

Адаптивное управление многосвязными объектами в робототехническом технологическом комплексе на основе самонастраивающейся системы с моделью

З.М. Хасанов
Факультет АВИАЭТ
Уфимский государственный авиационный
технический университет
Уфа, Россия
e-mail: zimfirm@list.ru

Н.В. Хасанова
Факультет информатики робототехники
Уфимский государственный авиационный
технический университет
Уфа, Россия
e-mail: khasanova.nv@mail.ru

О.З. Хасанов
Институт авиационных технологий и
материалов
Уфимский государственный авиационный
технический университет
Уфа, Россия
e-mail: legnix@mail.ru

Н.В. Карелина
Факультет информатики робототехники
Уфимский государственный авиационный
технический университет
Уфа, Россия
e-mail: n.karelina2013@mail.ru

Аннотация¹

Как объекты управления сложные многосвязные электромеханические системы технологического плазменного оборудования плазменного нанесения покрытий представляют собой сложные нелинейные динамические голономные системы высокого порядка, описываемые системой дифференциальных уравнений Лагранжа II рода. Объектами такого рода являются все многосвязные электромеханические системы технологического оборудования и привода робота манипулятора. Выбор типа электроприводов определяется, прежде всего, неопределенностью и изменчивостью внешней среды и стабильностью требуемых маршрутов движения. При синтезе законов адаптивного управления такими объектами обычно строится линейная модель для опорного движения, на которой достигается цель адаптивного управления, стабилизирующее управление находится из анализа линейной модели. На этом пути возникают проблемы настройки взаимосвязанных коэффициентов, учета влияния нелинейностей и т. д. В настоящей работе задача стабилизации заданных (в соответствии с целью управления) положений электромеханических систем рассматривается в исходной нелинейной постановке без перехода к линейным моделям. В связи с этим основным исследовательским аппаратом

является метод функций Ляпунова, причем в качестве функции Ляпунова рассматривается полная энергия адаптивной системы автоматического управления (САУ). Такой подход позволил установить асимптотическую устойчивость в целом заданных положений многосвязных систем при использовании ограниченных управлений, построенных на основе ПИД-регуляторов. С использованием указанного подхода оказалось возможным установить реализуемость предложенных новых алгоритмов адаптивного управления для заданных инерционных исполнительных устройств, в силовых цепях которых допустимы большое форсирование и динамические скользкие режимы работы. Такие адаптивные САУ позволяют обеспечить очень высокие динамические показатели вентильных электродвигателей точно на заданном уровне и расширить диапазон управления скорости до 1:10000.

1. Введение

При синтезе многосвязных цифровых адаптивных САУ возникают серьезные задачи, связанные с тем, что эти системы управления относятся к классу многофункциональных систем, характеризующихся большим числом изменяемых параметров, сильной их взаимозависимостью, наличием обратных связей, адаптивностью, нелинейностью и нестационарностью поведения. Функционируя в условиях существенной неопределенности параметров технологической среды, все подсистемы адаптивных САУ постоянно находятся под влиянием внешних и внутренних возмущений, снижающих их эффективность и приводящих к неустойчивому функционированию [1].

Труды Шестой всероссийской научной конференции "Информационные технологии интеллектуальной поддержки принятия решений", 28-31 мая, Уфа-Ставрополь, Россия, 2018

В качестве основных источников возникновения неопределенностей выступают непредсказуемость и непредвиденные изменения в работе плазмотрона, связанные с выгоранием электродов и колебаниями плазменной струи. Поэтому придание адаптивным САУ свойств самоорганизации и повышение эффективности работы всех ее функциональных подсистем, способных компенсировать последствия влияния неопределенных факторов, является весьма актуальной задачей [2]. К несомненным достоинствам адаптивных САУ с эталонной моделью обычно относят простую реализуемость, высокую скорость адаптации к изменению внешних условий, а также малую чувствительность к измерительным шумам.

Среди прочих методов синтеза адаптивных устойчивых САУ подход, базирующийся на критерии устойчивости в целом, обладает, по крайней мере, двумя важными свойствами, заключающимися в его систематичности и гарантированном обеспечении устойчивости для любых начальных условий входных воздействий. Наибольшие успехи в области разработки методов синтеза адаптивных устойчивых САУ получены в рамках теории гиперустойчивости В. М. Попова [3]. Наиболее полно процедуры и алгоритмы синтеза адаптивных САУ на базе теории гиперустойчивости приведены в работе [4].

Общая структура адаптивной гиперустойчивой САУ с моделью эталоном представлена на рисунке 1. В работе [5] приведен способ преобразования этой структуры к линейной гиперустойчивой САУ с нелинейной адаптивной обратной связью.

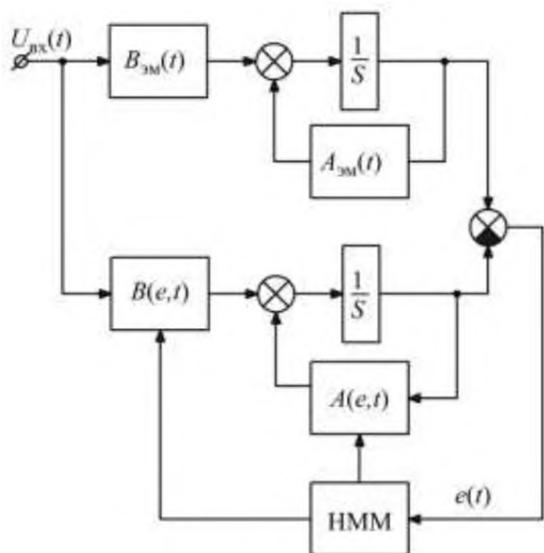


Рис. 1

2. Постановка задачи

Рассматривается сложная стационарная управляемая электромеханическая система с n степенями свободы, движение которой в независимых обобщенных координатах $q_1(t), q_2(t) \dots q_n(t)$ описывается уравнениями Лагранжа II рода

$$\frac{d}{dt} \frac{dK}{d\dot{q}_i} - \frac{dK}{dq_i} = Q_i - \frac{d\Pi}{dq_i} + U_i(t), \quad (1)$$

где $K = \frac{1}{2} \sum_{i,k=1}^n b_{ik}(q) \cdot \dot{q}_i \cdot \dot{q}_k$ – кинетическая энергия электромеханической системы; $\Pi(q, t)$ – ее потенциальная энергия; $Q_i(q, \dot{q}) = Q_i^1(q, \dot{q}) + Q_i^2(q, \dot{q})$ – обобщенные силы в электромеханической системе; $Q_i^1(q, \dot{q})$ и $Q_i^2(q, \dot{q})$ – гироскопическая и диссипативная составляющие соответственно. При $\dot{q}_i = 0$ для всех $i=1,2,\dots,n$ эти составляющие обращаются в нуль, то есть $Q_i(q, 0) = 0$ для всех $i=1,2,\dots,n$.

Функция $U(t) = \|U_i(t)\|_{i=1}^n$ в уравнениях движения характеризует управляющие обобщенные силы (алгоритм управления). В качестве допустимых управлений рассматривается совокупность суммируемых на любом конечном интервале функций $U_i(t)$, удовлетворяющих неравенствам

$$|U_i(t)| \leq U_i^{CT}, i = 1, 2, \dots, n, \quad (2)$$

для всех $U_i^{CT} \geq 0$.

В настоящей работе рассматривается задача стабилизации системы (1) в заданном (в соответствии с целью управления) положении $q_i = a_i$ для всех $i=1,2,\dots,n$, где в качестве $a_i = \|a_i\|_{i=1}^n$ может быть выбрано произвольное положение. Задачи программного управления или стабилизации сводятся к определению такого допустимого, т.е. удовлетворяющего (2), управления $U_i = \|U_i(q, t)\|_{i=1}^n$ при котором замкнутая система

$$\frac{d}{dt} \frac{dK}{d\dot{q}_i} - \frac{dK}{dq_i} = Q_i - \frac{d\Pi}{dq_i} + U_i(q, t), \quad (3)$$

для всех $i=1,2,\dots,n$ имеет асимптотически устойчивое в целом положение равновесия $q=a$.

Задача стабилизации возникает, как при управлении многосвязными электромеханическими системами, так и при управлении приводами робота манипулятора технологического оборудования плазменного нанесения покрытий.

При решении сформулированной задачи будем предполагать, что потенциальные составляющие обобщенных сил $\frac{d\Pi}{dq_i}$ удовлетворяют неравенству

$$\sup \left| \frac{d\Pi}{dq_i} \right| = h_i \leq H_i, i = 1, 2, \dots, n. \quad (4)$$

Неравенства (4) задают естественные ограничения на интенсивность управляющих сил, подводимых на многосвязные электромеханические системы, как технологического оборудования, так и всего робототехнического комплекса.

Без учета ограничений на алгоритмы управления многосвязными электромеханическими системами, некоторые задачи управления электроприводами робота рассматривались в работах [5, 6]. В работе [5] установлено, что управление вида

$$U_i(q_i, t_i) = \frac{d \Pi_i}{d q_i} - A_i(q_i - a_i) - B_i \cdot \dot{q}_i, \quad (5)$$

здесь A_i, B_i – постоянные диагональные матрицы, обеспечивает асимптотическую устойчивость в целом положения равновесия $q=a$ системы уравнений (3). В работе [6] показано, что при выборе управления в виде уравнения (5) имеет место экспоненциальная асимптотическая устойчивость положения равновесия системы уравнений (3) для $q=a$.

Соотношения уравнений (5) задают классические ПИД- и ПД-законы управления для каждой степени свободы многосвязного электропривода, как технологического оборудования, так и приводов робота-манипулятора. Они получили также широкое применение при построении систем автоматического управления с быстродействующими адаптивными алгоритмами. Из соотношений (5) непосредственно видно, что управления вида (5) не удовлетворяют неравенствам типа (2), так как для их реализации в процессе движения могут потребоваться значительные по величине управляющие силовые воздействия, оценку которых можно получить, например, из анализа начальных возмущений.

3 Синтез стабилизирующих управлений

Первый этап решения задачи стабилизации состоит в том, что за счет алгоритмов адаптивного управления производится компенсация потенциальных сил в (1). Поэтому управления $U_i(t)$ представляются в виде

$$U_i(q_i, t) = \frac{d \Pi(q_i, t)}{d q_i} + H_i(t), i = 1, 2, \dots, n, \quad (6)$$

где суммируемые на любом конечном интервале функции $H_i(t)$ удовлетворяют неравенствам

$$|L_i(t)| = h_i \leq H_i - r_i, i = 1, 2, \dots, n. \quad (7)$$

Пусть для функции (6) выполняется условие (7), тогда в силу (4) функция (6) будет определять допустимые алгоритмы управления $U_i(t), i = 1, 2, \dots, n$. Функции $H_i(t), i = 1, 2, \dots, n$ имеют смысл новых управлений и будут выбираться из множества функций, удовлетворяющих (7).

Будем также считать объект управления управляемым и наблюдаемым, например, в смысле поточечного

выполнения этих свойств для всевозможных линейных стационарных приближений (1), а также исходить из других необходимых для постановки задачи адаптивного управления предположений [7].

Введем в рассмотрение ограниченную, непрерывную, строго монотонно возрастающую на всей оси функцию изменения скорости электромеханической системы, привязанную к заданному параметру h . Функцию изменения скорости $H_i(v_i(t))$ в (6) будем выбирать в соответствии $-0,5h_i \leq H_i(v_i(t)) \leq +0,5h_i$.

Тогда для заданной функции изменения скорости уравнение движения (1) примет вид

$$\begin{cases} \frac{d}{dt} \frac{d K_i}{d \dot{q}_i} - \frac{d K_i}{d q_i} = Q_i(q, \dot{q}) + H_i(v_i(t)), \\ i = 1, 2, \dots, n \end{cases}, \quad (8)$$

и задача САУ электромеханической системы будет состоять в определении таких функций $v_i(t)$ при которых положение равновесия $q_i = a_i$ системы (9) будет асимптотически устойчиво в целом. Функции $v_i(t)$ надо выбирать в соответствии с классическими законами ПИД- и ПД-управления для каждой многосвязной электромеханической системы технологического оборудования и для каждого электропривода робота по каждой степени свободы.

4 Динамика исполнительных органов

При использовании адаптивных алгоритмов согласно (6) требовалось знать изменение потенциальной энергии в динамике. Поэтому естественно возникает задача определения функции $\Pi(q_i, t)$.

Для многих многосвязных электромеханических систем потенциальную энергию в каждом приводе можно найти с помощью специальных пробных экспериментальных движений. Пусть $\Pi(q_i, t)$ для конкретной электромеханической системы имеет вид

$$\Pi(q_i, t) = \sum_{j=1}^m \alpha_j \beta_j(q_i), i = 1, 2, \dots, n, \quad (9)$$

где $\beta_j(q_i)$ – заданная функция электромеханической системы, определяет паспортные данные элементов; α_j – функция зависящая от кинематической схемы многосвязной электромеханической системы или манипуляционного технологического робота.

Для определения величин α_j за счет надлежащего выбора адаптивного управления необходимо строить (моделировать) специальные (пробные) движения для системы уравнений (1), на котором она сходится к динамическому положению равновесия. Значения обобщенных координат $q_i^{пр}$ в этом положении находятся с помощью измерительного эксперимента.

Все функциональные элементы электромеханических систем обладают определенной инерционностью. В связи с этим возникает серьезный вопрос, можно ли подобрать параметры адаптивного управления $U_i(t)$, удовлетворяющие уравнениям динамики комплекса многосвязной электромеханической системы.

Для простоты оценки в качестве примера рассмотрим случай, когда состояние функциональных элементов электромеханической системы описывает линейное дифференциальное уравнение первого порядка

$$\alpha \frac{d U_i(t)}{d t} + U_i(t) = \Phi_i(t), \quad (10)$$

здесь α – постоянная величина, а функция $\Phi_i(t)$ характеризует управление электроприводом. Ограниченность динамических характеристик электроприводов выражается неравенством $|\Phi_i(t)| \leq R_i(t)$, $(i = 1, 2, \dots, n)$. Поэтому управление $U_i(t)$ будет реализуемо приводами только в том случае, если выполняется неравенство

$$\left| \alpha \frac{d U_i(t)}{d t} + U_i(t) \right| \leq R_i(t), \quad (11)$$

С рассматриваемой задачей адаптивного управления тесно связаны вопросы о возможности построения адаптивных итерационных процедур, обеспечивающих перевод системы уравнений (1) в заданное положение $q = b$.

Подобные задачи возникают, как при управлении многосвязными электромеханическими системами, так и манипуляционными роботами, когда значения параметров системы и, в частности, потенциальной энергии $P(q_i, t)$ неизвестны. Если каждую итерацию рассматривать как пробное движение, то всю процедуру в целом можно считать алгоритмом адаптивного обучения электропривода движению в заданное положение. Для подобных задач нужны алгоритмы обучения для каждого электропривода, как электромеханической системы, так и робота манипулятора.

Заключение

Получено решение задачи синтеза управления многосвязными электроприводами технологического оборудования электродугового плазменного нанесения покрытий, обеспечивающих устойчивость в целом заданных положений электромеханических систем и механических систем робота манипулятора, описываемых уравнениями Лагранжа II рода. Определены условия, параметры электроприводов при которых эти законы управления могут быть реализованы с помощью предложенной многосвязной электромеханической системы. С использованием алгоритмов адаптивного управления предлагаются процедуры описания сложного многосвязного движения электроприводов в заданное положение.

Всероссийская научная конференция "Информационные технологии интеллектуальной поддержки принятия решений", Уфа-Ставрополь, Россия, 2018

Полученные теоретические и практические результаты апробированы на примере исследования динамических параметров цифровых адаптивных САУ с настраиваемыми эталонными моделями для электромеханических систем технологического оборудования электродугового плазменного нанесения покрытий, проиллюстрированы их работоспособность и эффективность в цеховых условиях эксплуатации.

Благодарности

Работа выполнена при поддержке гранта РФФИ № 16-08-00942.

Список используемых источников

1. Хасанов З. М. Автоматизированное технологическое оборудование для электродугового плазменного напыления // Сварочное производство. 2006. № 5. С. 44 – 50.
2. Хасанов З. М. Автоматизированная система управления технологическими процессами газотермического нанесения покрытий на основе алгоритмов адаптации и координации: дис. докт. техн. наук. Уфа, 2009.
3. Хасанов З. М., Хасанов О. З., Гузаиров Р. М. Математическая модель движения многосвязных систем электроприводов для технологических процессов электродугового плазменного напыления // Мехатроника, автоматизация, управление. №2, Том. 16, 2015. С. 116 – 122.
4. Хасанов З. М., Хасанов О. З. К синтезу адаптивных САУ многосвязными электроприводами с моделью эталоном и с беспойсковым алгоритмом идентификации. // Вестник УГАТУ, Том 21, №. 4, 2017. С. 163 – 172.
5. Хасанов З. М., Хасанов О. З., Хасанова Н. В., Ахметзянова И. Р. Влияние нечеткого регулятора на повышение точности позиционирования и быстродействия систем адаптивного управления многосвязными приводами. // Proc. of the 5th All-Russian Conference «Information Technologies for Intelligent Decision Making Support», ITIDS'2017. Ufa, vol.1, 2017, P. 64–66.
6. Хасанов З. М., Хасанов О. З., Хасанова Н. В. К синтезу системы адаптивного управления скоростью и положением многосвязных приводов с моделью эталоном на основе теории устойчивости. // Proc. of the 5th All-Russian Conference «Information Technologies for Intelligent Decision Making Support», ITIDS'2017. Ufa, vol.2, 2017, P. 175–180.
7. Хасанов З. М., Якимович Б. А., Гузаиров Р. М. Позиционно-адаптивное управление многосвязными электроприводами технологического оборудования электродугового плазменного напыления // Вестник Ижевского государственного технического университета, № 4, 2014. С. 41–49.