

## К ЗАДАЧЕ КОНСТРУИРОВАНИЯ АВТОМАТИЧЕСКОГО РЕГУЛЯТОРА ДЛЯ ОБЪЕКТА ВТОРОГО ПОРЯДКА С ЗАПАЗДЫВАНИЕМ

С.В. Панферов, В.И. Панферов

## TO THE DESIGN PROBLEM OF AN AUTOMATIC CONTROLLER CONSTRUCTING FOR THE SECOND ORDER OBJECT WITH TIME DELAY

V.I. Panferov, S.V. Panferov

Для системы автоматического регулирования (САР) с ПИД-регулятором и статическим объектом управления второго порядка с запаздыванием методом математического моделирования оценивается устойчивость и определяются показатели качества переходных процессов как при возмущении по заданию, так и со стороны регулирующего органа. При этом рассматриваются значимая по размерам окрестность точки с предложенными базовыми настройками регулятора, а также и наиболее вероятные в практических ситуациях величины вариаций параметров объекта управления. Показано, что обсуждаемый метод структурно-параметрического синтеза позволяет конструировать достаточно робастные САР.

*Ключевые слова:* ПИД-регулятор, устойчивость САР, качество переходных процессов, базовые настройки, объект управления 2-го порядка с запаздыванием.

Using method of mathematical simulation stability is estimated and quality rating of transients both under disturbance by the task and under final control element are defined for the automatic control system (ACS) with a PID controller and a static second order control object with time delay. Both a point neighborhood significant by size with the proposed default settings of the regulator and values of variation of parameters of the control object the most probable in practical situations are analyzed. It is shown that the discussed method of a structural-parametric synthesis enables to construct sufficiently robust ACS.

*Keywords:* PID controller, stability of ACS, quality of transient processes, default settings, control object of the second order with time delay.

### Введение

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 огромный 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-, ПИ- и ПИД- «...алгоритмы были получены чисто эвристическим путем» [1, с. 82] 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 це-

лесообразности 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.

### Постановка задачи

Рассмотрим объект управления с передаточной функцией вида

$$W_{об}(p) = \frac{k_{об}}{a_2 p^2 + a_1 p + 1} \exp(-\tau_{об} p), \quad (1)$$

где  $k_{об}$  – коэффициент передачи объекта;  $\tau_{об}$  – время запаздывания объекта;  $a_1$  и  $a_2$  – коэффици-

енты дифференциального уравнения объекта управления,  $p$  – комплексная переменная. По данным [3] такой передаточной функцией описывается, например, канал «расход сетевой воды – температура внутреннего воздуха здания». В соответствии с [2] близким к идеальному для такого объекта будет ПИД-регулятор с передаточной функцией

$$W_p(p) = \frac{a_1}{k_{об}(\tau_{об} + \theta)} \left[ 1 + \frac{1}{a_1 p} + \frac{a_2}{a_1} p \right],$$

где  $\theta$  – достаточно малая постоянная времени. 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  $k_{об}$ ,  $a_1$ ,  $a_2$ ,  $\tau_{об}$ , а также коэффициента передачи  $k_p$ , времени интегрирования  $T_{и}$  и времени дифференцирования  $T_{д}$  ПИД-регулятора, каждая из программ осуществляет не только построение графика переходного процесса, но и определяет перерегулирование  $\sigma$  и время регулирования  $t_p$ , а также вычисляет значения следующих 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  $\varepsilon(t) = x^3(t) - x(t)$  – ошибка регулирования (расхождение);  $x^3(t)$  и  $x(t)$  – соответственно заданное и действительное значения регулируемой величины;  $t$  – время;  $t_k$  – конечное время оценки переходного процесса. Здесь время регулирования  $t_p$  определялось как время, по истечении которого

отклонение регулируемой величины от задания не будет превышать 5%. Интегрирование дифференциального уравнения объекта управления осуществляется методом Рунге–Кутты с погрешностью, пропорциональной пятой степени шага по времени. Для компьютерного использования алгоритм ПИД-регулирования представляли в дискретной форме, при вычислении интеграла применяли метод трапеций. С целью сокращения объема необходимых вычислений использовали рекуррентную форму дискретного представления алгоритма ПИД-регулирования, приведенную в работе [4]:

$$U(m) = U(m-1) + q_0 \varepsilon(m) + q_1 \varepsilon(m-1) + q_2 \varepsilon(m-2), \quad (4)$$

где  $m$  – номер расчетного шага по времени,  $q_0 = k_p \left[ 1 + T_{д}/h + h/2T_{и} \right]$ ;  $q_1 = k_p \left[ h/2T_{и} - 1 - 2T_{д}/h \right]$ ;  $q_2 = k_p T_{д}/h$ ;  $h$  – 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:

$$k_p = \frac{a_1}{k_{об}(\tau_{об} + \theta)}; T_{и} = a_1; T_{д} = a_2/a_1, \text{ при выполнении}$$

вычислений параметры объекта управления соответствовали динамическим свойствам канала «расход топлива (угольной пыли) в % хода ИМ – паропроизводительность» котельной установки [5]:  $k_{об} = 1,66$  т/ч/%хода ИМ;  $a_1 = 93,33$  с;  $a_2 = 1550$  с<sup>2</sup>;  $\tau_{об} = 30$  с. В этом случае базовые значения параметров настройки регулятора составят (параметр  $\theta$  полагался равным нулю  $\theta = 0$ ):  $k_p = \frac{a_1}{k_{об}\tau_{об}} = 1,87$  % хода ИМ/т/ч;  $T_{и} = a_1 = 93,33$  с;  $T_{д} = a_2/a_1 = 16,60$  с.

В табл. 1 приведены показатели качества переходных процессов в САР при базовых значениях  $k_p$ ,  $T_{и}$  и различных значениях  $T_{д}$ .

Таблица 1

Показатели качества переходных процессов при  $k_p = 1,87$  % хода ИМ/т/ч;  $T_{и} = 93,33$  с и различных значениях  $T_{д}$  при возмущении по заданию

$T_{д}$ , с	2,2	4,4	8,8	16,6	17,6	20,0
$\sigma$ , %	15,97	10,34	2,73	0,008	0	0,001
$t_p$ , с	1259,7	700,2	413,6	256,2	257,4	247,8
$I_1$ , (т/ч)·с	200,80	153,47	129,86	120,87	124,58	124,59
$I_2$ , (т/ч) <sup>2</sup> ·с	99,11	92,79	90,39	89,61	91,32	91,93

## Инженерное оборудование зданий и сооружений

При  $T_d = 0$  получили незатухающий, колебательный переходный процесс с амплитудой, составляющей 25,17 % от задания. Анализ полученных значений критериев  $I_1$  и  $I_2$  показал, что базовая настройка времени дифференцирования  $T_d = 16,6$  с, по всей видимости, является оптимальной для обоих критериев. Конечно, для большей уверенности в этом утверждении следует провести более детальный расчет зависимостей  $I_1$  и  $I_2$  от  $T_d$ . Тем не менее данные табл. 1 свидетельствуют, что существует значимая окрестность точки  $T_d = 16,6$  с, в которой сохраняется приемлемое качество переходных процессов в САР, высокая точность установки значения  $T_d$  при настройке регулятора не требуется.

В табл. 2 приведены показатели качества переходных процессов в САР при базовых значениях  $k_p$ ,  $T_d$  и различных значениях времени интегрирования  $T_n$ .

Как видно из табл. 2, базовая настройка времени интегрирования  $T_n = 93,33$  с не является оптимальной ни по критерию  $I_1$ , ни по критерию  $I_2$ , а также ни по критерию времени регулирования  $t_p$ . Вместе с тем, как это нетрудно видеть, такая настройка времени интегрирования является достаточно приемлемой, в значимой окрестности точки  $T_n = 93,33$  с сохраняется удовлетворительное качество переходного процесса в САР.

В табл. 3 приведены показатели качества переходных процессов в САР при базовых значениях

Таблица 2

Показатели качества переходных процессов при  $k_p = 1,87$  % хода ИМ/т/ч;  $T_d = 16,60$  с и различных значениях  $T_n$  при возмущении по заданию

$T_n$ , с	103,33	98,33	93,33	88,33	83,33	78,33
$\sigma$ , %	0	0	0,008	0,119	0,594	1,253
$t_p$ , с	291,1	267,8	256,2	248,3	242,3	237,7
$I_1$ , (т/ч)·с	137,25	128,54	120,87	114,16	108,54	103,81
$I_2$ , (т/ч) <sup>2</sup> ·с	96,40	92,72	89,60	86,97	84,76	82,92

Окончание табл. 2

$T_n$ , с	73,33	68,33	63,33	58,33	53,33	48,33
$\sigma$ , %	3,169	10,117	15,044	24,801	33,462	44,840
$t_p$ , с	234,2	238,3	247,5	264,2	342,9	436,2
$I_1$ , (т/ч)·с	100,05	100,04	101,66	107,76	116,49	134,25
$I_2$ , (т/ч) <sup>2</sup> ·с	81,09	79,32	78,57	78,33	79,624	84,07

Таблица 3

Показатели качества переходных процессов при  $T_n = 93,33$  с;  $T_d = 16,60$  с и различных значениях  $k_p$  при возмущении по заданию

$k_p$ , % хода ИМ/т/ч	1,87	1,97	2,07	2,17	2,27	2,37	2,47
$\sigma$ , %	0,008	0,034	0,123	0,399	0,993	1,948	3,088
$t_p$ , с	256,2	254,8	250,5	246,0	240,3	334,0	335,9
$I_1$ , (т/ч)·с	120,87	122,14	121,73	121,61	120,51	119,36	120,92
$I_2$ , (т/ч) <sup>2</sup> ·с	89,60	89,37	88,49	87,71	86,41	84,77	83,85

Окончание табл. 3

$k_p$ , % хода ИМ/т/ч	2,57	2,67	2,77	1,77	1,67	1,57	1,47
$\sigma$ , %	4,440	6,189	8,626	0	0	0	0
$t_p$ , с	335,1	446,7	677,7	265,0	263,9	273,9	274,1
$I_1$ , (т/ч)·с	124,95	131,28	140,84	125,33	124,05	129,37	130,54
$I_2$ , (т/ч) <sup>2</sup> ·с	83,64	83,70	83,86	92,20	92,57	95,69	97,23

$T_n$ ,  $T_d$  и различных значениях коэффициента передачи регулятора  $k_p$ .

Также можно отметить, что базовая настройка коэффициента передачи регулятора  $k_p = 1,87\%$  хода ИМ/т/ч не является оптимальной ни по критерию  $I_1$ , ни по критерию  $I_2$ , а также ни по критерию времени регулирования  $t_p$ . Вместе с тем, как это нетрудно видеть, такая настройка времени интегрирования является достаточно приемлемой, в значимой окрестности точки  $k_p = 1,87\%$  хода ИМ/т/ч сохраняется удовлетворительное качество переходного процесса в САР. Кроме того, можно заключить, что критерии  $I_1$  и  $I_2$  имеют несколько локальных экстремумов.

Показатели качества переходных процессов в САР при базовых значениях  $k_p$ ,  $T_n$  и различных значениях  $T_d$  при возмущении по нагрузке приведены в табл. 4.

В табл. 5 приведены показатели качества переходных процессов в САР при базовых значениях  $k_p$ ,  $T_d$  и различных значениях времени интегрирования  $T_n$  при возмущении по нагрузке.

В табл. 6 приведены показатели качества переходных процессов в САР при базовых значениях  $T_n$ ,  $T_d$  и различных значениях коэффициента передачи регулятора  $k_p$  при возмущении по нагрузке.

Таким образом, данные табл. 1–6 свидетельствуют о том, что в значимой по размерам окрестности точки с базовыми настройками регулятора

$$k_p = \frac{a_1}{k_{об} \tau_{об}} = 1,87\% \text{ хода ИМ/т/ч; } T_n = a_1 = 93,33 \text{ с;}$$

$T_d = a_2/a_1 = 16,60 \text{ с}$  сохраняются устойчивость САР и приемлемое качество регулирования как при возмущении по заданию, так и при возмущении со стороны регулирующего органа, следовательно, большой точности установки численных значений параметров настройки регулятора не требуется. Заметим, что здесь устойчивость системы определяется самым простым и наиболее достоверным способом – это непосредственно по кривой переходного процесса.

#### Изменение параметров объекта управления

Если робастность рассматривать как грубость системы по отношению к изменениям параметров объекта управления, то можно привести следующие

Таблица 4

Показатели качества переходных процессов при  $k_p = 1,87\%$  хода ИМ/т/ч;  $T_n = 93,33$  с и различных значениях  $T_d$  при возмущении по нагрузке

$T_d$ , с	2,2	4,4	8,8	16,6	17,6	18,6	19,6	20,6
$\sigma$ , %	48,88	40,37	23,77	1,398	0,267	0,180	0,178	0,229
$t_p$ , с	1495,3	922,0	462,9	272,6	268,1	262,8	258,0	253,8
$I_1$ , (т/ч)·с	216,74	130,32	77,06	49,58	50,54	50,48	50,48	50,51
$I_2$ , (т/ч) <sup>2</sup> ·с	57,77	37,43	24,96	18,39	18,14	17,77	17,44	17,15

Таблица 5

Показатели качества переходных процессов при  $k_p = 1,87\%$  хода ИМ/т/ч;  $T_d = 16,60$  с и различных значениях  $T_n$  при возмущении по нагрузке

$T_n$ , с	103,33	98,33	93,33	88,33	83,33	78,33
$\sigma$ , %	0	0,207	1,398	3,780	7,427	11,077
$t_p$ , с	278,8	275,3	272,6	270,5	268,9	268,1
$I_1$ , (т/ч)·с	55,53	52,11	49,58	48,27	47,80	47,86
$I_2$ , (т/ч) <sup>2</sup> ·с	19,22	18,75	18,39	18,11	17,91	17,79

Окончание табл. 5

$T_n$ , с	73,33	68,33	63,33	58,33	53,33	48,33
$\sigma$ , %	15,639	22,011	26,548	35,566	43,609	54,212
$t_p$ , с	268,5	273,7	280,3	295,1	306,1	394,4
$I_1$ , (т/ч)·с	48,49	50,16	51,85	56,50	62,42	73,77
$I_2$ , (т/ч) <sup>2</sup> ·с	17,73	17,81	17,99	18,68	19,72	21,94

Таблица 6

Показатели качества переходных процессов при  $T_n = 93,33$  с;  $T_d = 16,60$  с  
и различных значениях  $k_p$  при возмущении по нагрузке

$k_p$ , % хода ИМ/т/ч	1,87	1,97	2,07	2,17	2,27	2,37	2,47
$\sigma$ , %	1,398	2,477	4,663	7,710	11,627	16,279	20,280
$t_p$ , с	272,6	269,7	265,9	262,0	365,5	369,7	423,6
$I_1$ , (т/ч)·с	49,58	49,07	49,05	49,97	51,90	55,27	60,49
$I_2$ , (т/ч) <sup>2</sup> ·с	18,39	17,45	16,61	15,96	15,47	15,19	15,25

Окончание табл. 6

$k_p$ , % хода ИМ/т/ч	2,57	2,67	2,77	1,77	1,67	1,57	1,47
$\sigma$ , %	23,718	28,849	35,610	0,061	0	0	0
$t_p$ , с	538,1	658,2	950,2	277,3	277,6	282,8	280,5
$I_1$ , (т/ч)·с	68,13	79,37	96,55	52,87	54,61	59,57	63,01
$I_2$ , (т/ч) <sup>2</sup> ·с	15,74	16,90	19,38	19,80	21,14	23,16	25,22

шие результаты. При этом полагается, что ПИД-регулятор имеет следующие настройки:

$$k_p = \frac{a_1}{k_{об} \tau_{об}} = 1,87 \text{ \% хода ИМ/т/ч;}$$

$$T_n = a_1 = 93,33 \text{ с; } T_d = a_2/a_1 = 16,60 \text{ с,}$$

найденные по базовым значениям параметров объекта управления

$$k_{об} = 1,66 \text{ т/ч/\% хода ИМ; } a_1 = 93,33 \text{ с;}$$

$$a_2 = 1550 \text{ с}^2; \tau_{об} = 30 \text{ с.}$$

Далее считается, что по тем или иным причинам параметры объекта изменяются, их итоговые значения таковы:  $(k_{об} + \Delta k_{об})$ ;  $(\tau_{об} + \Delta \tau_{об})$ ;  $(a_1 + \Delta a_1)$ ;  $(a_2 + \Delta a_2)$ , однако настройки регулятора остаются прежними.

Данные табл. 7–14 свидетельствуют о том, что при наиболее вероятных в практических ситуациях величинах вариаций параметров объекта управления также сохраняются устойчивость САР и приемлемое качество регулирования как при

Таблица 7

Показатели качества переходных процессов при  $k_{об} = 1,66$  т/ч/\% хода ИМ;  $a_1 = 93,33$  с;  $a_2 = 1550$  с<sup>2</sup>;  $\tau_{об} = 30$  с  
и различных значениях приращения  $\Delta \tau_{об}$  при возмущении по заданию

$\Delta \tau_{об}$ , с	0	+5	+10	+15	-5	-10	-15
$\sigma$ , %	0,008	2,599	10,451	22,798	0	0	0
$t_p$ , с	256,2	270,1	596,5	1919	254,7	259,0	261,6

Таблица 8

Показатели качества переходных процессов при  $k_{об} = 1,66$  т/ч/\% хода ИМ;  $a_1 = 93,33$  с;  $a_2 = 1550$  с<sup>2</sup>;  $\tau_{об} = 30$  с  
и различных значениях приращения  $\Delta k_{об}$  при возмущении по заданию

$\Delta k_{об}$ , т/ч/\% хода ИМ	0	+0,15	+0,30	+0,45	-0,15	-0,30	-0,45
$\sigma$ , %	0,008	0,203	0,873	2,124	0	0	0
$t_p$ , с	256,2	248,4	240,6	334,0	263,4	268,6	270,8

Таблица 9

Показатели качества переходных процессов при  $k_{об} = 1,66$  т/ч/\% хода ИМ;  $a_1 = 93,33$  с;  $a_2 = 1550$  с<sup>2</sup>;  $\tau_{об} = 30$  с  
и различных значениях приращения  $\Delta a_1$  при возмущении по заданию

$\Delta a_1$ , с	0	+15	+30	+45	-15	-30	-45
$\sigma$ , %	0,008	0	0,008	0,849	1,359	10,470	$\infty$ (расходящийся ПП)
$t_p$ , с	256,2	246,2	221,3	209,7	251,3	900,8	$\infty$

Таблица 10

Показатели качества переходных процессов при  $k_{об}=1,66$  т/ч/% хода ИМ;  $a_1=93,33$  с;  $a_2=1550$  с<sup>2</sup>;  $\tau_{об}=30$  с и различных значениях приращения  $\Delta a_2$  при возмущении по заданию

$\Delta a_2, \text{с}^2$	0	+50	+100	+150	-50	-100	-150
$\sigma, \%$	0,008	0,018	0,028	0,055	0,003	0,001	0
$t_p, \text{с}$	256,2	258,3	260,4	262,6	254,2	252,3	250,5

Таблица 11

Показатели качества переходных процессов при  $k_{об}=1,66$  т/ч/% хода ИМ;  $a_1=93,33$  с;  $a_2=1550$  с<sup>2</sup>;  $\tau_{об}=30$  с и различных значениях приращения  $\Delta \tau_{об}$  при возмущении по нагрузке

$\Delta \tau_{об}, \text{с}$	0	+5	+10	+15	-5	-10	-15
$\sigma, \%$	1,398	18,918	38,201	55,952	0	0	0
$t_p, \text{с}$	272,6	362,6	730,6	2507,4	246,1	237,0	238,8

Таблица 12

Показатели качества переходных процессов при  $k_{об}=1,66$  т/ч/% хода ИМ;  $a_1=93,33$  с;  $a_2=1550$  с<sup>2</sup>;  $\tau_{об}=30$  с и различных значениях приращения  $\Delta k_{об}$  при возмущении по нагрузке

$\Delta k_{об}, \text{т/ч/\% хода ИМ}$	0	+0,15	+0,30	+0,45	-0,15	-0,30	-0,45
$\sigma, \%$	1,398	5,365	11,082	17,146	0,011	0	0
$t_p, \text{с}$	272,6	268,0	367,5	425,4	273,3	191,6	214,3

Таблица 13

Показатели качества переходных процессов при  $k_{об}=1,66$  т/ч/% хода ИМ;  $a_1=93,33$  с;  $a_2=1550$  с<sup>2</sup>;  $\tau_{об}=30$  с и различных значениях приращения  $\Delta a_1$  при возмущении по нагрузке

$\Delta a_1, \text{с}$	0	+15	+30	+45	-15	-30	-45
$\sigma, \%$	1,398	0	0,008	0,786	15,758	39,685	$\infty$ (расходящийся ПП)
$t_p, \text{с}$	272,6	243,0	223,4	231,6	396,4	1414,4	$\infty$

Таблица 14

Показатели качества переходных процессов при  $k_{об}=1,66$  т/ч/% хода ИМ;  $a_1=93,33$  с;  $a_2=1550$  с<sup>2</sup>;  $\tau_{об}=30$  с и различных значениях приращения  $\Delta a_2$  при возмущении по нагрузке

$\Delta a_2, \text{с}^2$	0	+50	+100	+150	-50	-100	-150
$\sigma, \%$	1,398	1,741	2,804	4,105	1,061	0,726	0,392
$t_p, \text{с}$	272,6	276,1	279,6	283,1	269,2	265,8	262,5

возмущении по заданию, так и при возмущении со стороны регулирующего органа.

#### Заключение

Численными методами исследованы свойства САР с объектом управления второго порядка с запаздыванием в окрестности базовых настроек ПИД-регулятора. Установлено, что в значимой по размерам окрестности точки с базовыми настройками регулятора сохраняются устойчивость САР и приемлемое качество регулирования как при возмущении по заданию, так и при возмущении со стороны регулирующего органа, следовательно, большой точности установки численных зна-

чений параметров настройки регулятора не требуется.

Исследована робастность САР как грубость по отношению к изменениям параметров регулируемого канала системы теплоснабжения, при этом считалось, что по тем или иным причинам параметры объекта изменяются и принимают значения:  $(k_{об} + \Delta k_{об})$ ;  $(\tau_{об} + \Delta \tau_{об})$ ;  $(a_1 + \Delta a_1)$ ;  $(a_2 + \Delta a_2)$ . Установлено, что при наиболее вероятных в практических ситуациях величинах вариаций параметров объекта управления также сохраняются устойчивость САР и приемлемое качество регулирования как при возмущении по заданию, так и при возмущении со стороны регулирующего органа.

Таким образом, установлено, что рассматриваемый метод структурно-параметрического синтеза даёт возможность конструировать достаточно робастные САР. Использование полученных результатов позволит, в частности, решить проблему «слабых» настроек регуляторов и повысить качество отработки задающих и возмущающих воздействий в системах автоматизации процессов теплоснабжения.

### *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. Теле-

гин, В.И. Панферов // Вестник ЮУрГУ. Серия «Компьютерные технологии, управление, радиоэлектроника». – 2009. – Вып. 9 – № 3(136). – С. 29–36.

3. Сафонов, А.П. Автоматизация систем централизованного теплоснабжения / А.П. Сафонов. – М.: Энергия, 1974. – 273 с.

4. 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.

5. Копелович, А.П. Инженерные методы расчета при выборе автоматических регуляторов / А.П. Копелович. – М.: Металлургиздат, 1960. – 190 с.

*Поступила в редакцию 1 февраля 2011 г.*