ИНФОРМАТИКА

2008 октябрь-декабрь № 4

УДК 681.3

Н.Н. Гурский, Ю.И. Слабко, Р.И. Фурунжиев, А.Л. Хомич

СИНТЕЗ РЕГУЛЯТОРОВ ДЛЯ УПРАВЛЕНИЯ ДВИЖЕНИЕМ МЕХАТРОННЫХ СИСТЕМ

Обсуждаются новый подход и технология синтеза управлений для класса адаптивных систем управления по заданным критериям в общем случае, когда и динамическая система, и критерий являются нелинейными. В качестве критерия рассматриваются заданные свойства движения выходной переменной системы.

Введение

Бурное развитие и широкое внедрение встроенных систем управления стимулируют развитие теории адаптивного управления. Другими факторами, вызывающими это развитие, являются неуклонное усложнение задач автоматического управления и повышение требований к качеству управления. Адаптивные алгоритмы управления имеют в современных условиях весьма большое значение. Они позволяют снизить требования к точности математического описания управляемых процессов, упростить процесс проектирования систем управления, уменьшить сроки наладки и испытаний, снизить требования к допускам на некоторую часть аппаратуры, сократить необходимую номенклатуру средств автоматизации.

Класс адаптивных систем управления, как и почти все другие классы технических систем, не имеет строгих границ. Практически все обычные системы с обратной связью сохраняют работоспособность при некоторых изменениях параметров управляемого объекта, а также воплощают некоторое приближение к оптимальным системам в смысле качества переходных процессов. Еще в большей мере это относится к системам с переменной структурой, некоторым видам релейных и линейных систем. Однако нецелесообразно все эти виды систем и соответствующих им алгоритмов относить к классу адаптивных систем и алгоритмов. К классу адаптивных следует относить лишь системы с высокоразвитой способностью приспособления к изменению свойств объекта управления и внешней среды, нуждающиеся в минимальной априорной информации о свойствах объекта и окружающей среды. Таким образом, адаптивные оптимальные алгоритмы обеспечивают наилучший в смысле некоторого критерия качества результат в условиях неполного знания свойств объекта (процесса) и воздействий окружающей среды. Возможность автоматического приспособления к непредвиденным изменениям условий является наиболее характерной чертой адаптивных алгоритмов.

Задача создания адаптивных алгоритмов и систем управления представляется настолько важной, что почти все направления современной теории управления ставят перед собой эту задачу, однако большинство направлений не дает практически эффективных решений.

1. Методы синтеза алгоритмов управления

Адаптивные алгоритмы оптимального управления могут воплощать разные принципы адаптации и иметь разную структуру. В работе [1] синтезируются адаптивные алгоритмы оптимального и субоптимального управления и оценивания (фильтрации), основанные на текущей идентификации контролируемого процесса. Текущая идентификация контролируемого процесса заключается в непрерывном определении параметров этого процесса на основе обработки выходных и входных сигналов.

Адаптивные алгоритмы, использующие высокоточную текущую идентификацию, способны обеспечить адаптацию в весьма широких диапазонах изменения свойств управляемых процессов. Универсальный алгоритм представляет собой комплекс взаимосвязанных алгоритмов оценивания (фильтрации), идентификации и собственно управления. Все эти алгоритмы могут создаваться на различной основе, включая чисто интуитивную, эвристическую. Действительно, первые алгоритмы идентификации, предложенные еще в 1950-х гг., имели эвристическое происхождение.

Эффективным путем создания алгоритмов управления является подход, называемый обратной задачей динамики систем. Существенный вклад в теорию и практику решения обратных задач внесли А.С. Галиуллин [2], П.Д. Крутько [3], Р.И. Фурунжиев [4, 5] и др. В фундаментальных работах А.С. Галиуллина начиная с 1960 г. приведены возможные варианты постановки обратных задач динамики и предложены методы решения задач, основанные на построении соответствующих уравнений движения, на обращении известных методов аналитической механики. Им поставлены и решены задачи аналитического построения устойчивых систем и систем программного движения, задачи управления движениями твердого тела в пространстве и др.

В работах П.Д. Крутько [3] рассматривается алгоритм, в соответствии с которым производная управляющей функции пропорциональна рассогласованию между заданными и фактическими значениями ускорений управляемой переменной. В результате в управлении всегда содержится интегрирующее звено со всеми присущими ему достоинствами и недостатками. Производные высоких порядков в алгоритме П.Д. Крутько не используются. В регуляторе Р.И. Фурунжиева [4, 5] при управлении в каждый момент времени присутствуют желаемые и фактичекие ускорения управляемой переменной и их производные (в общем случае до второй производной). В то же время присутствие интегрирующего звена не является обязательным. Собственно, в работе [5] предложен унифицированный цифровой регулятор нового поколения, реализующий идеи решения обратных задач динамики управляемых систем в общем случае.

2. Общая формулировка задачи

Задачи синтеза регуляторов для управления свойствами движения многоопорных машин удобно формулировать и решать как обратные задачи динамики управляемых систем. При этом представляется возможным синтезировать алгоритмы управления как для линейных, так и нелинейных систем исходя из заданных свойств движения системы.

Пусть свойства движения управляемой системы, состояние которой определяется вектором обобщенных координат $x=(x_1,..., x_n)^T$ и вектором обобщенных скоростей $\dot{x}=(\dot{x}_1,..., \dot{x}_n)^T$, заданы в виде многообразия

$$\Omega:\ w_\mu(\dot{x}, x, t)=c_\mu,\ \mu=\overline{1, m}\le n, \tag{1}$$

где $w_\mu(.)$ – некоторые заданные операторы; c_μ – константы, некоторые из которых могут быть равны нулю; t – время.

Требуется построить уравнения движения рассматриваемой системы по заданному многообразию свойств движения (1) так, чтобы (1) являлось первыми ($c_\mu \ne 0$) или частными ($c_\mu = 0$) интегралами этих уравнений движения. Из построенных уравнений определяются затем искомые управляющие функции, допускающие движение системы с заданными свойствами (1).

В прикладных задачах уравнения движения управляемой системы известны с точностью до искомых управляющих функций. В этом случае требуется лишь определить неизвестные управляющие функции, необходимые для обеспечения движения системы с заданными свойствами.

В общем случае уравнения движения системы заданы оператором

$$F(\dot{x}, x, u, t)=0, \tag{2}$$

где $F(.)$ – оператор.

В частном случае, когда динамика системы может быть описана обыкновенными дифференциальными уравнениями, вместо (2) рассматривается уравнение в векторной форме:

$$\left.\begin{aligned} &\dot{x} = F(x, u, t); \\ &t \geq t_0 : \; x(t_0) = x_0, \end{aligned}\right\} \tag{3}$$

где $F = (F_1, ..., F_n)^T$ – вектор-функция правых частей; $x_0 = (x_{01}, ..., x_{0n})^T$ – вектор начального состояния системы.

Заданы желаемые свойства движения системы в виде многообразия (1) и уравнения движения системы в виде (3) с точностью до неизвестных управляющих функций $u = (u_1, ..., u_m)^T$. Требуется построить регулятор, обеспечивающий на движениях системы (3) желаемые свойства движения (1).

3. Алгоритмы управления

Рассмотрим уравнение движения управляемого процесса в виде дифференциального уравнения второго порядка, заданного с точностью до управления u:

$$\left.\begin{aligned} &\ddot{x} = F(\dot{x},\ x,\ u); \\ &t \geq t_0 : x(t_0) = x_0, \dot{x}(t_0) = \dot{x}_0, \end{aligned}\right\} \tag{4}$$

где $F(.)$ – некоторый известный оператор, в общем случае нелинейный; $x_0, \dot{x}_0$ – заданные начальные условия.

Пусть далее желаемые свойства движения выходной переменной $x(t)$ заданы дифференциальным уравнением второго порядка:

$$\ddot{x} = f(\overline{x},\ \dot{x},\ x), \tag{5}$$

где $f(.)$ – заданная функция, в общем случае нелинейная; $\overline{x}$ – командная величина выходной (управляемой) переменной. Начальные условия для (5) соответствуют начальным условиям системы (4).

В линейном варианте

$$f(.) = \beta_0(\overline{x} - x) - \beta_1 \dot{x}, \tag{6}$$

где $\beta_0 = \omega_0{}^2$; $\beta_1 = 2\psi\omega_0$; ω_0, ψ – константы. В этом случае уравнение эталонного движения (5) примет вид

$$\ddot{x} + 2\psi\omega_0\dot{x} + \omega_0^2 x = \omega_0^2 \overline{x}. \tag{7}$$

Предполагая, что ускорение выходной переменной $F(\dot{x},\ x,\ u)$ (в технических системах эквивалентно силе) в каждый момент времени t однозначно определяется значением управляющей функции u, а также значениями переменных $x(t)$ и $\dot{x}(t)$, можно указать такое $u^*(t)$, при котором

$$F(\dot{x},\ x,\ u^*) = f(\overline{x}, x, \dot{x}). \tag{8}$$

Для определения управляющей функции $u^*(t)$ необходимо решить уравнение (8).

В случае, когда функции $F(.)$ и $f(.)$ являются нелинейными, уравнение (8) можно решить алгоритмически.

Пусть функция $F(\dot{x},\ x,\ u)$ такова, что при всех возможных значениях ее аргументов частная производная по u не меняет знака, например $\partial F(\dot{x},\ x,\ u)/\partial u > 0$. Это означает, что $F(\dot{x},\ x,\ u)$ является монотонно возрастающей функцией по u при любых значениях x и $\dot{x}$.

В таком случае приближенное решение нелинейного уравнения (8) можно получить с помощью алгоритма

$$u(t) = k\int_0^t \left[f(\overline{x}, x, \dot{x}) - F(x, \dot{x}, u) \right] dt \qquad (k > 0)$$

или в иной форме:

$$\dot{u}(t) = k\left[f(\overline{x}, x, \dot{x}) - F(x, \dot{x}, u) \right]. \tag{9}$$

При $t \to \infty$ (для постоянных значений $x = const,\ \dot{x} = const$) и любом $k > 0$ из (9) следуют предельные соотношения:

$$u(t) \to u^*, \quad F(x, \overline{x}, u(t)) \to f(\overline{x}, x, \dot{x}).$$

Этот факт является следствием того, что стационарное решение уравнения

$$\frac{du}{dt} + kF(x, \overline{x}, u(t)) = kf(\overline{x}, x, \dot{x}), \tag{10}$$

соответствующего (10), устойчиво независимо от значений $x, \dot{x}$, если только выполняется условие постоянства знака частной производной: $\partial F(\dot{x},\ x,\ u) / \partial u > 0$.

Представим управляющую функцию (9) в виде

$$\dot{u} = k\left[f(\overline{x},\ x,\ \dot{x}) - \ddot{x} \right]. \tag{11}$$

Интегрируя (11), получим

$$u = k\int f(\overline{x}, x, \dot{x})\, dt - k(\dot{x} - \dot{x}_0), \tag{12}$$

где k – константа, $k > 0$.

С учетом выражения (6) управляющая функция (12) примет вид

$$u = k\left[\beta_0 \int (\overline{x} - x) dt - \beta_1 (x - x_0) - (\dot{x} - \dot{x}_0) \right]. \tag{13}$$

При нулевых начальных условиях из (13) получим

$$u = k\left[\beta_0 \int (\overline{x} - x) dt - \beta_1 x - \dot{x} \right]. \tag{14}$$

Входящие в выражение (14) константы β_0 и β_1 выступают в качестве весовых коэффициентов. С другой стороны, нетрудно назначить их значения исходя из желаемых свойств движения (5) управляемой системы.

Управляющая функция ПИД-регулятора в непрерывной форме имеет вид

$$u(t) = K_p \left(\varepsilon(t) + \frac{1}{T_i} \int_0^t \varepsilon(\tau) d\tau + T_d \frac{d\varepsilon(t)}{dt} \right), \tag{15}$$

где K_p – коэффициент усиления регулятора; T_i, T_d – постоянные времени интегратора и дифференциатора соответственно; $\varepsilon(t)$ – ошибка (рассогласование).

Алгоритм (15) может быть записан в параллельной форме:

$$u(t) = K_p \varepsilon(t) + K_i \int_0^t \varepsilon(\tau) d\tau + K_d \frac{d\varepsilon(t)}{dt}, \tag{16}$$

где $K_i = \dfrac{K_p}{T_i}$, $K_d = K_p T_d$.

Из выражения (14) видно, что при $t \to \infty$ управление стремится к величине $k\beta_l \bar{x}$, которая в стационарном режиме повышает устойчивость системы к флуктуациям. Заметим, что для ПИД-регулятора при $t \to \infty$ в соответствии с выражением (16) управление стремится к нулю. Этим объясняется тот факт, что в стационарном режиме ПИД-регулятор не обеспечивает устойчивость системы. Последнее обстоятельство является существенным недостатком классических регуляторов типа ПИД. В связи с изложенным предпринимаются всевозможные усилия для придания регулятору свойства адаптивности. Совершенствования алгоритмов управления системами состоит в построении управляющих функций, использующих нелинейные критерии и ускорение управляемой переменной.

Рассмотрим для уравнений (4) и (5) управляющую функцию вида

$$u = k\left[f(\bar{x},\ x,\ \dot{x},\ t) - \ddot{x} \right]. \tag{17}$$

В этом случае управляющая функция пропорциональна рассогласованию между фактической и эталонной величинами второй производной выходной переменной системы.

Частный алгоритм адаптивного управления, полученный на основе концепций обратных задач динамики систем [5], имеет вид

$$u(\bar{x}, x, \dot{x}, \ddot{x}, f, z, \dot{z}) = \Phi_0 \left\{ k_0 z + \left[\Phi_1(f) + \Phi_2(x, \dot{x}, \ddot{x}) + \Phi_3(z,\ \dot{z}) \right] \right\}, \tag{18}$$

где $\Phi_j(.)$ – известные операторы, $j = 0,...,3$; z – выходная переменная силового исполнительного механизма; k_0 – константа, характеризующая эффективность отрицательной обратной связи по выходной переменной исполнительного механизма.

В алгоритме (18) используется информация о производных выходной переменной более высокого порядка по сравнению с алгоритмами (16) и (17). Кроме того, используется информация о состоянии исполнительного привода, а также отрицательная обратная связь по выходной переменной исполнительного механизма силового привода.

В качестве примера применения алгоритмов управления приведены результаты компьютерного моделирования торможения легкового автомобиля на покрытии «лед» с начальной скоростью движения $\upsilon_0 = 40$ км/ч (11,11 м/с) без антиблокировочной системы (АБС) нового поколения (рис. 1) и с АБС нового поколения, использующей алгоритм управления (18) (рис. 2). Из рис. 1 видно, что тормозной путь автомобиля без АБС составил 56,89 м, установившееся замедление составило 1,1 м/с^2. Из рис. 2 видно, что тормозной путь автомобиля с АБС нового поколения, использующей описанный выше алгоритм управления, составил 34,81 м и сократился на 22,09 м. Это на 40 % меньше, чем при торможении без АБС. Установившееся замедление составило 1,8 м/с^2, при этом продольные коэффициенты скольжения колес находились в «устойчивой» области кривой «коэффициент сцепления-скольжения» и составляли $18 \div 20$ % скольжения колеса, обеспечивая максимум коэффициента сцепления в продольном направлении.

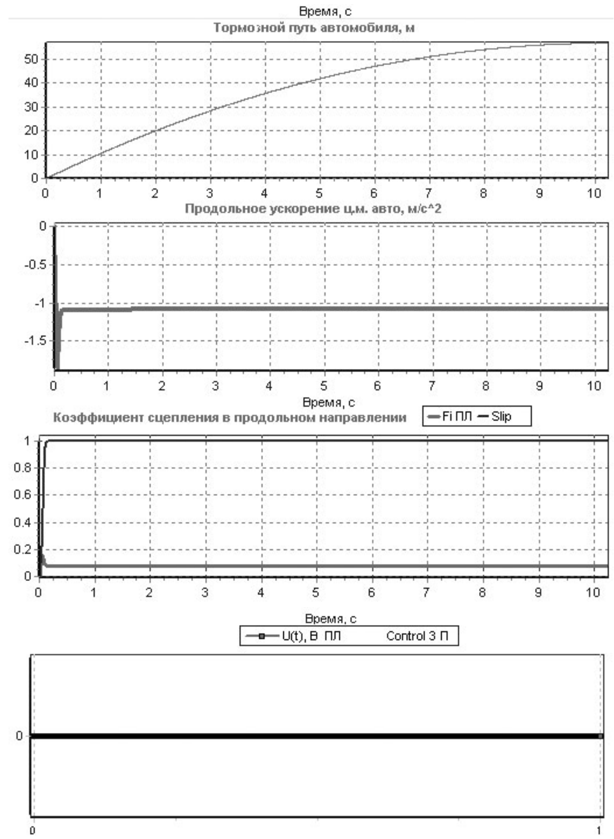

Рис. 1. Переходные процессы при торможении транспортного средства без АБС

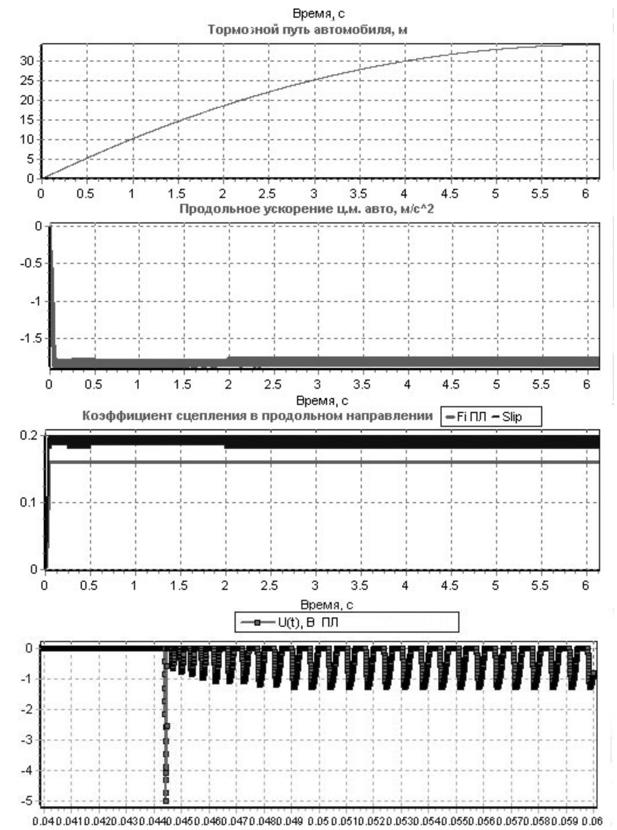

Рис. 2. Переходные процессы при торможении транспортного средства с АБС нового поколения. Быстродействие двухпозиционного модулятора $t_M = 50$ мкс

Заключение

Существующий разрыв в проектировании аппаратных и программных средств можно преодолеть, используя концепцию решения обратных задач динамики и результаты работ [4, 5]. Новая технология синтеза алгоритмов компьютерного управления позволяет строить эффективные алгоритмы, изначально ориентированные на компьютерную реализацию. При этом, как правило, представляется возможным, исходя из желаемых свойств управляемой системы, получить в замкнутом виде регуляторы, связывающие предписанные свойства движения, параметры управляемого объекта и силового исполнительного привода.

Список литература

1. Красовский, А.А. Универсальные алгоритмы управления непрерывными процессами / А.А. Красовский, В.Н. Буков, В.С. Шендрик. – М. : Наука, 1977. – 272 с.

2. Галиуллин, А.С. Методы решения обратных задач динамики / А.С. Галиуллин. – М. : Наука, 1986. – 224 с.

3. Крутько, П.Д. Обратные задачи динамики управляемых систем: нелинейные модели / П.Д. Крутько. – М. : Наука, 1988. – 328 с.

4. Способ Фурунжиева управления движением транспортного средства : пат. 5182 Респ. Беларусь, МПК7 B 60K 41/00 / Р.И. Фурунжиев ; заявитель Р.И. Фурунжиев. – № а 19990225 ; заявл. 1999.03.10 ; опубл. 30.06.2003 // Афіцыйны бюл. / Нац. цэнтр інтэлектуал. уласнасці. – 2003. – № 2. – С. 129.

5. Регулятор Фурунжиева : пат. 3160 Респ. Беларусь, МПК6 G 05B 11/00 / Р.И. Фурунжиев ; заявитель Р.И. Фурунжиев. – № а 960195 ; заявл. 1996.04.19 ; опубл. 30.12.1999 // Афіцыйны бюл. / Нац. цэнтр інтэлектуал. уласнасці. – 1999. – № 4. – С. 175.

6. Способ и регулятор для управления системами : пат. № 2153697 РФ, МПК7 G 05B 17/00 / Р.И. Фурунжиев ; заявитель Р.И. Фурунжиев. – № а 97107392/09 ; заявл. 24.04.1997 ; опубл. 27.07.2000 // Изобретения. Полезные модели / Рос. агентство по патентам и товарным знакам. – 2000. – № 21. – С. 547.

Поступила 25.04.08

Белорусский национальный
технический университет,
Минск, пр. Независимости, 65
e-mail: yulij@tut.by

N.N. Hurski, Y.I. Slabko, R.I. Fourounjiev, A.L. Homich

SYNTHESIS OF REGULATORS FOR CONTROLLING MOVEMNT OF MECHATRONIC SYSTEMS

The paper discusses a new approach and technology of synthesis of the control for a class of adaptive control systems using generalized criteria when both the control criteria and the dynamic system itself are nonlinear. The moving properties specified with the help of the output variable of the system are used as the criterion.