Раздел I. Математические методы синтеза систем

УДК 681.513.6

Н.В. Гудкова, К.В. Бесклубова

АДАПТИВНОЕ УПРАВЛЕНИЕ УПРУГОМАССОВЫМ ОБЪЕКТОМ С НЕИЗВЕСТНОЙ МАТЕМАТИЧЕСКОЙ МОДЕЛЬЮ

Статья посвящена исследованию возможностей приложения принципов адаптивного обратного моделирования к задачам управления упругомассовыми объектами без использования их математических моделей. В работе предпринята попытка формализовать процедуру выбора некоторых параметров адаптивной системы управления. Показано, что разработанные алгоритмы обеспечивают минимизацию среднеквадратической ошибки и демпфирование колебаний в управляемом объекте. Приведены результаты имитационного моделирования в среде MatLab адаптивной системы управления двухмассовым электроприводом, которые свидетельствуют об эффективности предложенных решений.

Синтез; система управления; упругомассовый объект; адаптивный алгоритм; ошибка; демпфирование колебаний.

N.V. Gudkova, K.V. Besklubova

ADAPTIVE CONTROL FOR ELASTICMASS OBJECT WITH UNKNOWN MODEL

The paper considers the investigation of opportunities for adaptive inverse modeling principles application to the problem of elasticmass objects control subject to mathematical model not being used. There is undertaken an attempt to formalize the procedure of choice of adaptive control system parameters. There is demonstrated that designed algorithms provide minimization of mean-square error and oscillations suppression in controlled object. The results of imitative modeling in system of mathematical modeling MatLab of two-mass motor adaptive control system show the effectiveness of introduced approach.

Synthesis; control system; elasticmass object; adaptive algorithm; error; oscillations suppression.

Значительную часть современного производственного оборудования составляют электроприводы механизмов с упругими передачами, которые называют упругомассовыми системами (объектами) [1–3]. Существенной особенностью такого рода объектов является взаимное влияние друг на друга механической и электрической частей устройства, т.е. упругие колебания в механической части приводят к возникновению колебательных режимов в электроприводе, что существенно усложняет управление объектом. Постоянно возрастающие требования к качеству управления технологическими процессами вынуждают проектировщиков управляющих устройств учитывать упругие свойства таких объектов и, следовательно, использовать более точные математические модели для их описания.

Известно, что большинство методов синтеза автоматических систем управления базируется на использовании математической модели управляемого объекта. Для синтеза упругомассовых систем эти методы применимы далеко не всегда, так как на практике получить адекватное математическое описание упругих свойств объекта зачастую трудно, а иногда и невозможно. Это связано с погрешностями измерений, старением оборудования, внешними возмущениями, влияющими на характеристики объекта.

В подобных случаях выходом из положения может стать использование адаптивных алгоритмов, предназначенных для управления так называемыми неопределенными объектами (НО), т.е. объектами с неизвестной математической моделью, иначе, объектами типа «черный ящик» [4–6]. Такой подход представляется авторам весьма перспективным направлением в современной теории управления.

Статья посвящена некоторым вопросам приложения алгоритмов данного класса к задачам управления упругомассовыми объектами.

На рис. 1 показана одна из возможных структур адаптивной системы управления НО. Система состоит из непрерывного динамического объекта и адаптивного регулятора, реализованного программно в управляющем компьютере УК. Объект и регулятор связаны между собой преобразователями АЦП / ЦАП.

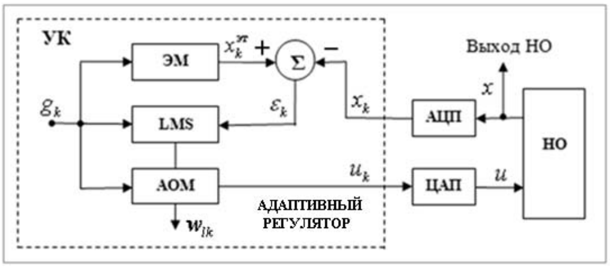

Рис. 1. Структура адаптивной системы управления неопределенным объектом

Система функционирует следующим образом. Задающее воздействие (уставка) формируется в УК в виде дискретного сигнала g_k (k =1, 2, …), который поступает на вход адаптивной обратной модели объекта АОМ. На выходе АОМ формируется дискретный управляющий сигнал u_k, который после преобразования в ЦАП подается на вход НО. Одновременно сигнал g_k поступает на вход эталонной модели системы (ЭМ), на выходе которой формируется эталонный (желаемый) процесс для управляемого объекта $x_k^{эт}$. Непрерывный выходной сигнал объекта x после преобразования в АЦП поступает на вход УК, где сравнивается с сигналом $x_k^{эт}$, в результате чего вычисляется сигнал рассогласования (ошибка управления) системы по формуле

$$\varepsilon_k = x_k^{эт} - x_k . \tag{1}$$

Целью управления является адаптивная минимизация среднеквадратической ошибки (СКО) (1). Для решения этой задачи АОМ объекта реализуется в виде адаптивного трансверсального фильтра (АТФ) [5]. Его уравнение имеет вид

$$u_k = \sum_{l=1}^{L} w_{lk} g_{k-l} , \tag{2}$$

где L – число весовых коэффициентов фильтра w_{lk}, которые в процессе адаптации перестраиваются по методу наименьших квадратов (LMS) в соответствии с рекуррентным соотношением

$$w_{l(k+1)} = w_{lk} + 2\mu g_{k-l} \varepsilon_k , \tag{3}$$

где μ – параметр (шаг) сходимости адаптивного алгоритма (3).

В данном случае суть адаптации заключается в том, что после завершения процесса перестройки вектор весовых коэффициентов оптимизируется таким образом, что среднеквадратическая ошибка $E[\varepsilon_k^2]$ становится равной своему минимальному значению, которое зависит от заданной относительной средней величины СКО M, которая ограниченна пределами [4]

$$0 < M < 1. \tag{4}$$

Для устойчивой работы алгоритма (3) должно выполняться условие

$$\mu < \frac{M}{E[g_k^2]L}, \tag{5}$$

где $E[g_k^2]$ – средняя мощность сигнала g_k.

В отличие от традиционных принципов автоматического управления в данной структуре, как и в системах [4–6], не используется физическая отрицательная обратная связь между выходом объекта и входом системы. Ее роль играет функциональная обратная связь, замыкающаяся через адаптивный процесс.

Из приведенного алгоритмического описания видно, что управление по принципу адаптивного обратного моделирования не требует знания математической модели объекта, так как управляющее воздействие формируется только на основе информации о текущих значениях сигналов g_k и ε_k.

Процедура синтеза адаптивной системы сводится к выбору параметров АОМ и ЭМ. Как показано в [4], для этого достаточно иметь лишь некоторую априорную информацию о динамических свойствах НО, например о форме его переходной характеристики и /или о времени ее установления $t_{уст}$. Тогда алгоритм синтеза системы включает следующие действия:

1) задание шага (интервала) T дискретизации сигналов по времени из условия

$$T_{алг} \le T \le (0{,}01 \div 0{,}001)\, t_{уст}, \tag{6}$$

где $T_{алг}$ – ориентировочное время обработки информации в управляющем компьютере и преобразователях ЦАП/АЦП;

2) выбор эталонной модели системы ЭМ. Это может быть динамическое звено любого вида, однако практика показала, что во многих случаях хорошие результаты получаются при использовании в качестве ЭМ апериодического звена первого порядка с передаточной функцией

$$W_{эт}(s) = \frac{X_{эт}(p)}{G(p)} = \frac{K_{эт}}{T_{эт}p + 1}, \tag{7}$$

где $K_{эт}$ – желаемый коэффициент передачи системы, а $T_{эт}$ – постоянная времени, которая задается соотношением

$$T_{эт} \le t_{уст} / 4; \tag{8}$$

3) задание величины желаемой относительной ошибки адаптации системы M (4);

4) выбор параметров АОМ L и μ из условия (5), в котором в качестве средней мощности входного сигнала системы $E[g_k^2]$ используется ее предельно допустимое по условиям эксплуатации значение.

Слабым местом предлагаемой методики синтеза является отсутствие возможности теоретической оценки верхнего предела параметра M, соответствующего границе устойчивости системы, поэтому расчетные параметры должны уточняться в процессе ее функционирования.

Для оценки возможностей предлагаемых алгоритмов управления упругомассовыми объектами авторами выполнено исследование адаптивной системы управления НО, в качестве которого использована имитационная модель двухмассового электропривода [3], достаточно корректно отражающая упругие свойства системы «электродвигатель – рабочий орган». Ее представление в форме передаточных функций имеет вид

$$W_1(p) = \frac{\Omega_1(p)}{U(p)} = \frac{2506p^2 + 984.6p + 62660.5}{p^4 + 52.4p^3 + 2718p^2 + 8575p + 61157},$$
$$W_2(p) = \frac{\Omega_2(p)}{U(p)} = \frac{984.7\text{ p} + 62660.5}{p^4 + 52.4p^3 + 2718p^2 + 8575p + 61157}, \tag{9}$$

где $U(p)$ – управляющее напряжение, $\Omega_1(p)$ и $\Omega_2(p)$ – угловые скорости ротора двигателя и рабочего органа соответственно, т.е. выходные сигналы объекта.

Переходные характеристики объекта, полученные по передаточным функциям (9) в пакете MATLAB, показаны на рис. 2.

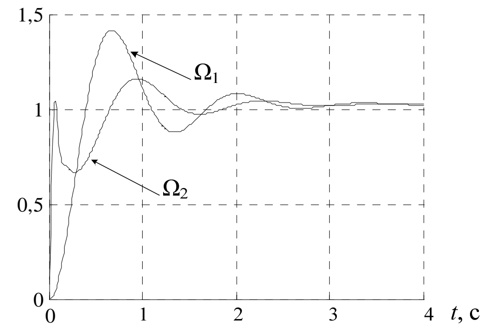

Рис. 2. Угловые скорости электродвигателя $\Omega_1(t)$ *и рабочего органа* $\Omega_2(t)$ *при* $u(t) = 1$ *В*

По характеристикам определены время установления переходных процессов: по каналу $U \to \Omega_1$ $t_{\text{уст}1}$ =1,63 С, по каналу $U \to \Omega_2$ $t_{\text{уст}2}$ = 2,104 С. Из графиков видно, что оба процесса представляют собой затухающие колебания со значительным перерегулированием: для Ω_1 σ_1 = 13 %, для Ω_2 σ_2 =38 %.

Как сказано выше, рассматриваемая управляющая структура гарантирует адаптивную минимизацию среднеквадратической ошибки управления неизвестным объектом $E[\varepsilon_k^2]$ = min. Однако во многих случаях для качественной работы промышленных электроприводов этого недостаточно. Требуется также

а) обеспечить подавление колебаний как в электродвигателе, так и в рабочем органе управляемого объекта;

б) обеспечить время регулирования процессов $\Omega_1(t)$ и $\Omega_2(t)$ в системе, отвечающее условиям $t_{\text{рег}1} \le t_{\text{уст}1}$ и $t_{\text{рег}2} \le t_{\text{уст}2}$.

Ниже приводятся некоторые результаты моделирования в пакете MATLAB процессов в адаптивной системе управления двухмассовым электроприводом при постоянном нормированном задающем воздействии g_k = 1 и нулевом моменте сопротивления нагрузки $M_{\text{с}}$ = 0. Число коэффициентов АОМ L = 1. Параметры эталонной модели $K_{\text{эт}}$ = 1; $T_{\text{эт}}$ = 0,52.

Получены два семейства временных характеристик:

1) при $M = var$, $T = const$;
2) $T = var$, $M = const$.

Их анализ позволил выявить следующие закономерности.

В первом случае моделирование системы показало, что при малых значениях *M* колебания в объекте практически полностью подавляются, но при этом затягиваются процессы регулирования в системе. С увеличением показателя *M* быстродействие и точность системы повышаются до тех пор, пока величина *M* не станет равной оптимальному для данного объекта значению; при дальнейшем увеличении этого параметра возрастает колебательность процессов, и система переходит в неустойчивый режим.

Во втором случае моделирования выявлено, что шаг дискретизации сигналов по времени оказывает существенное влияние на свойства системы: при малых значениях *T* процессы неустойчивы; увеличение шага дискретизации приводит к уменьшению колебательности и затягиванию переходных процессов.

На рис. 3–4 показаны графики зависимости показателей качества переходных процессов $t_{\text{рег}1}(M)$, $t_{\text{рег}2}(M)$ и $\text{СКО}(M)$ при фиксированном значении $T = 0{,}004$ С и графики зависимости $t_{\text{рег}1}(T)$, $t_{\text{рег}2}(T)$ и $\text{СКО}(T)$ при $M = 0{,}0035$.

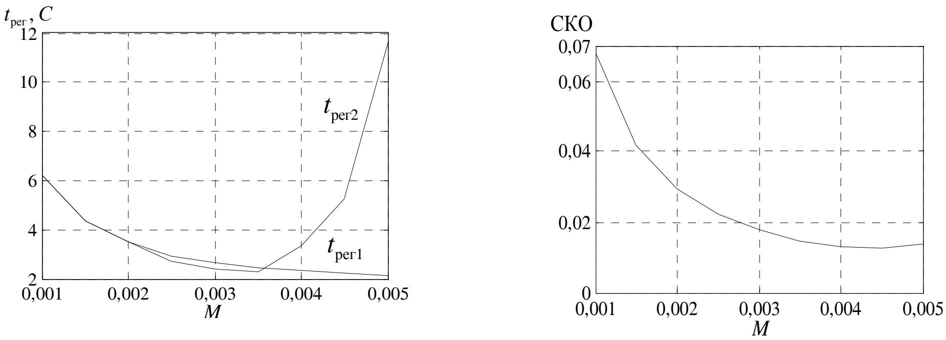

Рис. 3. Зависимости времени регулирования по каналам Ω_1 и Ω_2 и величины СКО от значений М при Т =0,004 С

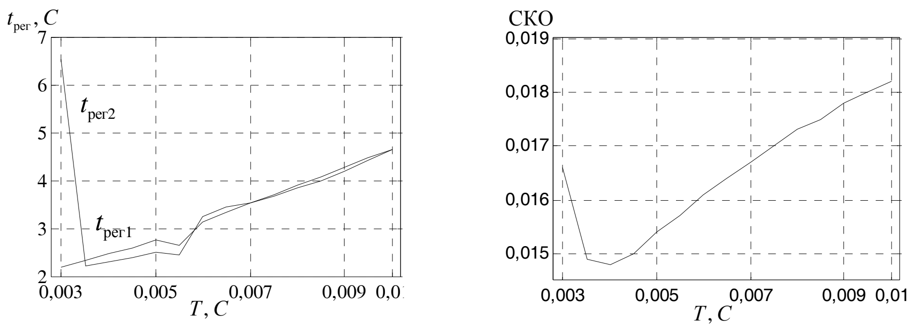

Рис. 4. Зависимости времени регулирования по каналам Ω_1 и Ω_2 и величины СКО от значений Т при М = 0,0035

Из графиков видно, что частичного или полного выполнения требований, предъявляемых к качеству управления рассматриваемым объектом, можно добиться путем соответствующего выбора параметров *M* и *T*. Для обобщения этого вывода целесообразно использовать отношение параметров M/T^*, где $T^* = T/t_{\text{уст}2}$ – масштабированное значение шага дискретизации. На рис. 5 показаны графики зависимости величин СКО и σ_2 от соотношений M/T^*, которые иллюстрируют это положение.

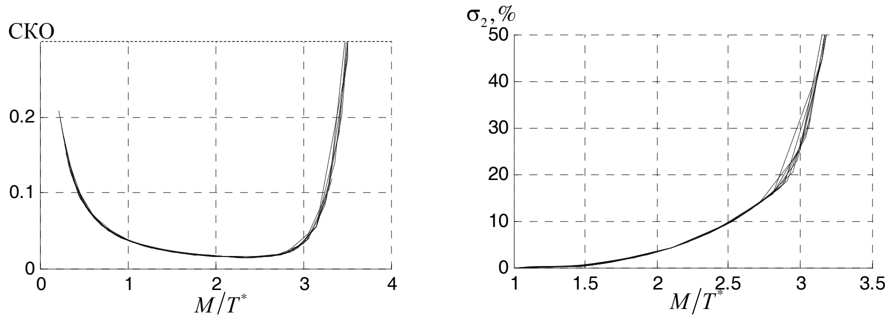

Рис. 5. Зависимость величин СКО и σ_2 *от значений* M/T^*

Переходные процессы в адаптивной системе управления при оптимальных значениях параметров M и T показаны на рис. 6. В этом случае величина $M/T^* = 1{,}84$ находится в области минимальных значений на рис. 5, а показатели качества системы принимают следующие значения: $t_{\text{рег}2} = 2{,}3\,C$, $\sigma_2 = 2{,}2\,\%$.

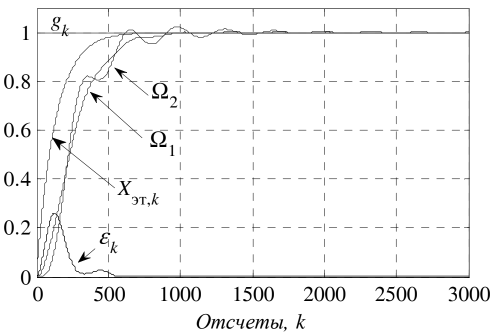

Рис. 6. Процессы в адаптивной системе при оптимальных значениях параметров M = 0,0035 и T = 0,004 С

Полученные в работе результаты позволяют заключить, что метод адаптивного обратного моделирования может успешно применяться в задачах управления упругомассовыми объектами с неопределенными математическими моделями.

Разработанный способ формализации процедуры синтеза адаптивного регулятора обеспечивает минимизацию СКО системы и практически полное подавление колебаний на выходе рабочего органа объекта. Однако, поскольку имитационное моделирование адаптивной системы проводилось только для конкретного объекта, данный вывод не может претендовать на общность, и его подтверждение требует дальнейших исследований.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. *Борцов Ю.А., Соколовский Г.Г.* Автоматизированный электропривод с упругими связями. – СПб.: Энергоатомиздат, 1992.
2. *Тарарыкин С.В., Копылова Л.Г., Тютиков В.В.* Особенности управления состоянием электромеханических систем при ограниченной мощности исполнительных устройств // Мехатроника, автоматизация, управление. – 2007. – № 6.
3. *Гудкова Н.В., Чуйков В.М.* Синтез упругомассовых систем управления по желаемой переходной характеристике // Современная электроника. – 2011. – № 3.
4. *Гудкова Н.В.* Цифровое управление техническими объектами с применением адаптивного обратного моделирования // Автоматизация и современные технологии. – 2006. – № 4.

5. *Widrow B., Walach E.* Adaptive Inverse Control // A Signal Processing Approach, Wiley, Hoboken, NJ, 2008.
6. *Гудкова Н.В.* Приложение принципов адаптивного моделирования к задачам управления динамическими объектами типа «черный ящик» // Современная электроника. – 2012. – № 8.

Статью рекомендовал к опубликованию д.т.н., профессор Р.А. Нейдорф.

Гудкова Наталья Васильевна – Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего профессионального образования «Южный федеральный университет»; e-mail: tala_gud@rambler.ru; 347928, г. Таганрог, пер. Некрасовский, 44; тел.: 88634371689; кафедра систем автоматического управления; к.т.н.; доцент.

Бесклубова Ксения Валериевна – e-mail: kbesklubova@mail.ru; кафедра систем автоматического управления; магистрант.

Gudkova Natalya Vasilyevna – Federal State-Owned Autonomy Educational Establishment of Higher Vocational Education "Southern Federal University"; e-mail: tala_gud@rambler.ru; 44, Nekrasovskiy, Taganrog, 347928, Russia; phone: +78634371689; the department of automatic control systems; cand. of eng. sc.; associate professor.

Besklubova Ksenia Valeryevna – e-mail: kbesklubova@mail.ru; the department of automatic control systems; magister.

УДК 681.51.01

А.В. Семенов, А.Р. Гайдук

МЕТОД ПОСТРОЕНИЯ ЖЕЛАЕМЫХ ПЕРЕДАТОЧНЫХ ФУНКЦИЙ ДИСКРЕТНЫХ СИСТЕМ С ВЫСОКИМ ПОРЯДКОМ АСТАТИЗМА*

Предложен метод построения желаемых передаточных функций дискретных систем с высоким порядком астатизма на основе стандартных передаточных функций непрерывных систем.

В работе приведены алгебраические условия астатизма, которым должны удовлетворять коэффициенты числителя и знаменателя передаточных функций дискретных систем. На основе этих условий разработан алгоритм модификации передаточных функций дискретных систем-прототипов для достижения требуемого порядка астатизма путем изменения коэффициентов её числителя.

Приведен численный пример построения передаточной функции дискретной системы со вторым порядком астатизма, который показывает эффективность предлагаемого метода.

Астатизм; высокий порядок астатизма; алгебраические условия астатизма; дискретная система; передаточная функция.

A.V. Semenov, A.R. Gaiduk

METHOD OF GENERATION OF DESIRED TRANSFER FUNCTION OF DISCRETE SYSTEMS WITH HIGH-ORDER ASTATICISM

In the paper a method of discrete systems with high-order generation based on standard transfer functions of continuous systems is suggested.

Algebraic astaticism conditions imposed on the coefficients of the numerator and denominator of the transfer functions of discrete systems are showed. Based on algebraic terms of astaticism an algorithm of modification transfer functions of discrete systems prototypes to achieve the desired astaticism order by changing the coefficients of the numerator of its transfer function is obtained.

* Работа выполнена при поддержке РФФИ (грант № 12-08-90050-Бел_а).