

К ЗАДАЧЕ КОНСТРУИРОВАНИЯ АВТОМАТИЧЕСКОГО РЕГУЛЯТОРА ДЛЯ СТАТИЧЕСКОГО ОБЪЕКТА ПЕРВОГО ПОРЯДКА С ЗАПАЗДЫВАНИЕМ

С.В. Панферов, В.И. Панферов

TO DESIGN TASKS FOR AN AUTOMATIC REGULATOR FOR THE FIRST DEGREE STATIC OBJECTS WITH TIME DELAY

S.V. Panferov, V.I. Panferov

Исследованы устойчивость и качество переходных процессов в системах автоматического регулирования, сконструированных методом эталонной передаточной функции замкнутой системы. Объект управления представляется инерционным звеном первого порядка с запаздыванием. Рассматриваются вариации как параметров настройки регулятора, так и параметров объекта управления.

Ключевые слова: устойчивость, качество переходных процессов, система автоматического регулирования, эталонная передаточная функция.

Investigated the stability and quality of transient processes in automatic regulation systems, designed by a reference transfer function of a closed system. Control object is the inertial part of the first degree with delay. We consider variations of regulator settings and parameters of the managed object.

Keywords: stability, quality of transients, the automatic control system, reference transfer function.

Введение

Широко известно, что наибольшая экономия тепловой энергии в системах теплоснабжения зданий достигается за счет их автоматизации, поэтому разработка вопросов, связанных с проблемой построения высококачественных систем автоматического управления, является вполне актуальной задачей. В настоящее время в промышленности, в том числе и в системах теплоснабжения зданий для автоматического регулирования различных переменных технологических процессов, широко используются ПИД-регуляторы и их частные варианты. Накоплен огромнейший опыт применения таких регуляторов, в частности, разработаны и апробированы различные способы их настройки. Вместе с тем, как неоднократно отмечает В.Я. Ротач в своем сравнительно недавно изданном учебнике [1], П-, PI- и PID- «...алгоритмы были получены чисто эвристическим путем» [1, с. 82 и др.] и что «...достаточно убедительное формальное доказательство целесообразности их применения... до сих пор получить не удалось» [1, с. 24].

В работе [2], как нам представляется, удалось получить некоторое формальное обоснование целесообразности применения ПИД-регуляторов, здесь задача решалась методом «подгонки» передаточной функции замкнутой системы автоматического регулирования к некоторому достаточно разумному и практически достижимому виду. Найдены эталонные структуры и настройки регуляторов для типовых динамических характеристик промышленных объектов управления, при этом установлено, что все эти регуляторы принадлежат ПИД-семейству. Казалось бы, что поставленная цель достигнута, однако для полноты исследования проблемы необходимо рассмотреть вопрос о качестве переходных процессов (ПП) в таких системах и о грубости этих структур и настроек, данная задача и решается в настоящей работе для одного из типовых объектов управления.

Постановка задачи

Рассмотрим вопрос о качестве переходных процессов и о грубости систем автоматического

Панферов Сергей Владимирович – инженер кафедры теплогазоснабжения и вентиляции, Южно-Уральский государственный университет; tgsiv@mail.ru

Панферов Владимир Иванович – д-р техн. наук, профессор, заведующий кафедрой теплогазоснабжения и вентиляции, Южно-Уральский государственный университет; tgsiv@mail.ru

Panferov Sergei Vladimirovich – engineer of the Heat and gas supply and ventilation department of South Ural State University; tgsiv@mail.ru.

Panferov Vladimir Ivanovich – PhD, professor, head of the Heat and gas supply and ventilation department of South Ural State University; tgsiv@mail.ru

регулирования (САР) с объектом управления с передаточной функцией вида

$$W_{об}(p) = \frac{k_{об}}{T_{об}p + 1} \exp(-\tau_{об}p), \quad (1)$$

где $k_{об}$, $T_{об}$, $\tau_{об}$ – соответственно коэффициент передачи, постоянная времени и время запаздывания объекта; p – комплексная переменная. В соответствии с [2] близким к идеальному для такого объекта будет ПИ-регулятор с передаточной функцией

$$W_p(p) = \frac{T_{об}}{k_{об}(\tau_{об} + \theta)} \left[1 + \frac{1}{T_{об}p} \right].$$

Здесь θ – постоянная времени эталонной передаточной функции замкнутой системы

$$W_{зс}(p) = \frac{1}{\theta p + 1} \exp(-\tau_{об}p).$$

Требуется оценить устойчивость САР и качество переходных процессов в ней при вариациях параметров настройки регулятора и параметров объекта управления.

Методика решения задачи

Для анализа переходных процессов в системе с объектом управления данного типа разработаны две компьютерные программы: одна для анализа переходных процессов при возмущении по заданию, а другая – при возмущении со стороны регулирующего органа. В каждой из разработанных программ предусмотрен ввод $k_{об}$, $T_{об}$, $\tau_{об}$, а также коэффициента передачи ПИ-регулятора k_p и времени интегрирования $T_{ин}$, каждая из программ не только осуществляет построение графика переходного процесса, но и определяет перерегулирование σ и время регулирования t_p , а также вычисляет значения критериев:

$$I_1 = \int_0^{t_k} |\varepsilon(t)| dt; \quad (2)$$

$$I_2 = \int_0^{t_k} \varepsilon^2(t) dt, \quad (3)$$

где t_k – конечное время оценки переходного процесса; $\varepsilon(t) = x^3(t) - x(t)$ – ошибка регулирования (расхождение); $x^3(t)$ и $x(t)$ – соответственно заданное и действительное значение регулируемой величины; t – время. При этом время регулирования t_p определялось как время, по истечении которого отклонение регулируемой величины от задания не будет превышать 5 %.

Интегрирование дифференциального уравнения объекта управления осуществлялось методом Рунге–Кутты с погрешностью, пропорциональной пятой степени шага по времени. Для компьютерного использования алгоритм ПИ-регулирования

представляли в дискретной форме, при вычислении интеграла применяли метод трапеций. С целью сокращения объема необходимых вычислений использовали рекуррентную форму дискретного представления алгоритма ПИ-регулирования, приведенную в работе [3]:

$$U(m) = U(m-1) + q_0\varepsilon(m) + q_1\varepsilon(m-1), \quad (4)$$

где m – номер расчетного шага по времени; $q_0 = k_p [1 + h/(2T_{ин})]$; $q_1 = k_p [h/(2T_{ин}) - 1]$; h – величина шага по времени; U – выходная величина регулятора (% хода исполнительного механизма (ИМ)). В программах предусматривается ввод нижнего и верхнего пределов изменения регулирующего воздействия U .

Вариация параметров настройки регулятора

Исследование качества переходных процессов в САР проводилось в окрестности базовых настроек:

$$k_p = \frac{T_{об}}{k_{об}(\tau_{об} + \theta)}; \quad T_{ин} = T_{об},$$

при этом в координатах « $k_p \dots T_{ин}$ » точка с базовыми настройками располагалась в центре прямоугольника, вычисления проводились для настроек, расположенных на диагоналях и на отрезках прямых, соединяющих середины противоположных сторон прямоугольника (рис. 1).

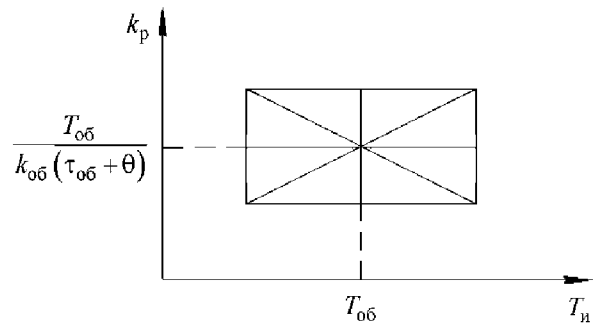


Рис. 1. Исследуемая область параметров настройки регулятора

Сначала параметр θ полагался равным нулю. Пусть, например, $k_{об} = 1,5$ т/ч/% хода ИМ; $T_{об} = 15$ с; $\tau_{об} = 5$ с (параметры объекта управления соответствуют динамическим свойствам канала «расход топлива – тепловая нагрузка» котельной установки [4]). В этом случае базовые значения параметров настройки регулятора равны:

$$k_p = \frac{T_{об}}{k_{об}\tau_{об}} = 2\% \text{ хода ИМ} / \text{т} / \text{ч}; \quad T_{ин} = T_{об} = 15 \text{ с}.$$

Результаты расчетов показателей качества переходных процессов при возмущении по заданию приведены в табл. 1–3.

Как видно из табл. 1–3, в значимой по размерам окрестности базовой точки

$$k_p = \frac{T_{об}}{k_{об}\tau_{об}} = 2\% \text{ хода ИМ} / \text{т} / \text{ч}; \quad T_{ин} = T_{об} = 15 \text{ с}$$

Таблица 1

**Показатели качества переходных процессов при $T_{и} = 15$ с и различных значениях k_p
при возмущении по заданию**

$k_p, \frac{\% \text{ хода ИМ}}{\text{т/ч}}$	1,0	1,5	2,0	2,5	3,0	3,5
$\sigma, \%$	0	0	0	0,79	9,70	∞ (расходящийся ПП)
$t_p, \text{с}$	53,8	49,9	44,6	55,2	130,8	∞
$I_1, (\text{т/ч}) \cdot \text{с}$	24,81	21,49	19,82	18,98	24,18	∞
$I_2, (\text{т/ч})^2 \cdot \text{с}$	17,34	14,71	13,28	12,46	12,51	∞

Таблица 2

**Показатели качества переходных процессов при $k_p = 2$ % хода ИМ/ т/ч и различных значениях $T_{и}$
при возмущении по заданию**

$T_{и}, \text{с}$	5,0	7,0	10,0	13,0	15,0	17,0	20,0
$\sigma, \%$	∞ (расходящийся ПП)	43,38	8,42	0,03	0	0	0
$t_p, \text{с}$	∞	114,1	38,9	40,2	44,6	58,2	68,3
$I_1, (\text{т/ч}) \cdot \text{с}$	∞	25,24	15,04	17,18	19,82	22,44	26,51
$I_2, (\text{т/ч})^2 \cdot \text{с}$	∞	12,47	10,92	12,18	13,28	14,46	16,31

Таблица 3

**Показатели качества переходных процессов при различных значениях k_p и $T_{и}$
при возмущении по заданию**

$k_p, \frac{\% \text{ хода ИМ}}{\text{т/ч}}$	1,0	1,0	1,5	1,5	2,5	2,5	3,0	3,0
$T_{и}, \text{с}$	10,0	20,0	12,5	17,5	12,5	17,5	10,0	20,0
$\sigma, \%$	4,80	0	0	0	5,43	0,01	∞ (расходящийся ПП)	1,99
$t_p, \text{с}$	27,2	80,6	41,2	61,4	55,6	56,9	∞	88,7
$I_1, (\text{т/ч}) \cdot \text{с}$	17,92	33,18	17,91	25,13	17,38	22,02	∞	24,33
$I_2, (\text{т/ч})^2 \cdot \text{с}$	13,86	21,23	13,18	16,34	11,33	13,81	∞	14,67

САР достаточно устойчивая и качество переходных процессов вполне удовлетворительное. Следовательно, можно сделать заключение, что рассматриваемая система достаточно робастная по отношению к настройкам регулятора при возмущении по заданию.

Для всех рассмотренных настроек ПИ-регулятора определили качество переходных процессов и при возмущении по нагрузке (со стороны регулирующего органа), результаты вычислений приведены в табл. 4–6.

Как видно из табл. 4–6, также в значимой по размерам окрестности базовой точки

$$k_p = \frac{T_{об}}{k_{об} \tau_{об}} = 2\% \text{ хода ИМ} / \text{т/ч}; T_{и} = T_{об} = 15 \text{ с}$$

САР достаточно устойчивая и качество переходных процессов вполне удовлетворительное и при возмущении по нагрузке. Следовательно, можно

сделать заключение, что рассматриваемая система достаточно робастная по отношению к настройкам регулятора и при возмущении со стороны регулирующего органа.

Сравнивая качество переходных процессов при возмущении по заданию и при возмущении по нагрузке при одинаковых настройках регулятора, можно отметить, что в целом, по нашим оценкам, рассматриваемая САР все-таки лучше обрабатывает возмущение по заданию, показатели качества переходных процессов принимают более желательные значения. По-видимому, все это является следствием применяемого подхода к решению задачи синтеза САР: наилучшим образом обработать возмущение именно по каналу задания.

Настройки ПИ-регулятора, оптимальные по критериям (2) и (3), могут не совпадать как между собой, так и с базовой настройкой, но в целом их различие достаточно небольшое.

Таблица 4

Показатели качества переходных процессов при $T_n = 15$ с и различных значениях k_p при возмущении по нагрузке

$k_p, \frac{\% \text{ хода ИМ}}{\tau/\text{ч}}$	1,0	1,5	2,0	2,5	3,0	3,5
$\sigma, \%$	0	0	0,19	19,33	40,77	∞ (расходящийся ПП)
$t_p, \text{с}$	77,9	68,6	67,1	102	308,8	∞
$I_1, (\text{Т/ч}) \cdot \text{с}$	14,99	9,99	7,50	8,46	20,13	∞
$I_2, (\text{Т/ч})^2 \cdot \text{с}$	5,98	3,44	2,45	2,18	3,39	∞

Таблица 5

Показатели качества переходных процессов при $k_p = 2$ % хода ИМ/т/ч и различных значениях T_n при возмущении по нагрузке

$T_n, \text{с}$	5,0	7,0	10,0	13,0	15,0	17,0	20,0
$\sigma, \%$	∞ (расходящийся ПП)	63,41	28,98	9,24	0,19	0	0
$t_p, \text{с}$	∞	173,7	80,5	66,8	67,1	69,4	88
$I_1, (\text{Т/ч}) \cdot \text{с}$	∞	15,56	8,23	7,20	7,50	8,49	9,99
$I_2, (\text{Т/ч})^2 \cdot \text{с}$	∞	3,58	2,39	2,37	2,45	2,58	2,80

Таблица 6

Показатели качества переходных процессов при различных значениях k_p и T_n при возмущении по нагрузке

$k_p, \frac{\% \text{ хода ИМ}}{\tau/\text{ч}}$	1,0	1,0	1,5	1,5	2,5	2,5	3,0	3,0
$T_n, \text{с}$	10,0	20,0	12,5	17,5	12,5	17,5	10,0	20,0
$\sigma, \%$	5,81	0	0	0	31,47	10,60	∞ (расходящийся ПП)	24,94
$t_p, \text{с}$	57,3	114,9	54,1	82,6	115,4	98,9	∞	202,7
$I_1, (\text{Т/ч}) \cdot \text{с}$	11,03	19,99	8,33	11,66	9,68	8,09	∞	13,54
$I_2, (\text{Т/ч})^2 \cdot \text{с}$	4,72	7,38	3,16	3,77	2,28	2,20	∞	2,62

Изменение параметров объекта управления

Если робастность рассматривать как грубость системы по отношению к изменениям параметров объекта управления, то можно привести следующие результаты. Если все параметры объекта управления изменятся соответственно на $\Delta k_{об}$, $\Delta T_{об}$ и на $\Delta \tau_{об}$, а регулятор будет иметь прежнюю настройку, то передаточная функция разомкнутой системы будет иметь вид

$$W_{pc}(p) = \frac{\exp(-\tau_{об} p)}{(\theta + \tau_{об}) p} \times \frac{[T_{об} p + 1](1 + \Delta k_{об}/k_{об}) \exp(-\Delta \tau_{об} p)}{(T_{об} + \Delta T_{об}) p + 1}. \quad (5)$$

Из (5) следует, что в данном случае последовательно с «идеальной» передаточной функцией разомкнутой системы, равной $\frac{\exp(-\tau_{об} p)}{(\theta + \tau_{об}) p}$

[2], включается инерционно-форсирующее звено $\frac{T_{об} p + 1}{(T_{об} + \Delta T_{об}) p + 1}$ и звено чистого запаздывания $(1 + \Delta k_{об}/k_{об}) \exp(-\Delta \tau_{об} p)$. Влияние инерционно-форсирующего звена на устойчивость САР и качество переходного процесса в системе известно: если $\Delta T_{об} < 0$ и если $|\Delta T_{об}|$ увеличивается, то начинают преобладать дифференцирующие свойства звена.

Если из (5) исключить передаточную функцию инерционно-форсирующего звена, т. е. если считать, что $\Delta T_{об} = 0$ – якобы постоянная времени объекта управления не меняется, то, используя критерий устойчивости Найквиста для систем с запаздыванием, найдем, что критическая частота

$$\omega_{кр} = \frac{1 + \Delta k_{об}/k_{об}}{\theta + \tau_{об}}, \quad (6)$$

поэтому условие устойчивости замкнутой САР в общем случае запишется так:

$$(1 + \Delta k_{об} / k_{об}) \frac{\tau_{об} + \Delta \tau_{об}}{\theta + \tau_{об}} < \pi / 2. \quad (7)$$

На координатной плоскости « $\Delta k_{об} / k_{об}$ – $\Delta \tau_{об} / \tau_{об}$ » граница области устойчивости будет представляться следующей кривой:

$$\frac{\Delta k_{об}}{k_{об}} = \frac{\pi(1 + \theta / \tau_{об})}{2(1 + \Delta \tau_{об} / \tau_{об})} - 1. \quad (8)$$

На рис. 2 изображена область устойчивости замкнутой системы при $\theta = 0$ и $\Delta T_{об} = 0$.

На рис. 2 область устойчивости – это область, расположенная ниже своей границы (штриховка направлена внутрь области). Как видно из рис. 2, даже при $\theta = 0$ замкнутая система обладает хорошим запасом устойчивости в отношении вариации параметров $k_{об}$ и $\tau_{об}$, причем, нетрудно видеть, что с увеличением параметра θ область устойчивости замкнутой САР расширяется, так как $\left(\left(\frac{\pi}{2} - 1\right) + \frac{\pi\theta}{2\tau_{об}}\right)$ – точка пересечения кривой (8) с осью ординат « $\Delta k_{об} / k_{об}$ » с увеличением θ «пол-

зет» вверх, а $\left(\left(\frac{\pi}{2} - 1\right) + \frac{\pi\theta}{2\tau_{об}}\right)$ – точка пересечения

кривой (8) с осью абсцисс « $\Delta \tau_{об} / \tau_{об}$ » перемещается влево. Следовательно, с увеличением θ робастность устойчивости [5] повышается.

Понятно, что включение инерционно-форсирующего звена с частотной передаточной функцией

$$\frac{j\omega T_{об} + 1}{j\omega(T_{об} + \Delta T_{об}) + 1} = \sqrt{\frac{1 + \omega^2 T_{об}^2}{1 + \omega^2 (T_{об} + \Delta T_{об})^2}} \times \exp\left\{j\left[\arctg(\omega T_{об}) - \arctg(\omega(T_{об} + \Delta T_{об}))\right]\right\}$$

изменит как критическую частоту, так и само условие устойчивости замкнутой системы, здесь ω – круговая частота, $j = \sqrt{-1}$. Критическую частоту $\omega_{кр}$ в этом случае необходимо отыскивать из решения следующего уравнения:

$$(1 + \Delta k_{об} / k_{об}) \frac{1}{(\theta + \tau_{об}) \omega_{кр}} \times \sqrt{\frac{1 + \omega_{кр}^2 T_{об}^2}{1 + \omega_{кр}^2 (T_{об} + \Delta T_{об})^2}} = 1. \quad (9)$$

Решая это уравнение, получаем

$$\omega_{кр} = \sqrt{\frac{-\left[(\theta + \tau_{об})^2 - T_{об}^2 (1 + \Delta k_{об} / k_{об})^2\right] + \sqrt{\left[(\theta + \tau_{об})^2 - T_{об}^2 (1 + \Delta k_{об} / k_{об})^2\right]^2 + 4(\theta + \tau_{об})^2 T_{об}^2 (1 + \Delta T_{об} / T_{об})^2 (1 + \Delta k_{об} / k_{об})^2}}{2(\theta + \tau_{об})^2 T_{об}^2 (1 + \Delta T_{об} / T_{об})^2}}. \quad (10)$$

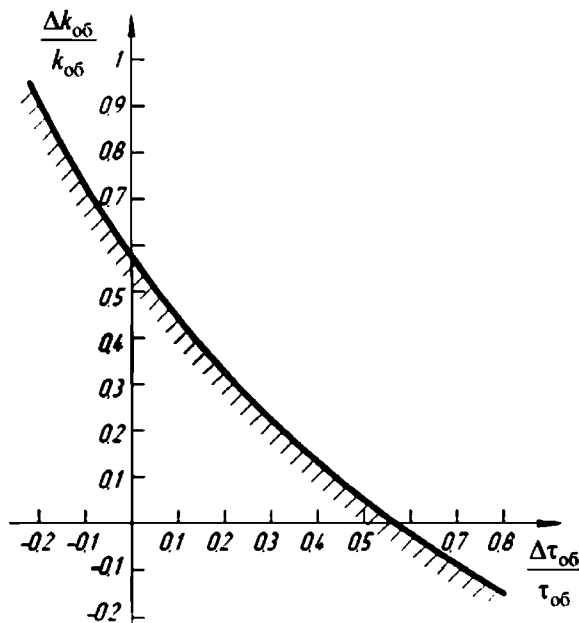


Рис. 2. Область устойчивости САР при $\theta = 0$ и $\Delta T_{об} = 0$

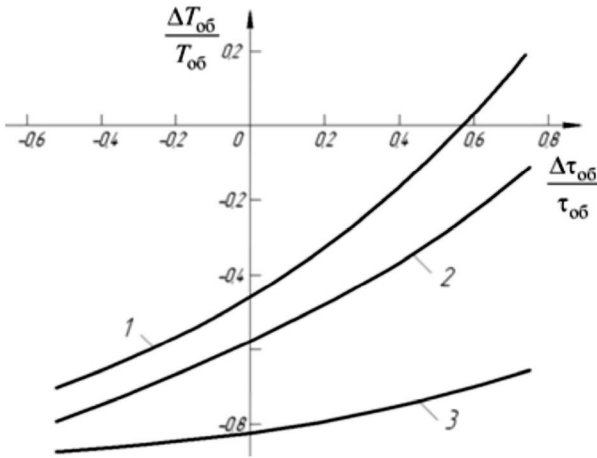


Рис. 3. Сечения области устойчивости САР при $\Delta k_{об} = 0$:
1 - $\theta = 0$ с; 2 - $\theta = 1$ с; 3 - $\theta = 5$ с

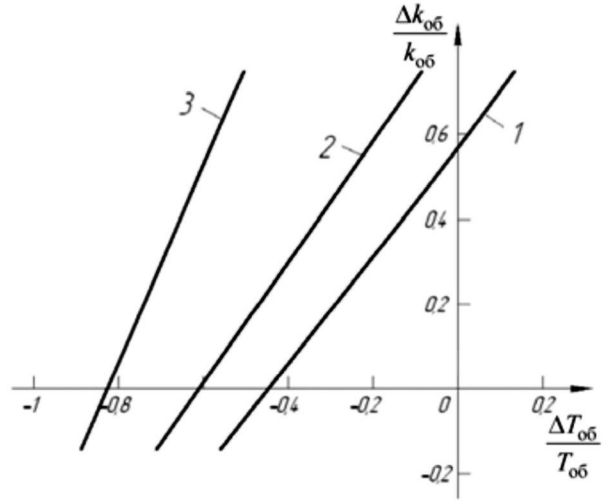


Рис. 4. Сечения области устойчивости САР при $\Delta \tau_{об} = 0$:
1 - $\theta = 0$ с; 2 - $\theta = 1$ с; 3 - $\theta = 5$ с

Условие устойчивости замкнутой САР будет иметь вид

$$\omega_{кр} \tau_{об} (1 + \Delta \tau_{об} / \tau_{об}) - \arctg(\omega_{кр} T_{об}) + \arctg[\omega_{кр} T_{об} (1 + \Delta T_{об} / T_{об})] < \pi / 2. \quad (11)$$

Заметим, что соотношения (6) и (7) являются частными случаями условий (10) и (11).

Исследование границы области устойчивости САР, построенной по соотношению (11) с помощью среды программирования «Maple 10», показало, что система имеет значимый запас устойчивости относительно вариации параметров объекта управления $\Delta k_{об}$, $\Delta T_{об}$ и $\Delta \tau_{об}$. Сечения границы области устойчивости плоскостями $\Delta k_{об} = 0$ и $\Delta \tau_{об} = 0$ при $\theta = 0; 1; 5$ с приведены соответственно на рис. 3. и 4. Как видно из этих рисунков, размеры области устойчивости системы увеличиваются при увеличении параметра θ (увеличиваются размеры допустимых вариаций всех параметров объекта управления).

Как видно из рис. 3, неблагоприятное влияние времени запаздывания на устойчивость системы может быть скомпенсировано увеличением $T_{об}$, что, в общем-то, достаточно понятно. Из рис. 4 следует, что негативное влияние роста $k_{об}$ на устойчивость САР также может быть нейтрализовано увеличением $T_{об}$.

Передаточная функция замкнутой системы по задающему воздействию при вариации всех параметров объекта управления $\Delta k_{об}$, $\Delta T_{об}$ и $\Delta \tau_{об}$ будет равна:

$$W_{\Sigma}(p) = (T_{об} p + 1)(1 + \Delta k_{об} / k_{об}) \exp[-(\tau_{об} + \Delta \tau_{об})p] \times \{ (T_{об} + \Delta T_{об})(\theta + \tau_{об}) p^2 + (\theta + \tau_{об}) p + (T_{об} p + 1)(1 + \Delta k_{об} / k_{об}) \exp[-(\tau_{об} + \Delta \tau_{об})p] \}^{-1}. \quad (12)$$

Отсюда следует, что дифференциальное уравнение замкнутой САР будет иметь вид

$$(T_{об} + \Delta T_{об})(\theta + \tau_{об}) \frac{d^2 x(t)}{dt^2} + (\theta + \tau_{об}) \frac{dx(t)}{dt} + T_{об} (1 + \Delta k_{об} / k_{об}) \frac{dx(t - \tau_{об} - \Delta \tau_{об})}{dt} + (1 + \Delta k_{об} / k_{об}) x(t - \tau_{об} - \Delta \tau_{об}) = T_{об} (1 + \Delta k_{об} / k_{об}) \frac{dx^3(t - \tau_{об} - \Delta \tau_{об})}{dt} + (1 + \Delta k_{об} / k_{об}) x^3(t - \tau_{об} - \Delta \tau_{об}). \quad (13)$$

Решая непосредственно данное дифференциальное уравнение (13) и используя программу расчета переходных процессов в САР, в которой математические описания элементов системы регулирования представлены по отдельности, установили, что при возмущении по заданию показатели качества переходных процессов при вариации параметров объекта управления будут следующими (табл. 7–9). При этом считалось, что ПИ-регулятор имеет базовые настройки

$$k_p = \frac{T_{об}}{k_{об} \tau_{об}} = 2 \% \text{ хода ИМ} / \tau / \text{ч}; T_{ин} = T_{об} = 15 \text{ с.}$$

Анализ данных табл. 7–9 позволяет сделать вывод, что в окрестности точки (0, 0, 0) существует довольно заметная область вариации параметров $\Delta k_{об}$, $\Delta T_{об}$ и $\Delta \tau_{об}$, для которой сохраняются приемлемые значения показателей качества переходных процессов.

В табл. 10–12 приведены аналогичные данные для случая возмущения по нагрузке.

Как это нетрудно видеть из (12), при отработке единичного ступенчатого задания $U(t) = 1(t)$ при $t \rightarrow \infty$ $x \rightarrow 1$, т. е. САР астатическая по задающему воздействию. Передаточная функция системы по каналу «возмущение со стороны регули-

Таблица 7

**Показатели качества переходных процессов для $k_{об} = 1,5$ т/ч/% хода ИМ; $T_{об} = 15$ с; $\tau_{об} = 5$ с
при возмущении по заданию при различных значениях $\Delta T_{об}$**

$\Delta T_{об}, с$	+1	+3	+5	-1	-3	-5
$\sigma, \%$	0	0	0	0	0	2,11
$t_p, с$	45,2	46,0	45,9	44,0	54,6	68,8

Таблица 8

**Показатели качества переходных процессов для $k_{об} = 1,5$ т/ч/% хода ИМ; $T_{об} = 15$ с; $\tau_{об} = 5$ с
при возмущении по заданию при различных значениях $\Delta \tau_{об}$**

$\Delta \tau_{об}, с$	+1	+2	+2,5	+3	-1	-2	-3
$\sigma, \%$	1,49	12,29	20,52	∞ (расходящийся ПП)	0	0	0
$t_p, с$	64,4	129,1	272,3	∞	49,0	49,3	49,6

Таблица 9

**Показатели качества переходных процессов для $k_{об} = 1,5$ т/ч/% хода ИМ; $T_{об} = 15$ с; $\tau_{об} = 5$ с
при возмущении по заданию при различных значениях $\Delta k_{об}$**

$k_{об}, \frac{т/ч}{\% \text{ хода ИМ}}$	+0,1	+0,3	+0,5	+0,75	+1,0	-0,1	-0,3	-0,5
$\sigma, \%$	0	0,31	2,61	9,70	∞ (расходящийся ПП)	0	0	0
$t_p, с$	42,7	55,3	54,7	130,8	∞	46,4	49,0	51,1

Таблица 10

**Показатели качества переходных процессов для $k_{об} = 1,5$ т/ч/% хода ИМ; $T_{об} = 15$ с; $\tau_{об} = 5$ с
при возмущении по нагрузке при различных значениях $\Delta T_{об}$**

$\Delta T_{об}, с$	+1	+3	+5	-1	-3	-5
$\sigma, \%$	0	0	0	3,49	12,40	25,06
$t_p, с$	67,8	54,3	57,0	65,6	81,1	152,1

Таблица 11

**Показатели качества переходных процессов для $k_{об} = 1,5$ т/ч/% хода ИМ; $T_{об} = 15$ с; $\tau_{об} = 5$ с
при возмущении по нагрузке при различных значениях $\Delta \tau_{об}$**

$\Delta \tau_{об}, с$	+1	+2	+2,5	+3	-1	-2	-3
$\sigma, \%$	21,83	43,50	54,19	∞ (расходящийся ПП)	0	0	0
$t_p, с$	111,2	268,3	556,4	∞	62,7	63,2	63,6

Таблица 12

**Показатели качества переходных процессов для $k_{об} = 1,5$ т/ч/% хода ИМ; $T_{об} = 15$ с; $\tau_{об} = 5$ с
при возмущении по нагрузке при различных значениях $\Delta k_{об}$**

$k_{об}, \frac{т/ч}{\% \text{ хода ИМ}}$	+0,1	+0,3	+0,5	+0,75	+1,0	-0,1	-0,3	-0,5
$\sigma, \%$	5,05	15,34	26,07	40,77	∞ (расходящийся ПП)	0	0	0
$t_p, с$	66,0	91,8	141,5	339,8	∞	67,6	63,0	64,4

рующего органа – ошибка регулирования» при базовых настройках ПИ-регулятора будет равна:

$$W_{\text{зс}}^{\text{po}}(p) = (k_{\text{об}} + \Delta k_{\text{об}}) k_{\text{об}} T_{\text{об}} p (\tau_{\text{об}} + \theta) \exp[-(\tau_{\text{об}} + \Delta \tau_{\text{об}}) p] \times \\ \times \left\{ k_{\text{об}} T_{\text{об}} p (\theta + \tau_{\text{об}}) [(T_{\text{об}} + \Delta T_{\text{об}}) p + 1] + \right. \\ \left. + T_{\text{об}} (T_{\text{об}} p + 1) (k_{\text{об}} + \Delta k_{\text{об}}) \exp[-(\tau_{\text{об}} + \Delta \tau_{\text{об}}) p] \right\}^{-1}, \quad (14)$$

поэтому $\lim_{p \rightarrow 0} W_{\text{зс}}^{\text{po}}(p) = 0$ при $p \rightarrow 0$, следовательно, по данному каналу САР также астатическая.

Заключение

Таким образом, достаточно подробный анализ показал, что рассматриваемый метод синтеза промышленных САР, позволяющий однозначно выбрать как структуру, так и параметры настройки регулятора, обеспечивает приемлемое качество переходных процессов и достаточный запас устойчивости системы при довольно заметных по размерам вариациях параметров объекта управления и погрешностях задания настроек регулятора. Поэтому данный метод синтеза можно достаточно уверенно рекомендовать для практического использования.

Литература

1. Ротач, В.Я. Теория автоматического управления: учеб. для вузов / В.Я. Ротач. – М.: Изд-во МЭИ, 2004. – 400 с.
2. Панферов, С.В. К обоснованию метода структурно-параметрического синтеза автоматических регуляторов / С.В. Панферов, А.И. Телегин, В.И. Панферов // Вестник ЮУрГУ. Серия «Компьютерные технологии, управление, радиоэлектроника». – 2009. – Вып. 9. – № 3(136). – С. 29–36.
3. Плютто, В.П. Практикум по теории автоматического управления химико-технологическими процессами. Цифровые системы / В.П. Плютто, В.А. Путинцев, В.М. Глумов. – М.: Химия, 1989. – 279 с.
4. Копелович, А.П. Инженерные методы расчета при выборе автоматических регуляторов / А.П. Копелович. – М.: Металлургия, 1960. – 190 с.
5. Дорф, Р. Современные системы управления: пер с англ. / Р. Дорф, Р. Бишоп. – М.: Лаборатория Базовых Знаний, 2002. – 832 с.

Поступила в редакцию 8 мая 2011 г.