхвысокоскоростных электроприводах, которые становятся все более востребованными. Расчет нагрузочных параметров и электромеханической части АМП имеет стандартные методики, однако совершенствование системы управления подвесом остается актуальной задачей для дальнейшего исследования [1].

Основной проблемой при создании АМП становится наличие шумов при измерении положения ротора, что обусловлено одновременно высокими требованиями к точности и быстродействию датчика положения. Целью данной статьи является изучение влияния шумов на систему однокоординатного магнитного подвеса и рассмотрение возможности оптимальной фильтрации.

Описание системы управления АМП. Будем рассматривать систему управления активным магнитным подвесом, которая предназначена для стабилизации положения ротора в осевом направлении. Она включает в себя датчик осевого смещения ротора и микропроцессор, преобразующий сигнал с датчика положения ротора в управляющий сигнал для силового блока управления, который формирует токи в обмотках подвеса.

Существуют различные системы управления АМП: на основе различных регуляторов, адаптивные системы, робастные, системы на основе нейронных сетей и т. д. Наиболее проста система на основе ПД-регулятора.

Допустим, нужно, чтобы свободное движение подвешиваемого тела, описываемое известным уравнением [2]

$$m\ddot{x} - k_x x = k_i i\,, \qquad (1)$$

в точности совпадало при одинаковых начальных условиях со свободным движением механического линейного осциллятора с вязким трением, описываемого уравнением $m\ddot{x} + b\dot{x} + cx = 0$ или

$$\ddot{x} + 2\xi\omega_0\dot{x} + \omega_0^2 x = 0. \qquad (2)$$

Здесь m – масса ротора; x – координата положения; k_x и k_i – «отрицательная» позиционная и токовая жесткости подвеса соответственно; b –