

ПРОДУКЦИОННЫЙ МЕТОД СИНТЕЗА РЕГУЛЯТОРОВ СИСТЕМ УПРАВЛЕНИЯ НЕПРЕРЫВНО-ДИСКРЕТНЫМИ ОБЪЕКТАМИ

Г.Н. Рогачев

Самарский государственный технический университет
443100, г. Самара, ул. Молодогвардейская, 244

E-mail: grogachev@mail.ru

Решена задача синтеза совокупности правил работы регулятора системы управления непрерывно-дискретным объектом. Для этой цели использовалась численно-аналитическая процедура, основанная на совместном применении методов конечномерной оптимизации для определения условной части каждого из правил как логического выражения темпоральной логики и базирующаяся на достаточных условиях оптимальности аналитической процедуры поиска на каждом из временных интервалов закона управления с полной обратной связью.

Ключевые слова: гибридная система, непрерывно-дискретная система управления, совокупность правил работы регулятора.

Одним из важных направлений современного развития теории управления является исследование гибридных непрерывно-дискретных систем управления (ГНДСУ). В таких системах компоненты с непрерывными сигналами отражают физические законы, технологические или технические принципы, которым подчинено функционирование объектов управления, а дискретные элементы моделируют работу цифровых устройств управления. Различные классы гибридных систем изучались в работах Емельянова С.В., Уткина В.И. (системы с переменной структурой); Васильева С.Н., Федосова Е.А. (логико-динамические системы); Куржанского А.Б., Цыпкина Я.З., Li Z., Silva G.N., Soh Y., Vinter R.V., Wen C. (импульсные системы); Аграчева А.А., Савкина А.В., Antsaklis P.J., Brockett R.W., Evans R.J., Hedlund S., Liberzon D., Rantzer A., Rischel H. (переключательные системы); Hespanha J.P., Johansson K.H., Lygeros J., Sastry S.S., Tomlin C.J. (автономные и неавтономные гибридные системы).

Задачи управления применительно к гибридным системам оказываются качественно более сложными по сравнению с аналогичными задачами управления непрерывными или дискретными системами ввиду целого ряда принципиальных особенностей этих систем, связанных с наличием в них существенным образом взаимодействующих непрерывных и дискретных подсистем, сочетанием непрерывной динамики управляемых процессов с дискретными процедурами получения информации о параметрах объекта, вычисления по этим данным управляющих воздействий и передачи их на исполнительные устройства. Ситуация усугубляется необходимостью учета эффекта квантования сигналов в гибридных системах управления как по времени, так и по уровню, влияния различных возмущающих факторов на качество их работы. Так, в реальных системах управления передача управляющего воздействия может происходить с меняющимися по случайному закону временными задержками и потерей части информации. На входные и выходные сигналы накладывается шу-

новая составляющая. Эти эффекты особенно присущи распределенным сетевым системам управления.

К гибридным относится широкий круг управляемых объектов, охватывающий как традиционные, так и новейшие технологии в самых различных областях техники. Практическая реализация таких технологий с требуемыми качественными показателями невозможна без построения соответствующих алгоритмов автоматического управления, что и явилось главным стимулом к созданию теории и методов управления гибридными системами. Программа фундаментальных научных исследований Российской академии наук относит к числу первоочередных исследований в области теории систем вопрос создания общей теории управления сложными техническими и другими динамическими системами, в том числе единой теории управления, вычислений и сетевых связей. Научный семинар ИПУ РАН «К единой теории управления, вычислений и связи» (3 апреля 2008 г.) констатировал, что движение к единой теории управления, вычислений и связи ($\text{Control} + \text{Communication} + \text{Computation} = C^3$) – важная тенденция, обусловленная запросами практики и осознанная мировым научным сообществом. Группа ведущих ученых в коммюнике [1] «Future Directions in Control in an Information-Rich World» («Грядущие изменения в управлении в информационном обществе») определяет стратегию развития теории и практики управления техническими системами. Среди основных задач – создание технических устройств, самостоятельно генерирующих программное обеспечение своих систем управления и при необходимости модернизирующих его, автоматический синтез алгоритмов управления с одновременными их верификацией и валидацией.

Указанные проблемы могут быть решены путем разработки новых эффективных и реализуемых на практике методов решения задач управления как рассматриваемых в качестве задачи организации на цифровом регуляторе необходимых вычислительных процедур с учетом особенностей, привносимых цифровым характером устройств управления и сетевым способом обмена информацией между ними. В том числе оказываются необходимыми новые способы синтеза оптимальных по принятым критериям эффективности алгоритмов и программ работы цифровых устройств управления для непрерывно-дискретных систем, учета различных возмущающих факторов и ресурсных ограничений, характерных для цифровых и сетевых систем управления. Такие методы позволят повысить эффективность процесса разработки автоматических регуляторов за счет исключения промежуточных этапов и гарантировать техническую реализуемость получаемого в виде псевдокода закона управления.

В работе [2] рассмотрена численно-аналитическая процедура оптимального синтеза процедурной модели регулятора в виде совокупности правил его работы, основанная на совместном использовании методов конечномерной оптимизации для определения количества правил и поиска условной части каждого из них как логического выражения темпоральной логики и базирующейся на достаточных условиях оптимальности аналитической процедуры поиска на каждом из временных интервалов закона управления с полной обратной связью (части «действие» каждого из правил).

В настоящей работе эта процедура используется для решения ряда новых задач управления совокупностью линейных дифференциальных и разностных уравнений вида

$$\begin{aligned}\dot{x}(t) &= A(t)x(t) + B(t)u(t) + F(t)y(t_k), t_k \leq t < t_{k+1}, \\ y(t_{k+1}) &= C_{k+1}y(t_k) + D_{k+1}v(t_{k+1}) + G_{k+1}x(t_{k+1}), k = 0, 1, \dots, N-1,\end{aligned}$$

где x, y – векторы состояния непрерывной и дискретной частей системы соответственно, $x \in R^n, y \in R^m$;

u, v – векторы управления непрерывной и дискретной частями соответственно, $u \in U \subseteq R^q, v \in V \subseteq R^s$;

U и V – заданные множества допустимых значений управления;

t – время, $t \in T = [t_0, t_N)$;

T – промежуток времени функционирования системы, на котором выделены моменты $t_k, k = 0, 1, \dots, N-1$, разбивающие множество T на непересекающиеся подинтервалы

$$T_k = [t_k, t_{k+1}), k = 0, 1, \dots, N-1.$$

Так, рассматривалась задача оптимального управления ГНДСУ вида

$$\dot{x}(t) = y(t_k) + u(t), t \in T_k, x(0) = 1,$$

$$y(t_{k+1}) = x(t_{k+1}) + v(t_{k+1}), y(0) = 1, k = 0, 1;$$

$$x \in R; u \in R, y \in R; v \in R, t \in T = [0, 2);$$

$$\text{критерий качества } I = \frac{1}{2} \sum_{k=0}^1 \left[\int_{t_k}^{t_{k+1}} u^2(t) dt + v^2(t_{k+1}) \right] + \frac{1}{2} [x^2(2) + y^2(2)] \rightarrow \min.$$

Известно [3] решение этой задачи при наличии одной степени свободы регулятора, когда условием $t \in T = [0, 2), T_0 = [0, 1), T_1 = [1, 2), N = 2, t_0 = 0, t_1 = 1, t_2 = 2$ заданы количество правил системы продукций и часть «если» каждого правила. Это – оптимальное управление $(u^*(t, x, y), v^*(t, x, y))$ с полной обратной связью. Система продукций регулятора в этом случае (вариант № 1) имеет вид

$$\text{«если } t \in T_0, \text{ то } u = \frac{3x - 3yt + 3y}{3t - 5}, v = -0.75x \text{»};$$

$$\text{«если } t \in T_1, \text{ то } u = \frac{3x - 3yt + 6y}{3t - 8}, v = -0.5x \text{»}.$$

Возможность использовать вторую степень свободы регулятора позволяет изменять часть «если» правила его работы. Этим в рассмотрение включаются варианты неравномерного во времени срабатывания регулятора (аритмия). Найдено решение задачи при наличии двух степеней свободы регулятора. Установлено, что такая логика его работы приводит к улучшению качества управления в широком диапазоне начальных условий. Количество правил задано и по-прежнему равно двум, часть «если» каждого правила определяет неравномерность срабатывания регулятора, далее часть «то» каждого правила подлежит определению посредством описанной ранее процедуры.

Вариант № 2: $t \in T = [0, 2), T_0 = [0, 1.5), T_1 = [1.5, 2), N = 2, t_0 = 0, t_1 = 1.5, t_2 = 2$. Система продукций регулятора имеет вид

$$\text{«если } t \in T_0, \text{ то } u = 260000 \frac{0.85xt - 1.8x - 0.85xt^2 + 3.1yt - 2.7y}{(560t - 1200)(400t - 840)}, v = -0.529x \text{»},$$

$$\text{«если } t \in T_1, \text{ то } u = \frac{3x - 3yt + 6y}{3t - 8}, v = -0.5x \text{»}.$$

Вариант № 3: $t \in T = [0, 2), T_0 = [0, 0.5), T_1 = [0.5, 2), N = 2, t_0 = 0, t_1 = 0.5, t_2 = 2$. Система продукций регулятора имеет вид

$$\text{«если } t \in T_0, \text{ то } u = 84000 \frac{-0.38xt + 0.46x - 0.38xt^2 + 0.65yt - 0.23y}{(220t - 270)(140t - 170)}, v = -0.85x \text{»},$$

$$\text{«если } t \in T_1, \text{ то } u = \frac{3x - 3yt + 6y}{3t - 8}, v = -0.5x \text{»}.$$

Результаты анализа качества работы регуляторов с полученными системами продукции представлены на рис. 1. На этих графиках более светлые участки отображают область изменения начальных условий, при которых указанный вариант алгоритма превосходит другие. Как видно из приведенных результатов, наименьшую область предпочтительности имеет вариант № 1, характеризующийся равномерным режимом срабатываний регулятора, наибольшую – вариант № 3.

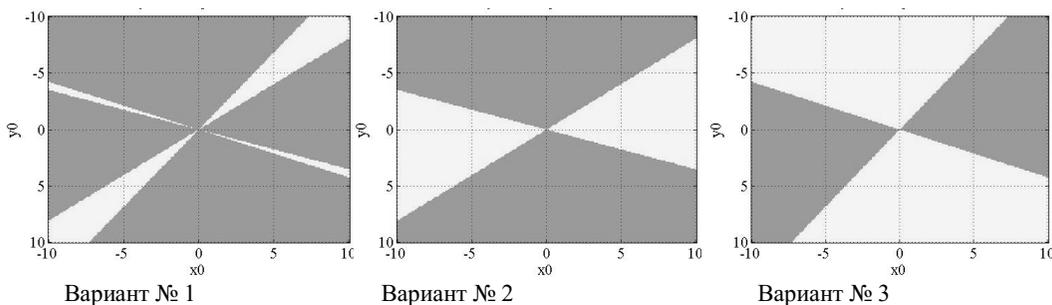


Рис. 1. Область предпочтительности вариантов № 1, № 2, № 3

Далее рассматривалась задача оптимального синтеза цифрового программного регулятора линейным непрерывным объектом второго порядка. Требуется перевести ГНДСУ вида

$$\dot{x}_1 = -x_1 + x_2;$$

$$\dot{x}_2 = -x_2 + y(t_k);$$

$$y(t_{k+1}) = v(t_{k+1}),$$

где $x_1 \in R, x_2 \in R, u \in R, y \in R; v \in R, t \in T = [0,3), T_i = [i-1, i), i = 1, 2, \dots, 6,$

$$x_1(0) = x_{10}, x_2(0) = x_{20}, y(0) = 0,$$

в малую окрестность начала координат, при этом евклидова норма вектора управляющих воздействий должна быть минимальной,

$$I = \frac{1}{2} \sum_{k=2}^5 [x_1^2(t_{k+1}) + x_2^2(t_{k+1})] + \frac{1}{2} \sum_{k=0}^5 \frac{1}{100} v^2(t_{k+1}) \rightarrow \min.$$

Сравнивались два варианта решения: с одной степенью свободы регулятора при равномерном шаге и с двумя степенями свободы регулятора при аритмическом регуляторе с неравномерным и определяемым в процессе поиска шаге его срабатывания. Оптимальное значение функционала равно

$$I_{\text{ОПТ1}} = (1.45x_{10}^2 + 7.07x_{10}x_{20} + 8.91x_{20}^2)/10000$$

$$\text{и } I_{\text{ОПТ2}} = (0.772x_{10}^2 + 3.44x_{10}x_{20} + 4.11x_{20}^2)/10000 \text{ соответственно.}$$

Анализ полученных решений показал, что квадратичная форма $(1.45x_{10}^2 + 7.07x_{10}x_{20} + 8.91x_{20}^2)/10000 - 1.878(0.772x_{10}^2 + 3.44x_{10}x_{20} + 4.11x_{20}^2)/10000$ является положительно полуопределенной, т. е. качество управления по второму сценарию, даже умноженное на коэффициент 1.878, не хуже качества управления по

первому сценарию при том же самом времени достижения малой окрестности начала координат (3 с). Так, при нулевом значении $x_{20} = 0$ качество управления по второму сценарию лучше в $1.47/.772 = 1.904$ раза.

Кроме того, был выявлен эффект уменьшения необходимого количества правил работы регулятора при его аритмической работе. При наличии двух степеней свободы регулятора поставленная задача фактически решается за два такта срабатывания регулятора вместо трех (рис. 2, 3).

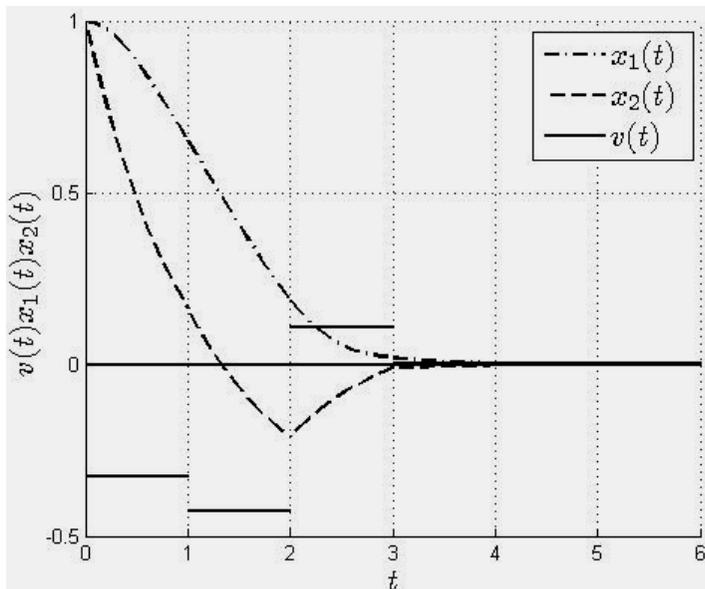


Рис. 2. Поведение ГНДСУ с ритмическим регулятором

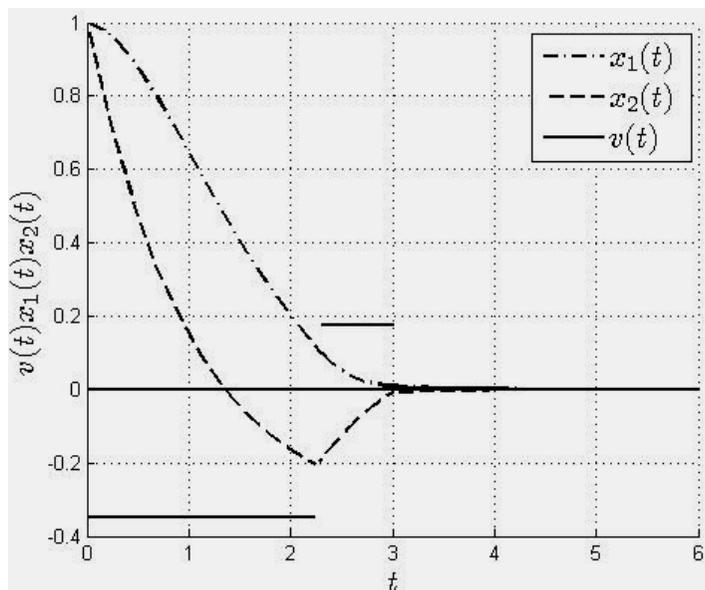


Рис. 3. Поведение ГНДСУ с аритмическим регулятором

Таким образом, рассмотренная численно-аналитическая процедура оптимального синтеза процедурной модели регулятора позволяет решать задачи синтеза закона управления линейными объектами, оптимального по квадратичному критерию качества. Однако попытка использовать его для решения более широкого круга задач сопряжена с рядом проблем, подчас трудноразрешимых. Так, затруднен синтез системы производств регулятора, управляющего нелинейным объектом. Причина – невозможность установления в этом случае аналитического выражения для функции Беллмана. Определенные трудности представляет синтез системы производств регулятора при наличии ограничений на фазовые переменные и управляющие воздействия. Частично снять эти проблемы можно при использовании альтернативных вариантов, например эволюционных вычислений как стохастического метода глобальной оптимизации [4].

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Murray R.M. [et al.] Future Directions in Control in an Information-Rich World // IEEE Control Systems Magazine. – 2003. – Vol. 23, No. 2. – PP. 20-33.
2. Rogachev G.N., Egorov V.A. Численно-аналитическая процедура оптимального синтеза гибридных систем // Вестник Самарского государственного технического университета. Серия: Технические науки, 2010. – № 7. – С. 32-38.
3. Пантелеев А.В., Бортакровский А.С. Теория управления в примерах и задачах. – М.: Высшая школа, 2003. – 583 с.
4. Rogachev G.N. Использование генетического алгоритма с отсечением по времени в задаче синтеза программного регулятора для машины Дубинса // Вестник Самарского государственного технического университета. Серия: Технические науки, 2011. – № 3. – С. 27-33.

Статья поступила в редакцию 20 декабря 2012 г.

PRODUCTION SYNTHESIS METHOD OF CONTROLLERS FOR CONTINUOUS-DISCRETE OBJECTS

G.N. Rogachev

Samara State Technical University
244, Molodogvardeyskaya st., Samara, 443100

The problem of controller design for continuous-discrete object is solved. A set of rules of the regulator is synthesized. Numerical-analytical procedure is used for this purpose. It is based on the joint application of finite-dimensional optimization methods for the determination of the conditional part of each of the rules as a logical expression of temporal logic and on sufficient optimality conditions for the analytical procedure of searching for each of time intervals of the control law with full feedback.

Keywords: *hybrid system, continuous-discrete control system, a set of the regulator's rules.*