

Идентификация, робастно-адаптивное управление динамическими объектами робототехнического технологического комплекса

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

И.Р. Ахметзянова
Факультет АВИАЭТ
Уфимский государственный авиационный
технический университет
Уфа, Россия
e-mail: iness05.17.07.93@mail.ru

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

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

Аннотация¹

Для управления нестационарными технологическими объектами успешно используются робастно-адаптивные системы автоматического управления (САУ), которые обеспечивают высокие показатели качества и инвариантность по отношению к изменяющимся параметрам. Процесс синтеза робастно-адаптивных САУ реализуется при сочетании сложных процедур оптимального оценивания основных параметров (идентификации) и состояния управляемого процесса с процедурами робастно-адаптивного управления с использованием прогнозирующих моделей. Так, методы параметрической адаптации не всегда позволяют эффективно парировать быстрые изменения параметров электромеханических систем в широких пределах. Создана конкретная структура робастно-адаптивной САУ с эталонной моделью, которая позволяет увеличить точность выполнения заданных технологических операций и повысить производительность. Излагается подход к решению задач параметрической идентификации и робастно-адаптивного управления сложными динамическими многосвязными электромеханическими системами на основе эталонной модели.

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

1. Введение

Современное состояние в области создания робастно-адаптивных САУ сложными динамическими объектами робототехнического технологического комплекса (РТК) характеризуется интеграцией многочисленных подсистем с целью обеспечения максимальной эффективности системы в целом. В последние годы для управления нестационарными динамическими многосвязными электромеханическими системами РТК успешно используются адаптивные и робастные САУ, которые обеспечивают высокие показатели качества и инвариантность по отношению к изменяющимся параметрам. Однако при очевидных достоинствах известных подходов их применение при синтезе робастно-адаптивных САУ ограничено и зачастую наталкивается на значительные трудности. Так, например методы параметрической адаптации не позволяют успешно парировать быстрые изменения параметров электромеханических систем в широких пределах. Во многих случаях робастно-адаптивные САУ синтезируются на базе неадекватно линеаризованных упрощенно нелинейных моделях многосвязных электромеханических систем, поэтому имеют заведомо заниженное быстродействие.

Кроме того, известные подходы не учитывают влияние на качество функционирования робастно-адаптивных САУ не идеальности исполнительных механизмов и многочисленных ограничений на управляющие сигналы. Использование адаптивного и робастного подходов при синтезе цифровых быстродействующих САУ сложными электромеханическими системами

весьма сложно. В свою очередь унификация всех робастно-адаптивных САУ, содержащих в своем составе многосвязные подсистемы идентификации динамических моделей многосвязных объектов управления, подсистемы адаптивной стабилизации и программного управления позволяет рационально построить аппаратное и программное обеспечение этих систем и расширить их область применения [1]. В робастно-адаптивных системах наиболее простые и эффективные законы управления многосвязными нестационарными нелинейными объектами удастся сформировать в классе систем с разрывными управляющими сигналами, к которым относятся адаптивные системы с переменной структурой [2] и самонастраивающиеся САУ с эталонной моделью [3].

2. Постановка задачи управления

Одним из наиболее важных вопросов современной теории автоматического управления динамическими сложными взаимосвязанными электромеханическими объектами РТК является разработка результативных адаптивных алгоритмов управления с непрерывной или кусочно-непрерывной функцией времени. Это ослабляет требования САУ к объектам управления. Следует отметить, что САУ с робастно-адаптивными алгоритмами управления обладают не только высоким быстродействием, достаточно просты в реализации, но и сохраняют свою высокую работоспособность в условиях заданных параметрических и координатных возмущений, изменяющихся быстро и в достаточно широких пределах. Однако, как показывают данные моделирования в *Matlab*, при наличии достаточно сильно заданных параметрических или координатных возмущений переходные процессы в этих контурах параметрической и сигнальной настройки уже носят маленький колебательный характер. Избавиться от подобных колебаний «невязки» в соответствующих контурах настройки САУ позволяет использование в алгоритмах управления производной от вектора функции невязки. Такие адаптивные алгоритмы управления могут синтезироваться на основе схемы скоростного градиента при помощи интегральных целевых функционалов. Ошибку управления снижает дифференцирующий регулятор. Путем применения адаптивных схем скоростного градиента получаются разные алгоритмы управления, которые обеспечивают в электромеханической системе те или иные требуемые динамические свойства. Особенность предложенных в работе [4] адаптивных алгоритмов заключается в том, что управление является кусочно-непрерывной функцией времени. Это ослабляет требование к многосвязным исполнительным механизмам.

Рассмотрим структурную схему робастно-адаптивной САУ, показанную на рис. 1. САУ содержит два уровня иерархии: нижний – контур управления (КУ), и верхний – контур адаптации (КА).

Управления включает взаимосвязанное управляющее устройство (УУ) и многосвязные объекты управления (ОУ). Для управления применяются мощные микроконтроллеры с модулем периферийных устройств и объединенных между собой высокоскоростной коммуникационной сетью. Кроме этого, благодаря микроконтроллерам существенно сокращаются сроки проектирования за счёт применения комплекса отлаженных алгоритмов.

Также, микроконтроллер поддерживает возможность загрузки операционных систем реального времени. Полная структура УУ включает в себя многосвязные датчики и информационно-измерительные системы с АЦП и ЦАП. Контур адаптации (КА) построен на основе цифрового вычислительного комплекса (ЦВК), который получает информацию от датчиков и измерительных устройств РТК, обрабатывает ее в режиме реального времени между технологическими задачами и выдает управляющие воздействия с целью решения трех взаимосвязанных задач:

- идентификации основных параметров управления в многосвязной электромеханической системе;
- настройки параметров многосвязных робастно-адаптивных регуляторов управляющего устройства;
- диагностики электромеханической системы, блоков управления и контроля.

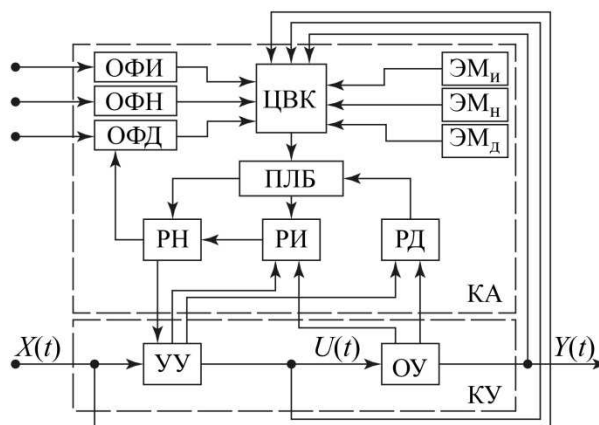


Рис. 1

Указанные задачи решаются последовательно в блоке идентификации (БИ), блоке настройки (БН) и блоке диагностики (БД) на основе логически-временных алгоритмов, реализуемых в программно-логическом блоке (ПЛБ). Нужное качество настройки параметров УУ, номинальные значения параметров ОУ и математическая модель управления задаются эталонными моделями $ЭМ_n$, $ЭМ_n$ и $ЭМ_d$. Точность решения перечисленных выше задач оценивается в блоках оценки функционалов идентификации (ОФИ), настройки (ОФН) и диагностики (ОФД). При всем единстве между задачами идентификации, настройки и диагностики имеются и существенные различия: первые две задачи решаются в автоматическом режиме, а третья задача может быть решена только

в автоматизированном режиме. По этой причине обе задачи рассматриваются отдельно.

3. Реализуемые стратегии управления

Известные к настоящему времени результаты теории робастно-адаптивных систем позволяют во многих случаях синтезировать алгоритмы адаптивного управления, гарантирующие устойчивость и заданное качество систем при существенной неопределенности параметров всех многосвязных объектов управления и внешних воздействий окружающей среды. Однако многие прикладные задачи не поддаются точному анализу известными методами. Поэтому актуальной задачей теории остается не только увеличение области применения методов синтеза робастно-адаптивных САУ, но и анализ динамики синтезированных систем.

К сожалению, получить строгое математическое решение указанных выше двух задач для конкретного объекта не всегда удается. Постановка конкретной задачи содержит достаточно сложное математическое описание многосвязных объектов с дополнительными требованиями и ограничениями, поэтому все большее внимание привлекают приближенные методы анализа, основанные на сведениях к задачам с известными решениями. Далее имеющееся решение используется при проектировании в качестве прототипа [5].

В задачах анализа и синтеза робастно-адаптивных САУ [6] находят применение две схемы разделения движений. Рассмотрим сначала схему, в которой все настраиваемые взаимосвязанные параметры меняются медленно по сравнению с координатами объекта. Для формализации этого подхода в алгоритмы робастно-адаптивного управления необходимо ввести малый параметр $\varepsilon > 0$, так что динамика всей многосвязной системы будет описываться системой уравнений вида

$$\frac{d X_i(t)}{d t} = F(X_i, Y_i, t), \quad (1)$$

$$\frac{d Y_i(t)}{d t} = G(X_i, Y_i, t), \quad (2)$$

с начальными условиями $X_i(0), Y_i(0)$.

Уравнение (1) описывает обобщенный многосвязный настраиваемый объект, взаимосвязанные вектора состояния которого $X_i = X_i(t) \in R^n$ включают, кроме состояния взаимосвязанных динамических объектов управления, векторы состояния исполнительных, измерительных и управляющих устройств, эталонных моделей управления и т. д. Алгоритмы адаптации (2) задают алгоритмы изменения вектора настраиваемых параметров $Y_i = Y_i(t) \in R^m, t > 0$. Зависимость от времени правых частей (1), (2) отражает, как влияние воздействий робототехнического технологического комплекса, так и возможную нестационарность всех взаимосвязанных объектов управления и контроля.

Предположение о малости параметра ε правомерно далеко не всегда, наоборот, на практике стараются увеличить скорость робастно-адаптивного управления. Однако действие различного рода помех оборудования РТК не учитываемых моделями (1) и (2) препятствует ускорению процесса адаптации. Если реальная величина ε настолько мала, что в реальной робастно-адаптивной САУ может возникать эффект разделения движений, то для построения этой САУ можно воспользоваться методом усреднения [7]. Для этого нужно найти решение системы

$$\begin{cases} \frac{d \bar{X}_i(Y_i(t), t)}{d t} = F(\bar{X}_i(Y_i(t), t), Y_i, t), \\ \bar{X}_i(Y_i(0), 0) = X_i(0), Y_i(t) = const \end{cases}, \quad (3)$$

получаемой для случая $\varepsilon = 0$ из уравнений (1) и (2).

Составим усредненное уравнение

$$\begin{cases} \frac{d \bar{Y}_i(Y_i(t), t)}{d t} = F(\bar{Y}_i(Y_i(t), t), Y_i, t), \\ \bar{Y}_i(Y_i(0), 0) = Y_i(0), Y_i(t) = const \end{cases}, \quad (4)$$

Правая часть уравнения имеет вид

$$F(\bar{Y}_i(Y_i(t), t), Y_i, t) = \lim_{T \rightarrow 0} \frac{1}{T} \int_0^T F(\bar{Y}_i(Y_i(t), t), Y_i, t) dt. \quad (5)$$

Пусть нестационарный исполнительный механизм электромеханической системы во временной области описывается разностными уравнениями в форме пространства состояний стандартного вида

$$\begin{cases} x(k+1) = A^*(k)x(k) + B^*(k)u(k), x(0) = u(0) = 0 \\ y(k) = C^*(k)x(k) + \varepsilon(k), M[\varepsilon(0)] = 0, k = 0, 1, 2, \dots \end{cases}, \quad (6)$$

где X, Y, U, ε – соответственно векторы состояния объекта, выхода, объекта управления и возмущения размерностей n, m, m, m ; A^*, B^* и C^* – матрицы вещественных параметров объекта размеров $n \times n, n \times m, m \times n$. Пусть в отношении всех параметров объекта применима гипотеза квазистационарности и сам объект является полностью управляемым и идентифицируемым. Будем считать помеху центрированной случайной функцией, распределенной по нормальному закону

$$M[\varepsilon(k)] = 0, M[\varepsilon(k)\varepsilon^T(l)] = \sigma^2 I \delta_{kl}. \quad (7)$$

Назначение устройства управления (см. рис.1) может быть описано в пространстве состояния уравнением

$$\begin{cases} \psi(k+1) = L^* \psi(k) + G_1^*(k)[g(k) - y(k)], \psi(0) = 0 \\ u(k) = F^* \psi(k) + G_2^*(k)[g(k) - y(k)], g(0) = g_0 \end{cases}, \quad (8)$$

здесь ψ, g – векторы состояния УУ и устройства задания, размерностей n_1 и m ; L^*, F^*, G_1^* и G_2^* – матрицы вещественных параметров УУ размерностей $[n_1 \times n_1], [m \times n_1], [n_1 \times m]$ и $[m \times m]$. Пусть матрицы L^* и F^* являются постоянными, а матрицы G_1^* и

G_2^* изменяются контуром адаптации. Система уравнений (6) и (8) соответствует контуру управления (КУ) робастно-адаптивной САУ. В рамках задач робастно-адаптивного управления важную роль играют пространства параметров контура адаптации (КА) САУ, определяемые алгоритмом управления, т.е. требуемыми соотношениями

$$\Phi = \{A^*, B^*, C^*, L^*, F^*, G_1^*, G_2^*\},$$

$$\Phi_D^1 = \{ \|A^*\| < A'; \|B^*\| < B'; \|C^*\| < C' \}, \quad (9)$$

$$\Phi_D^2 = \{ \|L^*\| < L'; \|F^*\| < F'; \|G_1^*\| < G_1'; \|G_2^*\| < G_2' \}.$$

Пусть требуемый алгоритм определяет некоторый элемент пространства $\Phi_{ЭМ}$ эталонной модели:

$$\Phi_{ЭМ} = \{A_{ЭМ}^*, B_{ЭМ}^*, C_{ЭМ}^*, L_{ЭМ}^*, F_{ЭМ}^*, G_{ЭМ1}^*, G_{ЭМ2}^*\}. \quad (10)$$

Цель робастно-адаптивного управления

$$x(t) \rightarrow x_{ад}^*(t), \quad \text{при } t \rightarrow \tau, \quad (11)$$

достигается при

$$x_{ад}^*(t) \rightarrow x_{ЭМ}^*(t), \quad \lim e(t) = 0, \quad t \rightarrow \tau. \quad (12)$$

Таким образом, для достижения требуемой цели (11) требуется, чтобы строго выполнялись условия, заданные эталонной моделью и уравнениями (6÷10).

Заключение

Сложность применения робастно-адаптивных САУ обусловлена несколькими многосвязными факторами. Во-первых, взаимосвязанные электромеханические системы в робототехническом технологическом комплексе содержат множество взаимосвязанных параметров адаптивного управления, изменяющихся в зависимости от условий их работы. Во вторых, при математическом описании сложных многосвязных электромеханических систем всегда присутствуют не измеримые многосвязные параметры и нелинейности, обусловленные наличием определенных зазоров и люфтов во вращающихся частях электромеханической системы. Также, при разработке адаптивных систем управления необходимо учитывать влияние внешних неконтролируемых возмущающих воздействий всего технологического оборудования. Эталонные модели многосвязных электромеханических систем содержат совокупность сложно определяемых нелинейностей, например: нелинейность квантования, нелинейное трение, зону нечувствительности, сигмоидальные и степенные нелинейности, произведение и сумму этих нелинейных переменных, нелинейность насыщения и т.д. Присутствие перечисленных нелинейностей порождает при синтезе робастно-адаптивных САУ «существенно - нелинейные явления». Примерами таких явлений являются: множественность состояния равновесия; решение задач на бесконечной плоскости; предельный или регулируемый цикл решения задач; субгармонические, гармонические и

почти периодические колебания; хаос и множественность режимов поведения. Синхронная работа электромеханических систем эквивалентна сведению системы дифференциальных уравнений к многосвязным независимым уравнениям, каждое из которых содержит только обобщенные координаты и их производные. Это требование может быть реализовано путем выбора структуры робастно-адаптивных САУ и использования методов динамической развязки в структуре передач электромеханических систем.

Благодарности

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

Список используемых источников

1. 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.
2. 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 – 45.
3. Khasanov Z.M., Khasanova N.V., Guzairov R.M. Mathematical model and design of adaptive control system of multivariable electric drives for technological plasma arc spraying process equipment // Proceedings of the Workshop on Computer Science and Information Technologies, CSIT'2014. – Ufa, vol.2, 2014. p. 209-212.
4. Хасанов З.М., Гузаиров Р.М. К проектированию широкодиапазонного электропривода для технологического оборудования электродугового плазменного нанесения покрытий // Вестник УГАТУ: науч. журн. Уфимск. гос. авиац. техн. ун-та. 2013. Т.17, №1 (54). С. 128-134.
5. Хасанов З. М. Автоматизированное технологическое оборудование для электродугового плазменного напыления // Сварочное производство. 2006. № 5. С.44 – 50.
6. Хасанов З.М., Гузаиров Р.М. К задаче синтеза систем электроприводов для технологического оборудования электродугового плазменного нанесения покрытий // Вестник УГАТУ: науч. журн. Уфимск. гос. авиац. техн. ун-та. 2013. Т.17, №1 (54). С. 146-149.
7. Хасанов З.М., Хасанов О.З. Самонастраивающаяся информационно-управляющая система с моделью для динамического управления электроприводами в высокотемпературных технологических процессах // Автоматизация и современные технологии. 2008. № 12. С. 24-32.