

Электротехника

УДК 62-531.7

АВТОМАТИЧЕСКАЯ КОРРЕКЦИЯ РАДИАЛЬНЫХ ОТКЛОНЕНИЙ РОТОРА МИКРОЭЛЕКТРОПРИВОДА МЕТОДОМ СИГНАЛЬНО-АДАПТИВНОЙ ОБРАТНОЙ МОДЕЛИ

И.С. Дымов, Д.А. Котин, Ю.В. Панкрац

Новосибирский государственный технический университет
Россия, 630073, г. Новосибирск, пр-т К. Маркса, 20

Аннотация. Статья посвящена разработке и исследованию системы автоматической коррекции радиального положения ротора микроэлектропривода, применяемого в прецизионных технологических установках. Предлагается новый подход к решению проблемы стабилизации вращающейся части электрической машины, основанный на активной текущей стабилизации его пространственного положения. Автоматическая стабилизация достигается путем организации в электромеханической системе электромагнитного воздействия реверсивного характера. Предлагается применять парные группы электромагнитов, действующих на объект управления. Разработка алгоритма автоматической коррекции производится методом сигнально-адаптивной обратной модели. Такой подход способен обеспечить желаемые показатели качества процесса управления нелинейным объектом, а также достичь нечувствительности системы коррекции к внешним и внутренним сигнальным и параметрическим возмущениям. Приводятся описание способа конструктивной реализации подхода, методика структурного синтеза закона управления. Представлены структурные и функциональные схемы системы автоматической коррекции радиальных отклонений, а также результаты имитационного моделирования, подтверждающие перспективность проведенного исследования.

Ключевые слова: активная стабилизация, балансировка, сигнально-адаптивный регулятор, микроэлектропривод.

Уже на начальных этапах проектировочных работ по созданию узлов или элементов технологических установок инженерами-разработчиками ставится требование, чтобы в течение всего периода эксплуатации оборудования достигалась высокая точность вращения, быстроходность и параметрическая надежность. Проведенные исследования по оценке влияния различных факторов на итоговую точность выполнения технологического процесса сводятся к тому, что данный показатель качества более чем на половину определяется характеристиками рабочего органа, механически связанного с ротором приводного двигателя [1]. Все технологические операции так или иначе осуществляются за счет

Дымов Илья Сергеевич, аспирант.

Котин Денис Алексеевич (к.т.н., доц.), заведующий кафедрой «Электропривод и автоматизация промышленных установок».

Панкрац Юрий Витальевич (к.т.н.), доцент кафедры «Электропривод и автоматизация промышленных установок».

вращения вала электрической машины. Это и влечет за собой неустойчивую работу относительно выходных характеристик системы электропривода. Во время вращения ротора на стационарных опорах скольжения или качения траектория движения рабочего органа может быть нестабильной, изменяется жесткость и возникают тепловые смещения подшипниковых узлов. Но наиболее важной проблемой является отклонение радиального положения вращающейся части электрической машины во время работы технологического оборудования.

Во многих областях высокоточного производства в качестве электромеханических систем применяются микроэлектроприводы постоянного и переменного тока, питающиеся от широтно-импульсных преобразователей. Требования, предъявляемые к указанным технологическим процессам, ставят перед разработчиками электромеханических систем задачу недопустимости даже незначительных погрешностей в радиальных отклонениях оси вращения исполнительных механизмов.

Для достижения нахождения значений радиальных отклонений ротора электрической машины в необходимых или допустимых пределах на современном прецизионном оборудовании применяется наиболее распространенный метод увеличения жесткости подшипников за счет изменения преднатяга, т. е. получения отрицательного рабочего зазора в подшипнике. Помимо увеличения жесткости узла это влечет за собой понижение уровня шума и предотвращение проскальзывания во время быстрых запусков и остановок, но только лишь при поддержании постоянства статической нагрузки, а также при условии очень низкой динамической нагрузки или ее отсутствия [2].

Также в конструкциях высокоскоростных установок в настоящее время устанавливают шпиндельные узлы и кронштейны с гидро- и аэростатическими, а также электромагнитными опорами скольжения, которые превосходят стандартные опоры практически по всем основным показателям: перегрузочная способность, точность и т. д. Использование подшипников с гидростатическим смазочным слоем обеспечивает высокую точность вращения и повышенную демпфирующую и нагрузочную способности. Но из-за потерь на трение и наличия дополнительной системы анализа и сбора масла недостатком таких опор является ограничение по частоте вращения [3]. Использование аэростатических подшипников позволяет ротору двигателя развить высокую частоту вращения, к тому же снизить износ конструктивных элементов и существенно увеличить срок эксплуатации электрической машины и повысить производительность выполняемых работ, уменьшить вибрационные и акустические воздействия, позволяет надежно работать при высокой и низкой температуре и влажности. Однако газовым опорам свойственны недостатки, которые выражаются в относительно небольшой жесткости и демпфирующей способности [4]. Поэтому их применяют в малонагруженных системах, как и в случае со стандартными опорами качения при преднатяге. Высокой быстроходностью обладают системы на активных магнитных подвесах. При их использовании появляется возможность управления радиальным положением ротора в процессе работы с необходимыми изменениями демпфирования и жесткости [5]. Однако электромагнитные опоры широко не распространены, что связано с их высокой стоимостью, сложностью конструкции и систем управления, возможностью нагрева ротора, высокой инерционностью индукционной системы и т. д.

Существует огромный резерв, направленный на улучшение эксплуатационных характеристик современного прецизионного оборудования в части умень-

шения возникающих дисбалансов. Поэтому основной задачей будет являться разработка и исследование адаптивной магнитной системы с использованием способа активной стабилизации пространственного положения вращающейся части электродвигателя.

Способ активной стабилизации радиальных отклонений ротора электрической машины

Предлагаемый способ активного исключения радиальных смещений ротора заключается в использовании совершенно другой, по сравнению с известными, исполнительской части системы стабилизации пространственного положения. По своей конструкции ротор электродвигателя опирается на шарикоподшипниковый узел. Основной рассматриваемой стороной электрической машины предполагается торцевая сторона. В роли объекта управления (ОУ) предлагается использовать электромагниты, установленные в двух взаимно перпендикулярных плоскостях. Такая пара ОУ обеспечивает противоположно направленный характер перемещений при компенсации радиальных отклонений, анализируя сигналы, которые поступают с датчиков отклонения ротора [6]. Таким образом, процесс балансировки вращающегося ротора производится в каждый момент времени и в основе его лежит электромагнитное воздействие. Функциональная схема конструкции и системы управления процессом активной стабилизации представлена на рис. 1.

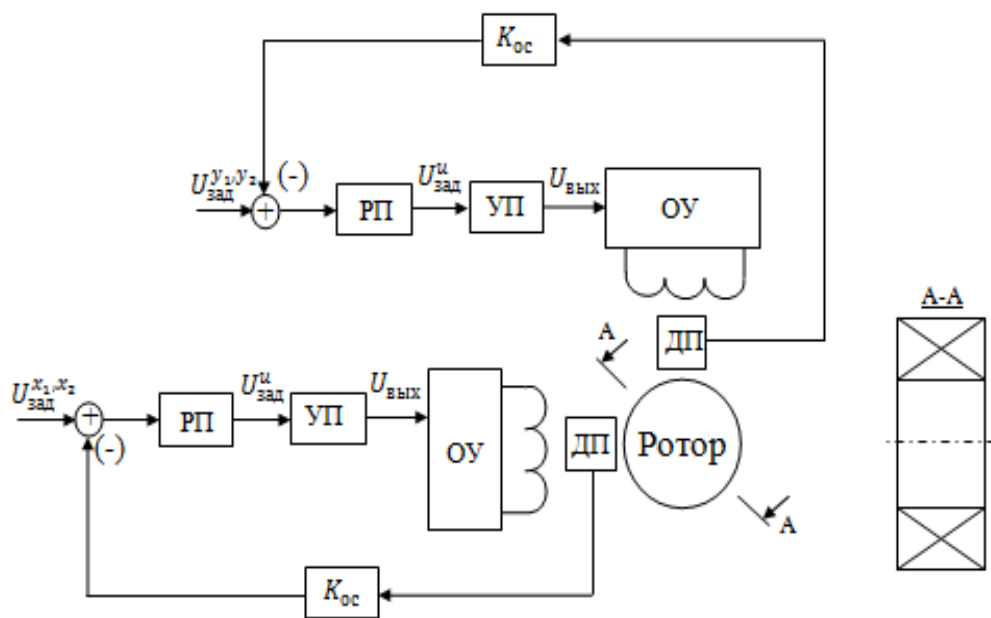


Рис. 1. Функциональная схема автоматической системы активной стабилизации ротора

Для описания разработанной функциональной схемы приведены следующие обозначения: $U_{зад}^{x_1, x_2, y_1, y_2}$ – сигналы задания на требуемое радиальное отклонение в плоскости X и Y соответственно, В; РП – регуляторы пространственного положения; УП – управляемый преобразователь; $U_{зад}^u$ – сигнал задания на напряже-

ние УП, В; $U_{\text{вых}}$ – выходное напряжение УП (напряжение возбуждения электромагнита), В; ОУ – электромагнит; ДП – датчики пространственного положения ротора, фиксирующие его радиальное отклонение в плоскости X и Y; K_{oc} – коэффициенты обратных связей по радиальному отклонению в плоскости X и Y.

В качестве датчиков пространственного положения ротора, фиксирующих его радиальное отклонение в плоскости X и Y, предполагается использовать фотоэлектрические преобразователи комбинированного типа (ФПКТ), у которых информационная часть способна с предельной точностью производить измерения осевых смещений с помощью самостоятельной коррекции угловой погрешности измерительного раstra [7].

В процессе подготовки электрической машины для реализации предложенного способа активной стабилизации необходимо напыление магнитного материала или установка магнитного кольца требуемой толщины на поверхность ее вращающейся части.

Метод сигнально-адаптивной обратной модели

Метод сигнально-адаптивной обратной модели (САОМ) является способом синтеза робастных одно- и многоканальных систем управления с многотемповыми процессами, который формирует алгоритмы без промежуточной идентификации изменяющихся параметров с сигнальной самонастройкой. Синтезированные методом САОМ системы обладают малой чувствительностью как ко внешним, так и к параметрическим возмущениям, а также к вариациям характеристик ОУ [8]. Пояснения основных положений метода наиболее полно описаны в [9].

Запишем уравнение математической модели ОУ в общем виде:

$$x^{(n)} = a(t, \mathbf{x}) + b(t, \mathbf{x})u, \quad (1)$$

где x – выходная (управляемая) переменная;

t – параметр времени;

$x^{(n)} = \frac{d^n x}{dt^n}$ старшая производная управляемой координаты, явно зависящая от управляющего воздействия u ;

$\mathbf{x} = [x, x^{(1)}, x^{(2)}, \dots, x^{(n-1)}]^T$ – вектор канонических для методов управления движениями на инвариантных многообразиях координат состояния.

Метод САОМ предполагает, что в структуре функций $a(\cdot)$ и $b(\cdot)$ можно выделить известные (расчетные) составляющие $a_0(\cdot)$, $b_0(\cdot)$ и приведенные «возмущения» $\delta a(\cdot)$, $\delta b(\cdot)$:

$$\begin{cases} a(t, \mathbf{x}) = a_0(t, \mathbf{x}) + \delta a(t, \mathbf{x}); \\ b(t, \mathbf{x}) = b_0(t, \mathbf{x}) + \delta b(t, \mathbf{x}), \end{cases} \quad (2)$$

причем $|\delta b(\cdot)| < |b_0(\cdot)| \forall (t, \mathbf{x})$ из области допустимых.

Для учета истинных начального и текущего состояний объекта, а также подавления возмущений при построении системы автоматического управления

необходимо воспользоваться принципом обратной связи по координатам ОУ или их оценкам, т. е.

$$x_d^{(n)} = F(v, \mathbf{x}), \quad (3)$$

где $x_d(t)$ – заданная программно генерируемая временная траектория желаемых движений выходной переменной ОУ, устойчивая и обладающая требуемыми показателями качества;

$v(t)$ – внешнее задающее воздействие.

Приравняв правые части (1) и (3), определяем закон управления как обратную модель управляемого процесса:

$$u = \frac{1}{b_0(t, \mathbf{x})} (F(v, \mathbf{x}) - a_0(t, \mathbf{x}) - \hat{y}(t)), \quad (4)$$

где $\hat{y}(t)$ – оценка «возмущений», формируемая наблюдателем:

$$\mu \dot{\hat{y}} + \hat{y} = x^{(n)} - a_0(t, \mathbf{x}) - b_0(t, \mathbf{x})u. \quad (5)$$

После исключения старшей производной выхода математическую модель наблюдателя можно описать уравнениями:

$$\begin{cases} \dot{\eta} = -\mu^{-1} (a_0(t, x) + b_0(t, x)u + \hat{y}); \\ \hat{y} = \eta + \mu^{-1} x^{(n-1)}, \end{cases} \quad (6)$$

где $\mu > 0$ – малый параметр, определяющий скорость процесса сигнальной адаптации алгоритма управления (4).

Закон управления (6) предусматривает использование обратных связей по выходной переменной ОУ и ее производным вплоть до (n-1)-ой. Однако прямые измерения производных выхода нестационарных объектов, которые подвержены воздействию внешних сил, или даже их косвенное восстановление по информации о физических переменных фактически недостижимо. Поэтому для нахождения оценок неизмеряемых производных регулируемой переменной и обеспечения требуемой помехозащищенности системы используются специальные алгоритмы, например дифференцирующие фильтры (ДФ) [10].

Метод расчета параметров ОУ

В качестве ОУ будут использованы две пары электромагнитов, что соответствует числу пар полюсов $p = 8$, следовательно, они обязаны обладать заданным максимальным тяговым усилием F_{\max} , которое может развиваться в течение продолжительной работы без перегрева обмотки катушки управления. Соответственно, для того чтобы гарантированно оставался запас на отработку динамических нагрузок, всегда должно выполняться условие $F_{\max} > Q$, где Q – статическая нагрузка.

Для нахождения параметров ОУ, а также для оптимизации его геометрии воспользуемся методикой, представленной в [11].

Во время оптимизации геометрии с самого начала требуется знать магнитную индукцию в зазоре B , которая зависит от магнитных свойств используемого

материала. При этом из-за проблем с управляемостью системы магнитное насыщение не допускается [12].

Плотность тока в проводниках катушек управления должна быть равна допустимому значению j_{\max} :

$$j_{\max} k_{Cu} A = \frac{B}{\mu_0} 2\delta, \quad (7)$$

где A – площадь обмотки в пазу, мм²;
 $k_{Cu} = 0.3 \dots 0.5$ – коэффициент заполнения площади паза медью;
 δ – величина воздушного зазора, мм;
 $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7}$ – магнитная проницаемость вакуума, Гн/м.

Площадь, занимаемую обмоткой в пазу, можно выразить как [13]

$$A = \left(\frac{D}{2} - \frac{d}{2} - t_p \right) \left(\frac{\pi d}{8} - t_p \right), \quad (8)$$

где D – внешний диаметр расположения ОУ, мм;
 d – диаметр магнитного кольца; мм;
 t_p – ширина полюса, мм.

Отсюда следует выражение для индукции в воздушном зазоре

$$B(d, t_p) = C_B \left(\frac{D}{2} - \frac{d}{2} - t_p \right) \left(\frac{\pi d}{8} - t_p \right) \quad (9)$$

и выражение для тягового усилия

$$F(d, t_p) = C_F C_B^2 \left(\frac{D}{2} - \frac{d}{2} - t_p \right) \left(\frac{\pi d}{8} - t_p \right), \quad (10)$$

где C_B и C_F – постоянные, определяемые соотношениями

$$C_B = \frac{\mu_0 j_{\max} k_{Cu}}{2\delta}; \quad (11)$$

$$C_F = \frac{p a l}{8\mu_0}, \quad (12)$$

где $a = 0.924$ – коэффициент числа полюсов при $p = 8$; l – длина пакета стали, мм.

Задача оптимизации и тем самым нахождения недостающих параметров ОУ сводится к задаче исследования на условный экстремум, т. е. необходимо найти максимум функции $F(d, t_p)$ при дополнительном условии $B(d, t_p) = B_{\max}$. Условие экстремума запишем в виде уравнения [14]:

$$\phi(d, t_p) = \left(\frac{D}{2} - \frac{d}{2} - t_p \right) \left(\frac{\pi d}{8} - t_p \right) - \frac{B_{\max}}{C_B} = 0. \quad (13)$$

Способом решения такой задачи является нахождение функции Лагранжа, определяемой выражением

$$L(d, t_p) = F(d, t_p) + \lambda \phi(d, t_p), \quad (14)$$

где λ – множитель Лагранжа.

Затем решаем систему уравнений:

$$\begin{cases} \phi(d, t_p) = 0; \\ \frac{\partial L(d, t_p)}{\partial d} = 0; \\ \frac{\partial L(d, t_p)}{\partial t_p} = 0. \end{cases} \quad (15)$$

Таким образом, решение системы (15), состоящей из уравнения (13) и частных производных уравнения (14), позволяет определить значения неизвестных величин d , мм; t_p , мм; λ .

Максимальный ток в проводнике катушки управления i_{\max} должен вызывать максимальное тяговое усилие F_{\max} и максимальную МДС. Зная значения тока i_{\max} , можно вычислить [15]:

– число витков на полюс:

$$n = \frac{j_{\max} k_{Cu} A}{2i_{\max}}; \quad (16)$$

– площадь сечения проводника:

$$a_0 = \frac{i_{\max}}{j_{\max}}; \quad (17)$$

– среднюю длину проводника катушки:

$$l_m = 2l + \frac{2\pi d}{p}, \quad (18)$$

где l – длина пакета стали, мм;

– активное сопротивление катушки управления:

$$R = \frac{\rho n l_m}{a_0}, \quad (19)$$

где ρ – удельное сопротивление меди;

– индуктивность катушки управления:

$$L = \frac{1}{m^2} \frac{p \mu_0 n^2 d l \Delta \alpha}{8 \delta}, \quad (20)$$

где $m = 1$ – число параллельных ветвей в электрической цепи контура при последовательном соединении катушек полюсов; $\Delta \alpha = 10^\circ \dots 15^\circ$ – полюсный угол.

Результаты экспериментов

Проведем математическое моделирование системы центрирования радиальных отклонений ротора электрической машины в составе микроэлектропривода, синтезированной методом САОМ. Общая структурная схема метода САОМ для предложенного способа активной стабилизации радиальных отклонений ротора представлена на рис. 2.

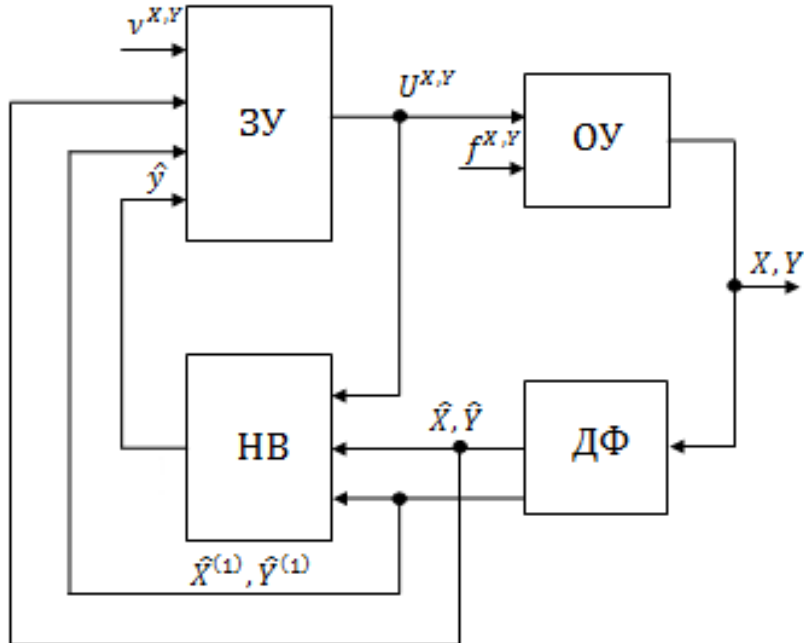


Рис. 2. Общая структурная схема метода САОМ

Для описания структурной схемы приведены следующие обозначения: $v^{X,Y}$ – сигналы задания на радиальные отклонения в плоскостях X и Y соответственно, В; ЗУ – подсистема закона управления; ОУ – подсистема ОУ; ДФ – подсистема ДФ; НВ – подсистема наблюдателя возмущений; $U^{X,Y}$ – напряжение, формируемое на ОУ, В; $f^{X,Y}$ – возмущающее воздействие, действующее на ОУ; \hat{y} – оценка возмущений, включающая в себя как параметрические, так и сигнальные возмущения, В; X, Y – выходные координаты радиальных отклонений ротора по плоскостям X и Y ; $\hat{X}, \hat{Y}, \hat{X}^{(1)}, \hat{Y}^{(1)}$ – оценки радиальных отклонений ротора и их первые производные в плоскостях X и Y соответственно.

Математическая модель электромагнитных процессов в катушке управления электромагнита представляет собой следующее дифференциальное уравнение:

$$U = IR + L \frac{dx}{dt}. \quad (21)$$

При дальнейших рассуждениях о системе активной стабилизации, синтезированной по методу САОМ, описание будет производиться только в одной плоскости X для одного электромагнита (для всех остальных электромагнитов рас-

суждения одинаковы), причем обозначение радиальных отклонений X и Y заменяется на x_2 . Структурная схема подсистемы ОУ представлена на рис. 3.

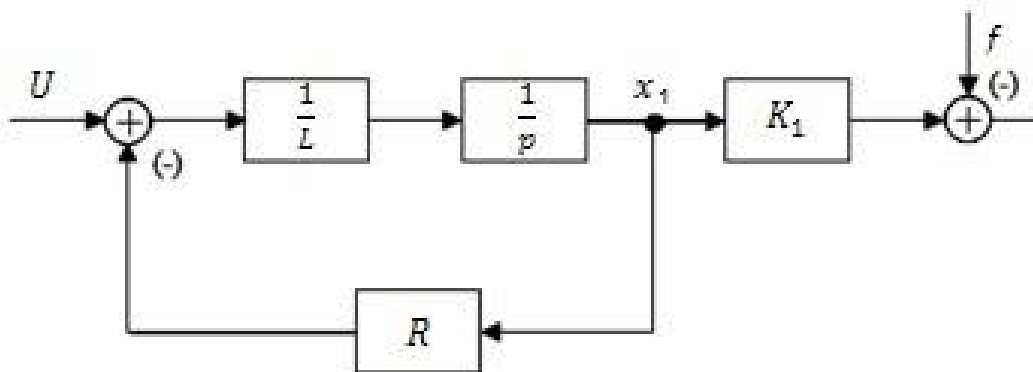


Рис. 3. Структурная схема подсистемы ОУ

Для описания структурной схемы ОУ приведены следующие обозначения: K_1 – коэффициент пропорциональности между током возбуждения и радиальным отклонением ротора; x_1 – ток возбуждения электромагнита, А; x_2 – радиальное отклонение ротора по стабилизируемой координате, мм.

С другой стороны, для возможности синтеза системы автоматического управления методом САОМ математическое представление электромагнита в операторной форме записи выглядит следующим образом:

$$\begin{cases} x_1(p) = (U(p) - Rx_1(p)) \frac{1}{L} \frac{1}{p}, \\ x_2(p) = K_1 x_1(p) - f(p). \end{cases} \quad (22)$$

Приведем математическую модель (22) к общему виду (1):

$$\ddot{x}_2 = \frac{UK_1}{L} - \frac{R\dot{x}_2}{L} - f \frac{R}{L} - \dot{f}. \quad (23)$$

Составляющие уравнения (23) можно разбить на две части: известную (неизменяемую) и неизвестную (изменяемую) в соответствии с (2):

$$\begin{cases} a(t, \mathbf{x}) = -\frac{R}{L} \dot{x}_2 - f \frac{R}{L} - \dot{f}, \\ b(t, \mathbf{x}) = \frac{K_1}{L}. \end{cases} \quad (24)$$

Для упрощения процедуры синтеза закона управления приведем первое уравнение системы (24) к следующему виду:

$$a_0(t, x) = a_{01} \dot{x}_2 - a_{00} x_2. \quad (25)$$

Согласно выражению (3) и условию, при котором необходимо обеспечить движения объекта в соответствии с эталонными процессами, уравнение желаемых движений выглядит следующим образом:

$$\ddot{x}_2 = \Omega_d^2 U - \Omega_d^2 x_2 - \Omega_d \dot{x}_2 A_1, \quad (26)$$

где $A_1 = 1.41$ – коэффициент формы стандартной линейной настройки по Баттерворту, который определяет колебательность переходного процесса; $\Omega_d = \frac{1}{T_d}$ – среднегеометрический корень, определяющий быстродействие процесса регулирования; $T_d = \frac{0.1L}{R}$ – желаемая постоянная времени, с.

В итоге закон управления для системы активной стабилизации радиального положения вала микроэлектропривода будет определяться следующим уравнением:

$$U = \frac{1}{b_0} \left((-\Omega_d^2 - a_{00})x_2 + (-\Omega_d A_1 - a_{01})\dot{x}_2 + \Omega_d^2 v - \hat{y} \right). \quad (27)$$

Структурная схема подсистемы закона управления представлена на рис. 4.

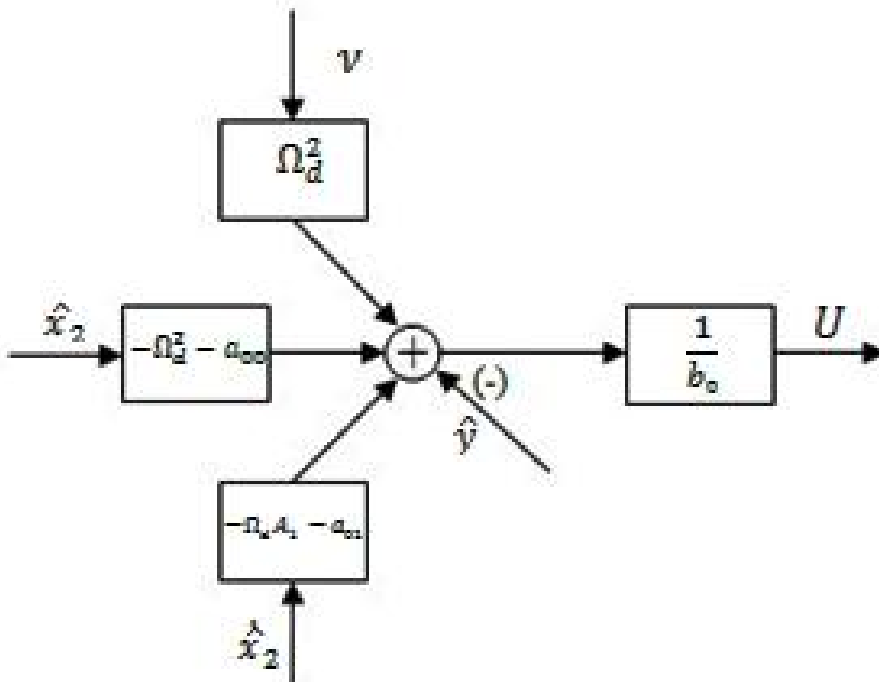


Рис. 4. Структурная схема подсистемы закона управления

Для снижения уровня помех в канале формирования управляющего воздействия ДФ должен представлять собой фильтр низких частот и иметь порядок инерционности минимум на единицу выше, чем порядок самой высшей оцениваемой с его помощью производной. Тогда математическое описание ДФ представляет собой:

$$T_F^2 \frac{d^2 \hat{x}_2}{dt^2} + T_F A_1 \frac{d \hat{x}_2}{dt} + \hat{x}_2 = x_2, \quad (28)$$

где $T_F \leq \frac{\mu}{K_{dm}}$ – постоянная времени фильтра, с;
 $K_{dm} = 6 \dots 10$ – коэффициент разделения движений;
 \hat{x}_2 – оценка выходной регулируемой координаты (радиального отклонения) в плоскости X и Y.

Структурная схема подсистемы ДФ представлена на рис. 5.

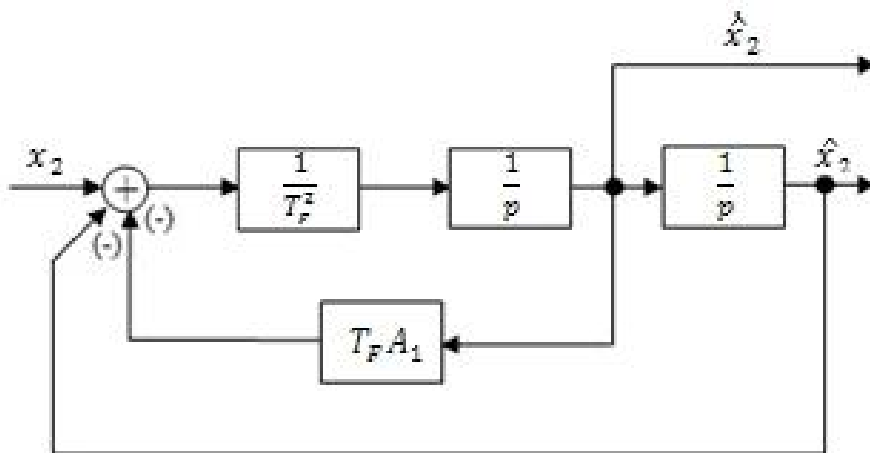


Рис. 5. Структурная схема подсистемы ДФ

Структурная схема подсистемы наблюдателя возмущений представлена на рис. 6.

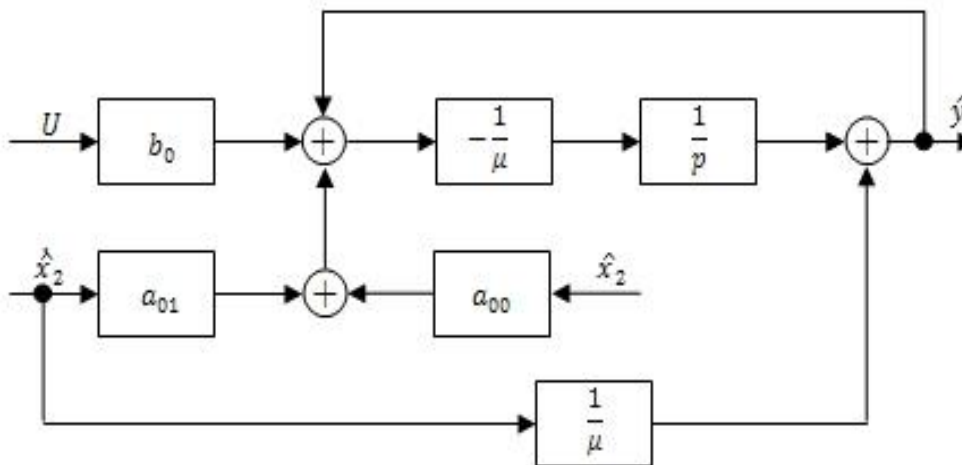


Рис. 6. Структурная схема подсистемы наблюдателя возмущений

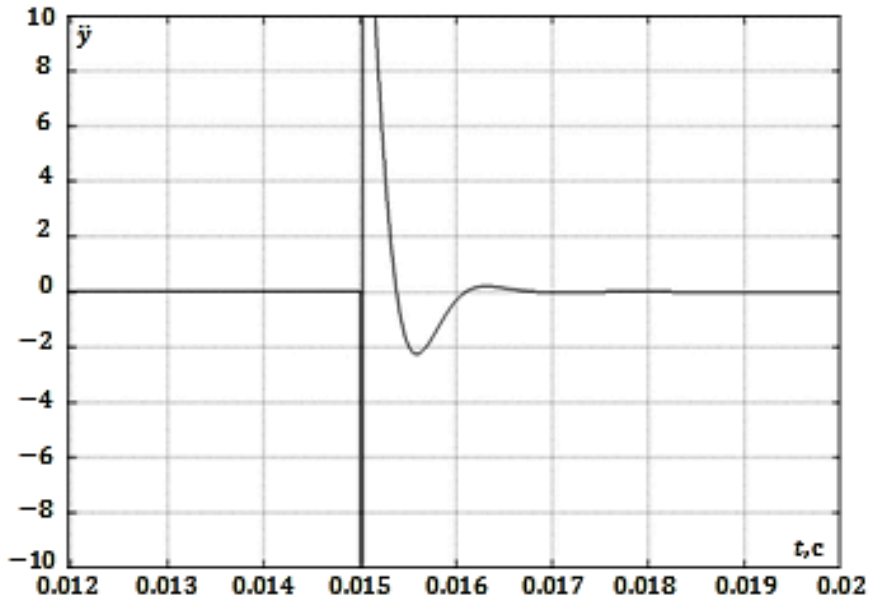


Рис. 7. Переходный процесс по оценке возмущений

Результатом цифрового моделирования является переходный процесс по оценке возмущений, включающей как параметрические, так и сигнальные возмущения (рис. 7), и по радиальному смещению ротора микроэлектродвигателя при работе системы активной стабилизации пространственного положения (рис. 8). В момент времени $T = 3.5$ с происходит ступенчатый наброс момента сопротивления нагрузки на вал электродвигателя, сопровождающийся отклонением его центральной оси вращения.

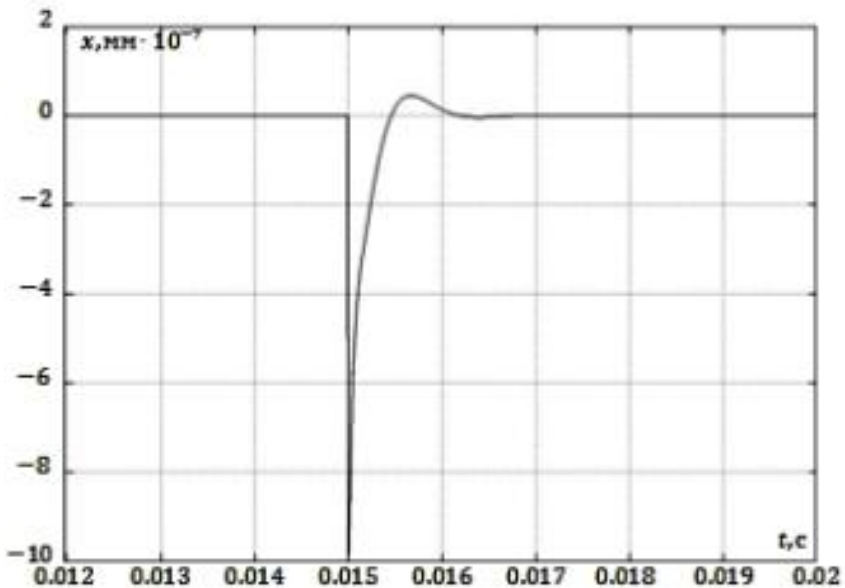


Рис. 8. Переходный процесс по радиальному смещению ротора

Выводы

Анализируя результаты цифрового моделирования предложенного подхода активной стабилизации радиальных отклонений ротора электропривода, можно сделать следующие заключения:

1. Синтезированная система автоматического управления за счет действия наблюдателя возмущений обладает нечувствительностью как ко внешним, так и к параметрическим отклонениям в работе электропривода.

2. Время регулирования выходной координаты принципиально мало для оказания негативного влияния на выполнение технологического процесса; величина перерегулирования находится в допустимом диапазоне, который в динамике не повлияет на возможное возникновение механических повреждений сборочных частей микроэлектропривода.

3. Применяемый для синтеза системы управления метод САОМ позволяет достичь больших вариантов выбора траекторий желаемых процессов и обеспечить малую чувствительность как параметрическим, так и внешним возмущениям.

Заключение

Исходя из полученных в ходе исследования результатов можно сделать заключение, что предложенный подход к активной стабилизации радиальных отклонений вращающейся части электрической микромашины является работоспособным. Результаты имитационного моделирования доказали, что полученные статические и динамические характеристики соответствуют характеру работы прецизионных технологических установок, поскольку компенсация радиальных отклонений производится в микрометровом диапазоне точности.

Последующие шаги будут направлены на создание и применение функциональных возможностей предложенного метода устранения дисбаланса. Дальнейшее развитие данной теории является актуальной научно-технической проблемой области машино- и приборостроения, решение которой позволяет значительно повысить точность и производительность технологических установок.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. *Космынин А.В., Шаломов В.И.* Аэростатические шпиндельные опоры с частичнопористой стенкой вкладыша // *Современные проблемы науки и образования.* – 2006. – № 2. – С. 69.
2. *Шмагин А.А.* Предельная частота вращения шпинделя при затяжке резьбовых соединений // *Известия МГТУ.* – 2008. – № 2. – С. 340–342.
3. *Бундур М.С., Прокопенко В.А., Чернов И.А.* Моделирование шпиндельных гидростатических подшипников и исследование возможностей повышения их динамического качества // *Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики.* – 2009. – № 6 (64). – С. 32–37.
4. *Дымов И.С., Котин Д.А.* Проектирование адаптивной магнитной системы аэростатического шпинделя // *Фундаментальные исследования.* – 2015. – № 10 (часть 2). – С. 254–258.
5. *Поляхов Н.Д., Стоцкая А.Д.* Обзор способов практического применения активных магнитных подшипников // *Научное приборостроение.* – 2012. – Т. 22, № 4. – С. 5–18.
6. *Дымов И.С., Котин Д.А., Аносов В.Н., Кучер Е.С.* Синтез системы автоматической коррекции осевых смещений вращающегося ротора мехатронного модуля // *Изв. вузов. Приборостроение.* – 2017. – Т. 60, № 6. – С. 157–166.
7. *Кирьянов А.В., Жмудь В.А., Томилов И.Н. [и др.].* Повышение точностных параметров лазерных генераторов изображений с круговым сканированием для формирования прецизионных углоизмерительных структур // *Научный вестник Новосибирского государственного технического университета.* – 2013. – № 3 (52). – С. 46–50.

8. Панкратов В.В. Метод синтеза робастных алгоритмов управления на основе адаптивных обратных моделей // Автоматизированные электромеханические системы: Сб. науч. трудов. – Новосибирск: Изд-во НГТУ, 2008. – С. 14–27.
9. Панкратов В.В., Нос О.В. Специальные разделы ТАУ. Ч. I. Модальное управление и наблюдатели: Учеб. пособие. – Новосибирск: Изд-во НГТУ, 2001.
10. Панкратов В.В., Зима Е.А., Нос О.В. Специальные разделы современной теории автоматического управления: Учеб. пособие. – Новосибирск: Изд-во НГТУ, 2007.
11. Журавлев Ю.Н. Активные магнитные подшипники: теория, расчет, применение. – СПб.: Политехника, 2003.
12. Щеклеина И.Л., Угольников А.В. К теории расчета радиального активного магнитного подшипника // Известия УГТУ. – 2016. – № 2 (42). – С. 59–62.
13. Bleuler H. Magnetic levitation: a challenge for control design in mechatronics. Toshiba Chair for Intelligent Mechatronics. 2011. Vol. 44, № 12. P. 578–583.
14. Kimman M.H., Langen H.H., Munnig Schmidt R.H. A miniature milling spindle with active magnetic bearings. Mechatronics. 2010. Vol. 20, № 2. P. 224–235.
15. Зотов И.В., Лисиенко В.Г. Усовершенствование методики расчета радиальных активных магнитных подшипников // Вестник Воронежского государственного технического университета. – 2012. – Т. 8, № 6. – С. 54–56.

Статья поступила в редакцию 15 июля 2019 г.

AUTOMATIC CORRECTION OF RADIAL DISPLACEMENT OF THE MICRO ELECTRIC DRIVE ROTOR BY THE SIGNAL-ADAPTIVE INVERSE MODEL METHOD

I.S. Dymov, D.A. Kotin, Y.V. Pankracz

Novosibirsk State Technical University
20, Prospekt K. Marksa, Novosibirsk, 630073, Russian Federation

Abstract. The paper is devoted to the development and investigation of automatic correction system of rotor radial position updating of micro electric drive, used in high-precision processing systems. A new approach of solving the problem of stabilizing the rotating element of motor, based on active current updating of the spatial position is offered. Automatic stabilization is achieved by organizing in the electromechanical system an electromagnetic effect of reversible nature. It is proposed to use the paired groups of electromagnets operating on the control object. The development of the automatic correction algorithm is done by the signal-adaptive inverse model method. The approach is able to provide the desired quality indicators for the control process of a nonlinear object, and also to achieve insensitivity of the correction system for external and internal signal and parametric disturbances. The paper describes the way of constructive implementation of this method, structural synthesis methodology of control law. Structural and functional diagrams of the automatic correction system for radial deviations are presented in the article, as well as the results of simulation, confirming potential of conducted research.

Keywords: active stabilization, balancing, signal-adaptive controller, micro electric drive.

Ilya S. Dymov, Postgraduate Student.

Denis A. Kotin (Ph.D. (Techn.)), Head of Department.

Yuriy V. Pankrats (Ph.D. (Techn.)), Associate Professor.

REFERENCES

1. *Kosmynin A.V., Shalomov V.I.* Aerostatic spindle supports with a partially-porous liner wall. Modern problems of science and education. 2006. No. 2. P. 69. (In Russian).
2. *Shmagin A.A.* Maximum spindle speed when tightening threaded connections. Izvestia MSTU. 2008. No. 2. Pp. 340–342. (In Russian).
3. *Bundur M.S., Prokopenko V.A., Chernov I.A.* Simulation of spindle hydrostatic bearings and the study of the possibilities of improving their dynamic quality. Scientific and Technical Journal of Information Technologies, Mechanics and Optics. 2009. No. 6 (64). Pp. 32–37. (In Russian).
4. *Dymov I.S., Kotin D.A.* Designing an adaptive magnetic system of aerostatic spindle. Fundamental research. 2015. No. 10 (part 2). Pp. 254–258. (In Russian).
5. *Polyakhov N.D., Stotskaya A.D.* Review of practical applications of active magnetic bearings. Scientific Instrument. 2012. V. 22, No. 4. Pp. 5–18. (In Russian).
6. *Dymov I.S., Kotin D.A., Anosov V.N., Kucher E.S.* Synthesis of the system for automatic correction of axial displacements of the rotating rotor of the mechatronic module. Izv. universities. Instrument making. 2017. Vol. 60, No. 6. Pp. 157–166. (In Russian).
7. *Kiryayov A.V., Zhmud V.A., Tomilov I.N. [et al.].* Increase of accuracy parameters of laser generators of images with circular scanning for the formation of precision angle-measuring structures. Scientific Bulletin of Novosibirsk State Technical University. 2013. No. 3 (52). Pp. 46–50. (In Russian).
8. *Pankratov V.V.* Method of synthesis of robust control algorithms based on adaptive inverse models. Automated electromechanical systems: Coll. scientific works. Novosibirsk: NSTU Publishing House, 2008. Pp. 14–27. (In Russian).
9. *Pankratov V.V., Nos O.V.* Special sections TAC. Part I Modal control and observers. Tutorial. NSTU, 2001. (In Russian).
10. *Pankratov V.V., Zima E.A., Nos O.V.* Special sections of the modern theory of automatic control: Proc. allowance. Novosibirsk: NSTU Publishing House, 2007. (In Russian).
11. *Zhuravlev Yu.N.* Active magnetic bearings: Theory, calculation, application. SPb.: Polytechnic, 2003. (In Russian).
12. *Schekleina I.L., Ugolnikov A.V.* To the theory of calculation of the radial active magnetic bearing. Proceedings of the USSU. 2016. No. 2 (42). Pp. 59–62. (In Russian).
13. *Bleuler H.* Magnetic levitation: a challenge for control design in mechatronics. Toshiba Chair for Intelligent Mechatronics. 2011. Vol. 44, № 12. Pp. 578–583.
14. *Kimman M.H., Langen H.H., Munnig Schmidt R.H.* A miniature milling spindle with active magnetic bearings. Mechatronics. 2010. Vol. 20, № 2. Pp. 224–235.
15. *Zotov I.V., Lisenko V.G.* Improving the method of calculating radial active magnetic bearings. Bulletin of Voronezh State Technical University. 2012. V. 8, No. 6. Pp. 54–56.