

**А.А. ШИЛИН**, кандидат техн. наук  
**В.Г. БУКРЕЕВ**, доктор техн. наук, профессор  
E-mail: shilin@tpu.ru  
(Национальный исследовательский Томский  
политехнический университет)  
Томск, Российская Федерация

**ОПТИМАЛЬНОЕ УПРАВЛЕНИЕ  
ДИНАМИЧЕСКИМ ОБЪЕКТОМ  
НА ОСНОВЕ АППРОКСИМАЦИИ  
ПАРАМЕТРОВ РЕЛЕЙНОГО РЕГУЛЯТОРА**

Возможности современных программируемых логических контроллеров позволяют реализовать дифференциальные уравнения метода управления, где возможно включение программно-логических решений. В статье предложено направление развитие метода управления на релейном элементе с обратной связью. Отмечены свойства оптимального и робастного управления рассматриваемого метода, которые подтверждены результатами моделирования. Поставлена задача оптимального управления по быстродействию объектом второго порядка в рамках рассматриваемого метода. Предложена модификация метода, где параметры определяются состоянием объекта, которые обеспечивают оптимальное управление. В качестве альтернативы поиску аналитической зависимости параметров предложена аппроксимация отображения параметров и состояния объекта в параметры регулирования. Приведены результаты моделирования, подтверждающие оптимальное управление с помощью аппроксимирующих функций. Полученный алгоритм управления реализован на контроллере. Приведены результаты эксперимента на действующей системе. Предложенные метод можно рекомендовать для управления динамическими объектами, которые могут быть представлены математической моделью второго порядка с астатизмом.

*КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА:* релейное управление, скользящий режим, оптимальное управление по быстродействию, аппроксимация, теплообменные системы

**A.A. SHILIN**, Candidate of Techn. Sciences  
**V.G. BUKREEV**, Doctor of Techn. Sciences, Professor  
E-mail: shilin@tpu.ru  
(National Research Tomsk Polytechnic University)  
Tomsk, Russian Federation

**OPTIMAL CONTROL OF DYNAMIC  
OBJECT BASED ON THE APPROXIMATION  
OF THE PARAMETERS  
OF THE RELAY CONTROLLER**

The capabilities of modern programmable logic controllers allow to implement the differential equations of management methods. It makes possible to include software and logic solutions. The article suggested the direction of the development of the control method on the relay element with feedback. The properties of optimal and robust control of this method are confirmed by the results of simulation. The research considered the task of time-optimal control for the object of second order with help of this method. The article describes the modification of the method, when the optimal control parameters are determined by the state of the object. As an alternative for finding of the analytic dependence of the parameters, we propose approximation of displaying the parameters and the state of the object into the control parameters. Simulation results confirm the optimal control by means of approximate functions. The considered control algorithm is implemented in the programmable controller. The article contains the results of experiments on the existing system. The proposed method is recommended for the control of dynamic objects that can be represented by a mathematical model of the second order with astaticism.

*KEYWORDS:* relay control, sliding mode, time-optimal control, approximation, heat exchange system.

## ВВЕДЕНИЕ

Значительное количество промышленных объектов с запаздыванием [1] в канале формирования управляющего сигнала можно представить математической моделью второго порядка:

$$\begin{cases} \dot{x}_1 = x_2 \\ \dot{x}_2 = -h(x) \cdot x_2 + g(x) \cdot u(t - \tau_z) \end{cases} \quad (1)$$

где  $x_1, x_2$  – переменные состояния объекта управления;  $h(x)$  и  $g(x)$  – положительные нелинейные функции, отражающие параметры объекта;  $u(t - \tau_z)$  – управляющее воздействие;  $\tau_z$  – величина запаздывания.

В качестве регулятора системы управления для данного класса объектов можно использовать трехпозиционный релейный элемент [2], охваченный обратной связью:

$$\begin{cases} u = \eta(x_3 - x_1 \cdot \delta) \\ \dot{x}_3 = \begin{cases} -a_3 \cdot x_3, & \text{если } u = 0, \\ -k_3 \cdot u, & \text{если } u \neq 0 \end{cases} \end{cases} \quad (2)$$

где  $x_3$  – дополнительная переменная состояния, описывающая обратную связь.

Функция  $u = \eta(\bullet)$  релейного элемента имеет характеристики нечувствительности и гистерезиса. Для оценки значений параметров  $a_3$  и  $k_3$  можно использовать подход к синтезу релейного регулятора, рассмотренный в монографии [1]. При этом использование программируемого логического контроллера (ПЛК) в качестве релейного элемента с обратной связью значительно расширяет возможности релейного регулятора и позволяет расширить его функциональные возможности. Следует отметить определенные особенности такого релейного регулятора на ПЛК:

- дополнительная переменная состояния обратной связи  $x_3$  может иметь разрывы первого рода;
- значения параметров  $a_3$  и  $k_3$  обратной связи могут изменяться в течение переходного процесса и определяться как математическими, так и логическими выражениями;
- поведение обратной связи релейного элемента задается программным образом.

## ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

Рассмотрим условия оптимального по быстродействию релейного управления объектом вида (1) с изменяющимися параметрами  $h(x)$  и  $g(x)$  на некотором интервале значений. Для практического использования методологии синтеза предлагаемого релейного регулятора целесообразно получить инструменты настройки регулятора (2) по кривой разгона [3], подобно широко распространенным модификациям метода Зиглера-Никольса [4], а также для систем с запаздыванием [5].

## ОПРЕДЕЛЕНИЕ ОПТИМАЛЬНОГО УПРАВЛЕНИЯ ПО БЫСТРОДЕЙСТВИЮ

Рассмотрим следующее утверждение, которое позволяет предположить о наличии свойств робастности рассматриваемого релейного регулятора.

**Утверждение.** Для объекта вида (1) с учетом стационарности функций  $g$ ,  $h$  и известного начального состояния  $\{x_1(t_0) = C_1 \in (C_{\min}, C_{\max}); x_2 = 0\}$  возможно организовать оптимальное по быстродействию управление [6], соответствующее принципу максимума Понтрягина, при вариациях параметра  $k_3$  в течение переходного процесса.

**Доказательство** основано на теореме [6] о количестве переключений управляющего воздействия для устойчивого объекта второго порядка, в соответствии с которой обеспечивается оптимальное управление двумя разно-полярными воздействиями. Покажем решение замкнутой системы управления объекта (1) и регулятора (2) в виде переходных процессов на рисунке 1. Согласно, организованной программным образом, отрицательной

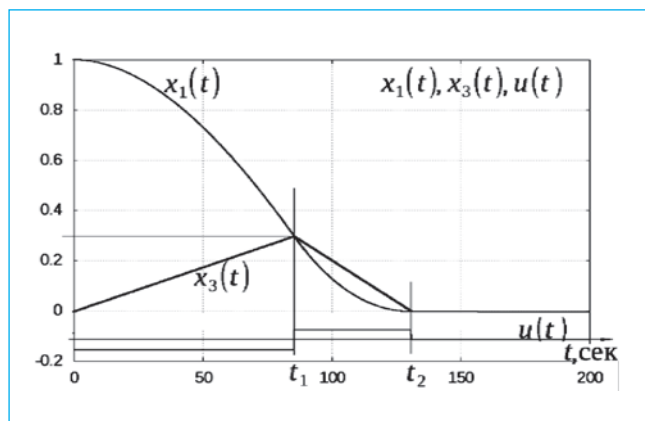


РИС. 1  
Оптимальный по быстродействию переходный процесс

обратной связи релейного элемента траектория переменной  $x_3$  всегда стремится к траектории переменной  $x_1$ .

Скорость изменения переменной  $x_3$  определяется функцией  $k_3(x, u)$ , обеспечивающая пересечение переменных  $x_1$  и  $x_3$  в точке переключения оптимального управления по быстродействию. В частности, для заданного начального состояния ( $x_1 = 1, x_2 = 0$ ) объекта управления функция  $k_3(x, u)$  равна абсолютному значению тангенсов углов между фазовой траекторией и осью времени для двух случаев, определяемых знаком произведения  $x_1$  и  $u - \text{sign}(x_1 \cdot u)$ . Очевидно, задача решается для любого начального положения ( $x_1 = x_1(t_0), x_2 = 0$ ) и алгоритм определения положения фазового состояния объекта управления на оси  $x_1$  весьма прост: это момент времени, когда переменная  $x_1$  достигла максимального отклонения от точки равновесия.

## РОБАСТНЫЕ СВОЙСТВА РЕЛЕЙНОГО РЕГУЛЯТОРА

При использовании в качестве релейной функции более сложной зависимости:

$$\eta(x, \delta) = \begin{cases} \text{sign}(x) & , \text{если } x > \delta \\ 0 & , \text{если } (x \cdot x_{-1}) < 0, \\ y_{-1} & , \text{если } (x \cdot x_{-1}) > 0 \end{cases} \quad (3)$$

управление нестационарным объектом будет напоминать скользящий режим [7], организованный одной из пар сигналов  $(-1, 0)$  или  $(0, +1)$ . Предложенная в работе [8] функция (3) имеет свойство автоматически выбирать нужную пару сигналов. Влияние запаздывания по управлению  $u(t - \tau)$  приводит к возникновению скользящего режима при окончании переходного процесса. На рисунке 2 показаны результаты моделирования, где при окончании переходного процесса наблюдается скользящий режим с парой сигналов  $(-1, 0)$ .

На рисунке 3 показаны результаты моделирования, где значение коэффициента усиления в системе уменьшено в три раза относительно ранее определенных оптимальных параметров.

При значительном несоответствии параметров их оптимальным значениям также обеспечивается устой-

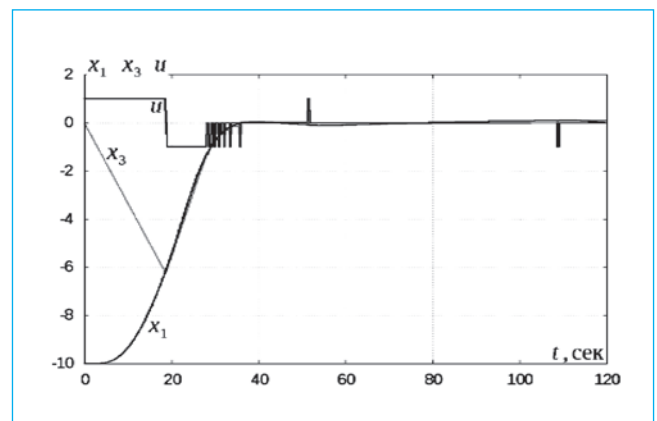
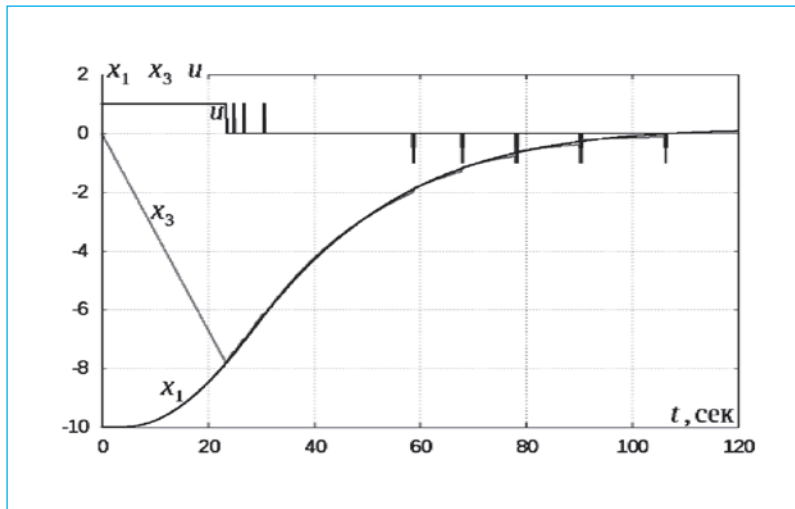
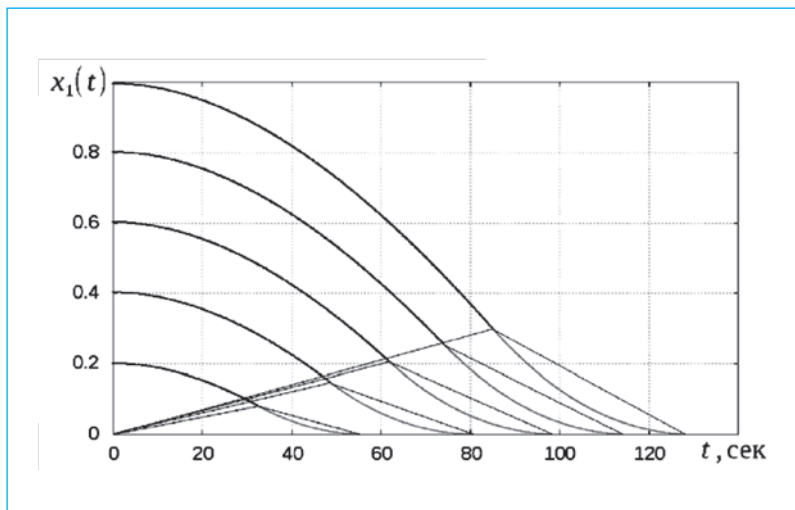


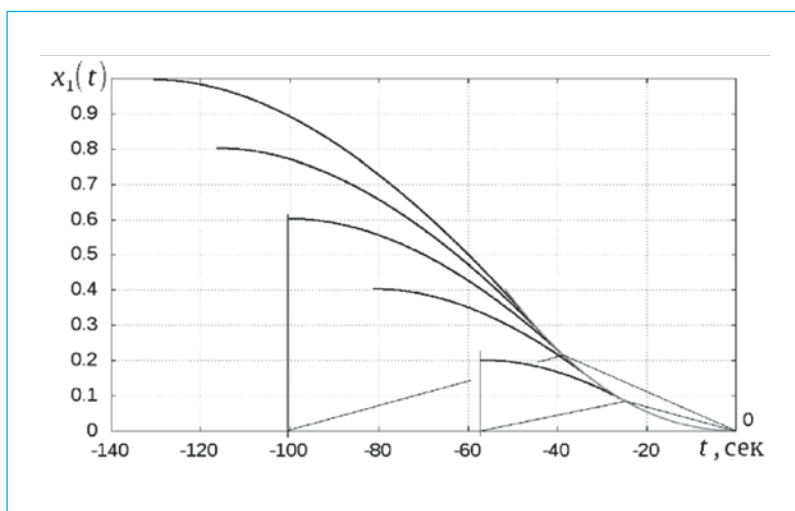
РИС. 2  
Скользящий режим в условиях транспортного запаздывания



**РИС. 3**  
Скользящий режим в условиях уменьшения коэффициента передачи



**РИС. 4**  
Семейство переходных процессов для различных начальных состояний



**РИС. 5**  
Семейство переходных процессов в обратном времени

чивое управление в скользящем режиме. Следовательно, при качественном выборе параметра  $a_3$  можно обеспечить асимптотически устойчивое управление в условиях изменения параметров объекта.

### СИНТЕЗ АППРОКСИМИРУЮЩЕЙ ФУНКЦИИ ДЛЯ ПАРАМЕТРА $k_3$

При рассмотрении оптимальных переходных процессов от других начальных условий  $x_1(t_0) = \{C_1 \in (0.2; 0.4; 0.6; 0.8; 1)\}$  становится очевидно (рис. 4), что скорость изменения переменной  $x_3$  будет определяться не только знаком произведения  $sign(x_1(t) \cdot u(t))$ , но и начальными значениями  $x_1(t_0) = \{C_1 \in (C_{min}, C_{max})\}$ .

Причина возникновения такой зависимости исследовалась авторами статьи в публикации [9]. По результатам анализа процессов для организации оптимального управления по быстродействию предлагается метод подстройки параметра траектории скольжения. Запишем управление (2) с учетом зависимости перенастраиваемого параметра  $k_3$  от начального состояния и знака

$$\begin{cases} u = \eta(x_3 - x_1, \delta) \\ \dot{x}_3 = \begin{cases} -a_3 \cdot x_3 & , \text{если } (u = 0) \\ -u / T_{p1}(C_1) & , \text{если } (\text{sign}(x_1 \cdot u) > 0), \\ -u / T_{p2}(C_1) & , \text{если } (\text{sign}(x_1 \cdot u) < 0) \end{cases} \end{cases} \quad (4)$$

где зависимости  $T_{p1}(C_1)$  и  $T_{p2}(C_1)$  определяются для различных начальных условий из заданного множества  $C_1 \in (C_{min}, C_{max})$ . Алгоритм определения зависимостей можно представить в виде несколько этапов [9]:

- для заданного объекта управления определяются граничные значения  $g = g_{min}$  и  $h = h_{min}$ , для которых синтезируется оптимальное управление;
- вычисляется значение  $C_1$  в результате решения системы дифференциальных уравнений (1) в обратном времени при заданной длительности второго импульса переключения управляющего сигнала методом Фельдбаума, не требующего большого вычислительного ресурса. Примером таких решений является семейство переходных процессов  $x_1(t), x_3(t)$ , представленных на рисунке 5.
- на основании полученных переходных процессов определяются значения  $T_{p1}(C_1)$  и  $T_{p2}(C_1)$ , для которых имеется точка переключения управления.

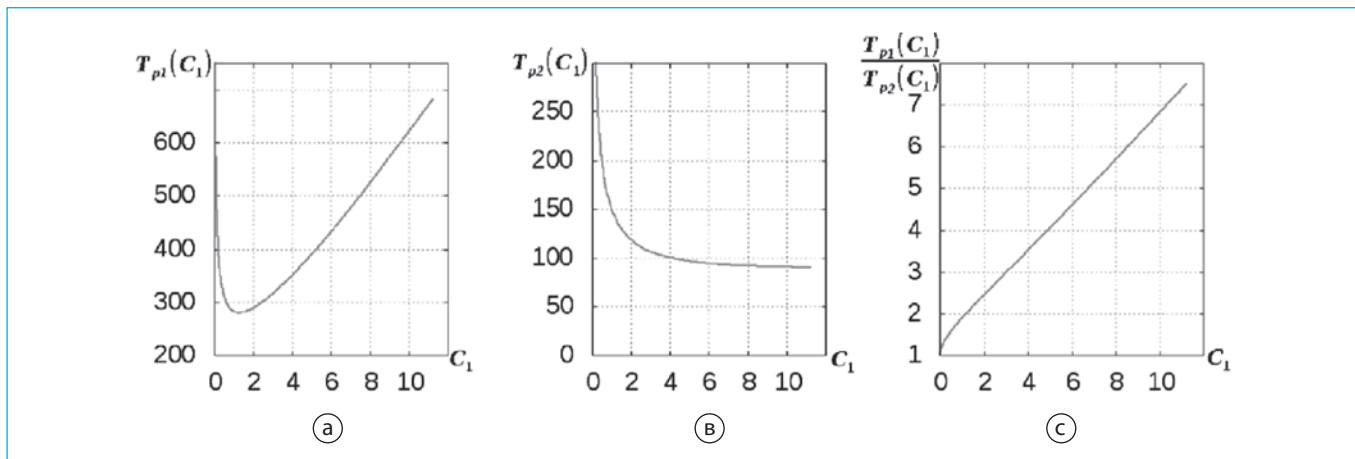


РИС. 6. Зависимость параметров регулирования  $Tr1(C1)$  и  $Tr2(C1)$

Принцип вычисления значений  $T_{p1}(C_1)$  и  $T_{p2}(C_1)$  приведен на рисунке 5 и реализован в виде программы, исходный код которой доступен на [10]. Одним из вариантов приближенного определения  $T_{p1}(C_1)$  и  $T_{p2}(C_1)$  – это аппроксимация данных функций по характерным режимам работы системы, позволяющих сформировать конкретные значения  $C_1$  из множества  $C_1 \in (C_{\min}, C_{\max})$ . Использование интерполяционных полиномов позволяет решить эту задачу (рис. 6).

Отметим, что зависимость  $T_{p2}(C_1)$ , в своей большей части, имеет относительно постоянное значение, поэтому можно предположить инвариантность этого параметра по отношению к состоянию объекта. В свою очередь функция  $T_{p1}(C_1)$  является существенно нелинейной и более сложной, с точки зрения практической реализации, поэтому будет использоваться линейная зависимость соотношения параметров  $T_{p1}/T_{p2}$ . Физический смысл рассмотренных параметров  $T_{p1}$  и  $T_{p2}$  заключается в аналогичном действии, что и коэффициент передачи регулятора, поэтому целесообразно принимать эти параметры как длительность воздействия на объект.

Параметрическая связь объекта и регулятора предполагает вычисление параметров  $T_{p1}(C_1, g, h)$  и

$T_{p2}(C_1, g, h)$  в многомерном пространстве, что значительно усложняет задачу реализации метода регулирования в реальном времени. В этом случае целесообразно применить замену переменных  $z_1 = x_1; z_2 = x_1 - x_2 / h$  и представить объект управления (1) в виде:

$$\begin{cases} \dot{z}_1 = \frac{1}{T_{ob}} \cdot (z_2 - z_1) \\ \dot{z}_2 = \frac{1}{T_{pr}} \cdot u(t) \end{cases}, \quad (5)$$

где  $T_{ob} = h^{-1}; T_{pr} = h \cdot g^{-1}$ .

Далее, в качестве объекта управления рассматривается теплообменная система, в которой исследовались зависимости  $T_{p1}(C_1, T_{ob}, T_{pr}), T_{p2}(C_1, T_{ob}, T_{pr})$  и после анализа значительного количества вычислений для различных равновесных состояний в пространстве  $(C_1, T_{ob}, T_{pr})$  выяснилось, что наблюдается однозначное отображение параметров:  $(C_1, T_{ob}, T_{pr}) \rightarrow (T_{p1}, T_{p2})$ . Для подтверждения этого факта в таблице 1 приведены данные характерных режимов теплообменной системы.

ТАБЛИЦА 1. Результаты вычисления параметров регулятора при фиксированном:  $T_{ob}=100$  сек.

$T_{pr}$ , сек	25	35	50	70	100	140	200	280	400
$C_{max}$ °C	17,97	12,83	8,98	6,42	4,49	3,21	2,25	1,60	1,12
$T_{p2}$ , сек	56,66	79,33	113,3	158,7	226,7	317,3	453,3	634,7	906,7

На основании данных таблицы 1 можно сделать заключение, что зависимости  $C_{max}$  и  $T_{p2}$ , с большой степенью точности, являются линейными. Далее, в

таблице 2 представлен еще один набор значений вычисленных параметров системы при  $T_{ob} = 200$  сек.

ТАБЛИЦА 2. Результаты вычисления параметров регулятора при фиксированном  $T_{ob}=200$  сек.

$T_{pr}$ , сек	50	70	100	140	200	280	400	560	800
$C_{max}$ °C	17,97	12,83	8,98	6,42	4,49	3,21	2,25	1,60	1,12
$T_{p2}$ , сек	113,3	158,7	226,7	317,3	453,3	634,7	906,7	1271	1815

При сравнении значений в данных таблицах можно сделать вывод, что параметр  $C_{max}$  существенно зависит от соотношения параметров объекта  $T_{ob}, T_{pr}$ , в то же время, параметр  $T_{p2}(C_1 = C_{max}, T_{pr})$  определяется

только значением  $T_{pr}$ . В таблице 3 приведены результаты расчетов пространства вдоль среза по значениям  $T_{ob}$ , которые подтверждают инвариантность  $T_{p2}$  к изменениям  $T_{ob}$ .

**ТАБЛИЦА 3.** Результаты вычисления параметров регулятора при фиксированном  $T_{p1}=100$  сек.

$T_{ob}$ , сек	25	35	50	70	100	140	200	280	400
$C_{max}$ , °C	0,76	1,51	2,21	2,98	4,49	6,18	8,87	12,48	17,62
$T_{p2}$ , сек	229,3	227,5	230,3	228,23	226,7	225,6	226,9	225,8	226,0

Анализ результатов вычисления параметров  $T_{p1}$  и  $T_{p2}$  в различных режимах работы системы позволяет сделать заключение о возможности аппроксимации

$$T_{p2}(C_1, T_{ob}, T_{pr})$$

одной нормированной кривой

$$T_{p1} / T_{pr} = f(C_1 / C_{max})$$

график, который представлен на рисунке 6с. В итоге, аппроксимированные зависимости в виде простых соотношений

$$C_{max} = \frac{k_{cmx} \cdot T_{ob}}{T_{pr}}, \frac{T_{p1}}{T_{p2}} = k_{p10} \cdot \frac{C_1}{C_{max}},$$

$$T_{p2}(T_{pr}, C_1 = C_{max}) = (k_{p20} + k_{p21}) \cdot T_{pr}$$

позволяют построить алгоритм расчета параметров регулятора на основе следующих соотношений

$$C_{max} = \frac{k_{cmx} \cdot T_{ob}}{T_{pr}}, k_{cmx} \approx 4.49,$$

$$T_{p2} = \left( k_{p20} + k_{p21} \cdot \frac{C_{max}}{C_1} \right) \cdot T_{pr}, \quad (6)$$

$$T_{p1} = \left( k_{p10} + k_{p11} \cdot \frac{C_1}{C_{max}} \right) \cdot T_{p2}$$

где  $k_{p10}$ ,  $k_{p11}$ ,  $k_{p20}$ ,  $k_{p21}$  – коэффициенты, полученные в процессе аппроксимации.

### РЕАЛИЗАЦИЯ НА ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОМ ПРИМЕРЕ

В качестве примера будем использовать линеаризованную модель действующей теплообменной системы [11] со следующими значениями коэффициентов:

$$T_{pr} = 0.74 \text{ сек}/^\circ\text{C},$$

$$T_{ob} = 30.0 \text{ сек},$$

где время запаздывания сигнала управления не учитывается.

Рассмотрим переходный процесс в системе для начальных состояний:  $C_1 \in (10, 5, 3)$ . Предварительно, в соответствии с (6), выполняется расчет следующих параметров:

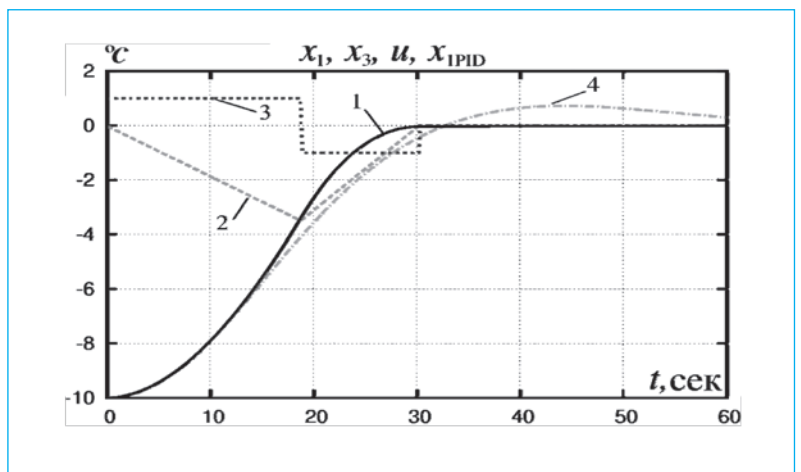
$$C_{max} = \frac{4,49 \cdot 30}{0,74},$$

$$T_{p2} = 2,66 + \frac{7,68}{C_1}, \quad (7)$$

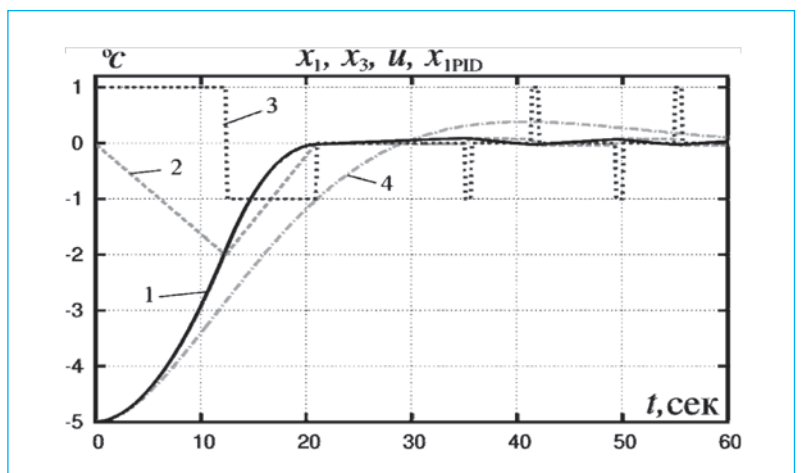
$$T_{p1} = (1,28 + 0,036 \cdot C_1) \cdot T_{p2},$$

На этом этапе для объекта (5) можно записать уравнения для вычисления управления (4), где параметры регулятора определяются параметрами объекта с использованием отображения (7).

Результаты решений системы дифференциальных уравнений для различных начальных условий представлены в виде переходных процессов на рисунки 7,8,9. Приняты следующие обозначения линий: сплошная линия  $x_1(t)$  (1); штрихованная  $x_3(t)$  (2); пунктирная  $u(t)$  (3); штрих-пунктирная  $x_{1PID}(t)$  (4) – переходный процесс, полученный для сравнения при использовании настроенного ПИД регулятора методом решения уравнения Риккати для полно-наблюдаемой системы.



**РИС. 7.** Переходные процессы с начальными условиями  $x_1 = -10^\circ\text{C}$   $x_3 = 0$



**РИС. 8.** Переходные процессы с начальными условиями  $x_1 = -5^\circ\text{C}$   $x_3 = 0$



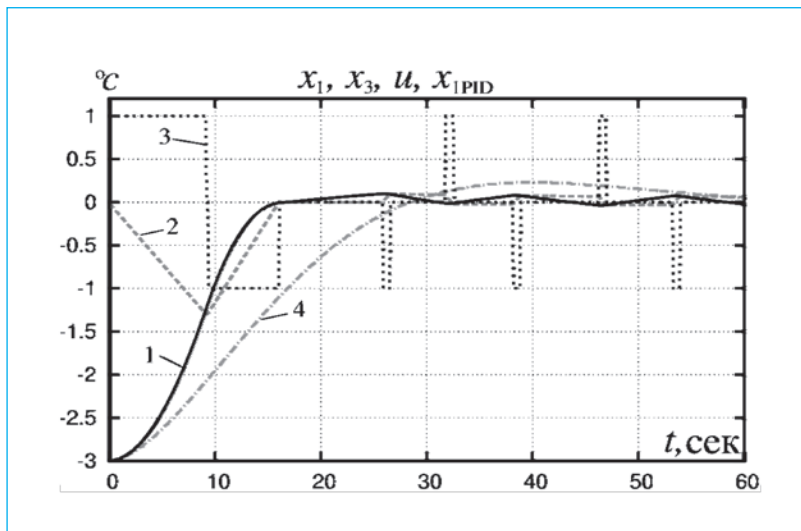


РИС. 9. Переходные процессы с начальными условиями  $x_1 = -3^\circ\text{C}$   $x_3 = 0$

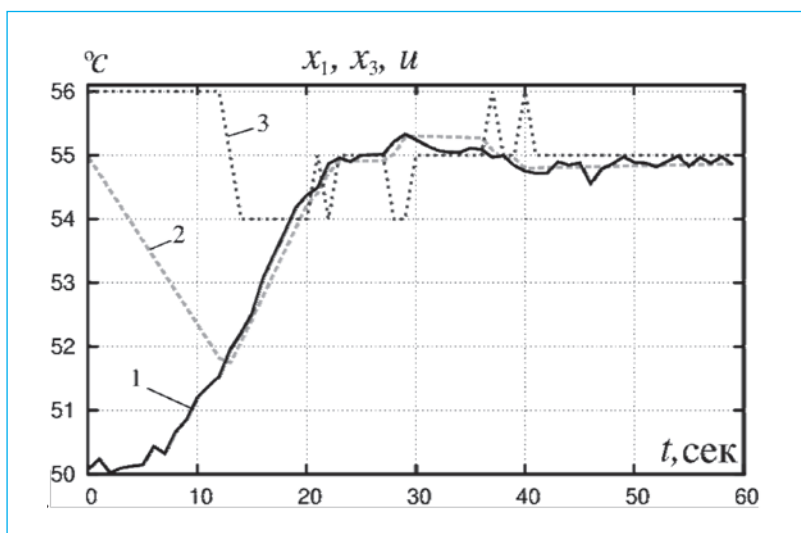


РИС. 10. Переходные процессы действующей системы

В частности, для начального значения  $x_1 = -10^\circ\text{C}$  управление соответствует принципу Максимума, и длительность переходного процесса составляет не более 30 с.

Наличие незначительных автоколебаний объясняется неидеальностью или «интервальной неопределенностью» гистерезисной функции. Переходные процессы при начальных условиях  $x_1 = -5^\circ\text{C}$  и  $x_1 = -3^\circ\text{C}$  отличаются длительностью переходного процесса, однако форма сигнала управления также соответствует решению оптимального управления по принципу максимума.

Таким образом, можно сделать вывод, что отображение параметров  $(C_1, T_{ob}, T_{pr}) \rightarrow (T_{p1}, T_{p2})$  по аппроксимированным формулам (7) для рассмотренного регулятора, представленного в виде (4), гарантирует оптимальный по быстродействию переходный процесс для объекта управления (5) при изменении начальных условий  $x_1 = x_2 = C_1$ ,  $x_3 = 0$ , где  $C_1 \in (0, C_{\max})$ .

Если предположить, что вычисленное отображение параметров (7) выполняется или, по крайней мере, может обеспечить, например, 10% точность вычисления на заданном множестве значений  $(C_1, T_{ob}, T_{pr})$ , то в алгоритм регулятора целесообразно включить это отображение. В таком случае параметрами регулятора можно считать

непосредственно параметры объекта, что очень удобно для настройки регулятора в действующих системах по данным кривой разгона [3]. Параметр  $a_3$  в оптимальном регуляторе для стационарного объекта не влияет на переходный процесс, однако именно он определяет робастные свойства и режим скольжения при изменении параметров объекта.

Эксперимент на действующей теплообменной системе выполнен на контроллере ВЭСТ-01М [14], в котором реализован метод управления (4) и средства сохранения усредненных значений временных рядов  $x_1, x_3, u$ . Результаты отражают присутствие в измеряемой  $x_1$  случайной составляющей и значительные ошибки дискретизации схемы измерения (рис. 10).

При этом качество управления системой практически не изменилось и можно предположить, что метод синтеза оптимального управления (4) имеет необходимый ресурс для организации оптимального управления системами с запаздыванием с помехами в канале измерения.

## Выводы

В статье рассмотрен метод синтеза управления с релейным элементом, охваченным обратной связью (4), эффективно реализуемый на микропроцессорных устройствах. Для данного метода предложена аппроксимация параметров объекта в параметры регулятора (6), что позволяет обеспечить настройку замкнутой системы по экспериментально полученной кривой разгона. Метод обладает робастными свойствами при изменении параметров объекта в определенных пределах (рисунок 3) и не требует оценки производной измеренного сигнала. Для объекта с известными и стационарными параметрами обеспечивается оптимальное управление по быстродействию без вычисления кривой переключения в фазовом пространстве (рис. 7, 8, 9). В случае транспортного запаздывания рассматриваемый релейный регулятор формирует квази-оптимальное управление со скольжащим режимом (рис. 2).

Метод реализован на недорогом 8-разрядном процессоре с 10 разрядным АЦП на контроллере ВЭСТ-01М [12] и успешно используется более чем на 500 объектах в системах управления температурой в теплообменных системах горячего водоснабжения.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Клюев А.С. и др. *Проектирование систем автоматизации технологических процессов*. М.: Энергоатомиздат. 1990. 464 с.
2. Стефани Е.П. *Основы расчета настройки регуляторов теплоэнергетических процессов*. М.: Энергия. 1972. 376 с.
3. Панько М.А. Выбор математических моделей объекта управления по экспериментальным данным // *Теплоэнергетика*. 2006. №10. С. 20–23
4. Haugen, F., Lie, B. Relaxed Ziegler-Nichols Closed Loop Tuning of PI Controllers. *Modeling, Identification and Control*. Vol. 34, No. 2, 2013. PP. 83–97,
5. DiRuscio, D. On Tuning PI Controls for Integrating Plus Time Delay Systems. *Modeling, Identification and Control*. Vol. 31, No. 4, 2010. PP. 145–164,
6. Пупков К.А. *Методы классической и современной теории автоматического управления. Т.4: Теория оптимальных систем автоматического управления / под ред. К.А. Пупкова и Н.Д.Егупова*. М.:Издательство МГТУ им. Н.Э.Баумана. 2004. 744с.
7. Уткин В.И. *Скользящие режимы и их применение в системах с переменной структурой*. М.: Наука. 1974. 240 с.
8. Шилин А.А., Букреев В.Г. Исследование трехпозиционного релейного регулятора температуры в скользящем режиме работы // *Доклады ТУСУРа*. 2012. № 1 (часть 2). С. 251–257.
9. Шилин А.А., Букреев В.Г. Динамическое определение траектории скольжения при релейном управлении нелинейным объектом // *Проблемы управления*. 2013. № 5. С. 22–28.
10. Шилин А.А. Материалы к статье «Релейное управление нелинейным объектом с программной обратной связью» [Электронный ресурс]. Режим доступа: <http://portal.tpu.ru:7777/SHARED/s/SHILIN/tethiss/Tab4> (дата обращения 23.12.2013).
11. Шилин А.А., Букреев В.Г., Койков К.И. Математическая модель нелинейной теплообменной системы с запаздыванием // *Приборы и системы. Управление, контроль, диагностика*. 2013. № 6. С. 15–22.
12. НПО ВЭСТ *Автоматический регулятор теплопотребления ВЭСТ-01М* [Электронный ресурс]. Режим доступа: <http://npowest.ru/6-instrukcii-po-ekspluatcii-priborov.html> (дата обращения 23.03.2014).
- power regulators setting processes]. М.: Energiya [Moscow: Publishing house «Energy»]. 1972. 376 p.
3. Panko M. A. Vybormatematicheskikhmodeleyobekta upravleniya poeksperimentalnymdannym [Selection of mathematical models of a control object according to the experimental data]. *Teploenergetika* [Combined heat and power]. 2006. №10. PP. 20–23.
4. Haugen, F., Lie, B. Relaxed Ziegler-Nichols Closed Loop Tuning of PI Controllers. *Modeling, Identification and Control*. Vol. 34, No. 2. 2013, PP. 83–97
5. DiRuscio, D. On Tuning PI Controls for Integrating Plus Time Delay Systems. *Modeling, Identification and Control*. Vol. 31, No. 4. 2010. PP. 145–164,
6. Pupkov K.A. *Metody klassicheskoy i sovremennoy teorii avtomaticheskogo upravleniya. T.4: Teoriya optimalnykh sistem avtomaticheskogo upravleniya / pod red. K.A. Pupkova i N.D.Yegupova* [Methods of classical and contemporary theory of automatic control. The theory of optimal automatic control systems]. М.:Izdatelstvo MGTU im. N.E.Baumana [Moscow: Publishing MSTU. N.E.Bauman] 2004. 744p.
7. Utkin V.I. *Skolzyashchie rezhimy i ikh primenenie v sistemakh s peremennoy strukturoy* [Slide modes and their application in systems with variable structure]. М.: Nauka [Moscow: Publishing house «Science»]. 1974, 240 p.
8. Shilin A.A., Bukreev V.G. Issledovanie trekhpozitsionnogo releyynogo regul'yatora temperatury v skolzyashchem rezhime raboty [Investigation of the three-position relay temperature controller in a sliding mode]. *Doklady TUSURa* [Reports of TUSUR]. 2012. № 1 (chast 2). PP. 251–257.
9. Shilin A.A., Bukreev V.G. Dinamicheskoe opredelenie traektorii skolzheniya pri releynom upravlenii nelineynym obektom [Dynamically determine the slide trajectory for relay control nonlinear object]. *Problemy upravleniya* [Management problems] 2013. № 5. PP. 22–28.
10. Shilin A.A. *Materialy k state «Releynoe upravlenie nelineynym obektom s programmnoy obratnoy svyazyu»* [Material to the article «Relay control nonlinear object with software feedback»]. Available at: <http://portal.tpu.ru:7777/SHARED/s/SHILIN/tethiss/Tab4> (data [accessed] 23.12.2013).
11. Shilin A.A., Bukreev V.G., Koykov K.I. Matematicheskaya model nelineynoy teploobmennoy sistemy s zapazdyvaniem [A mathematical model of the nonlinear heat transfer system with delay]. *Pribory i sistemy. Upravlenie, kontrol, diagnostika* [Instruments and Systems. Management, monitoring, diagnostics]. 2013. № 6. PP. 15–22.
12. NPO VEST *Avtomaticheskiiy regul'yator teplopotrebleniya VEST-01M* [A mathematical model of the nonlinear heat transfer system with delay]. Available at: <http://npowest.ru/6-instrukcii-po-ekspluatcii-priborov.html> (data [accessed] 23.03.2014).

## REFERENCES

1. Klyuev A.S. i dr. *Proektirovanie sistem avtomatizatsii tekhnologicheskikh protsessov* [Design process automation systems]. М.: [Moscow: Publishing house «Energoatomizdat»]. 1990. 464 p.
2. Stefani Ye.P. *Osnovy rascheta nastroyki regul'yatorov teploenergeticheskikh protsessov* [Basis of calculation of heat and

## СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

- ШИЛИН АЛЕКСАНДР АНАТОЛЬЕВИЧ,  
кандидат технических наук, доцент  
E-mail: shilin@tpu.ru
- БУКРЕЕВ ВИКТОР ГРИГОРЬЕВИЧ,  
доктор технических наук, профессор  
E-mail: bukreev@tpu.ru  
Национальный исследовательский  
Томский политехнический университет  
634050, Россия, г. Томск, проспект Ленина, дом 30

## INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

- SHILIN ALEKSANDR ANATOLEVICH,  
Candidate of Technical Sciences, Associate Professor  
E-mail: shilin@tpu.ru
- BUKREEV VIKTOR GRIGOREVICH,  
Doctor of Technical Sciences, professor  
E-mail: bukreev@tpu.ru  
National Research Tomsk  
Polytechnic University  
634050, Russia, Tomsk, prospect of Lenina, the house 30