УДК 681.52.01

К ОБОСНОВАНИЮ МЕТОДА СТРУКТУРНО-ПАРАМЕТРИЧЕСКОГО СИНТЕЗА АВТОМАТИЧЕСКИХ РЕГУЛЯТОРОВ

С.В. *Панферов, А.И. Телегин, В.И. Панферов*

ON JUSTIFICATION OF THE METHOD OF STRUCTURE PARAMETRIC SYNTHESIS OF AUTOMATIC REGULATORS

S.V. Panferov, A.I. Telegin, V.I. Panferov

Обосновывается вид эталонной передаточной функции замкнутой системы автоматического регулирования. Решается задача структурно-параметрического синтеза автоматических регуляторов для типовых промышленных объектов управления. Анализируется качество выбора структур и настроек регуляторов.

Ключевые слова: синтез регулятора, структурно-параметрический синтез, выбор настроек, выбор структуры.

A type of reference closed-loop transfer function of automatic regulation is justified. The problem of structure parametric synthesis of automatic regulators for standard industrial control objects is solved. The quality of structure selection and regulator adjustments is analyzed.

Keywords: regulator synthesis, structure parametric synthesis, superstructure selection, structure selection.

В настоящее время в промышленности 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-, 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 настоящей работе предлагается метод структурно-параметрического синтеза регуляторов по желаемой (эталонной) передаточной функции замкнутой системы. Работа является развитием результатов, полученных в работах [2, 3] и, как нам представляется, может служить некоторым формальным обоснованием целесообразности применения ПИД-регуляторов.

Панферов Сергей Владимирович - аспирант кафедры систем управления и математического моделирования Миасского филиала ЮУрГУ; tgsiv@susu.ac.ru.

Телегин Александр Иванович - д.ф.-м.н., профессор, заведующий кафедрой систем управления и математического моделирования Миасского филиала ЮУрГУ; aam@am.susu.ru.

Панферов Владимир Иванович - д.т.н., профессор, заведующий кафедрой теплогазоснабжения и вентиляции ЮУрГУ; tgsiv@susu.ac.ru.

1. Решение задачи синтеза регуляторов

Задача решалась методом выбора передаточной функции замкнутой системы в виде $W_{зс}(p)=\frac{1}{\theta p+1}\exp(-\tau_{об}p)$, где θ – достаточно малая постоянная времени, p – комплексная переменная, а параметр $\tau_{об}$ приравнивался ко времени запаздывания объекта управления, который при этом представлялся одной из следующих типовых передаточных функций:

$$\frac{1}{T_{об}p}\exp(-\tau_{об}p);$$

$$\frac{k_{об}}{T_{об}p+1}\exp(-\tau_{об}p);$$

$$\frac{k_{об}}{a_2p^2+a_1p+1}\exp(-\tau_{об}p),$$

где $k_{об}$, $T_{об}$, $\tau_{об}$ - соответственно коэффициент передачи, постоянная времени и время запаздывания объекта, a_1, a_2 - коэффициенты дифференциального уравнения объекта. В результате приме-

Panferov Sergey Vladimirovich - post-graduate student of control system and mathematical modeling department of Miass branch of SUSU; tgsiv@susu.ac.ru.

Telegin Alexander Ivanovich - PhD, professor, head of control system and mathematical modeling department of Miass branch of SUSU; aam@am.susu.ru.

Panferov Vladimir Ivanovich - PhD, professor, head of heat and gas supply and ventilation department of SUSU; tgsiv@susu.ac.ru.

нения данного подхода получили, что для объектов первого типа передаточная функция квазиоптимального регулятора будет равна $W_{\text{р}}(p)=\frac{T_{\text{об}}}{\tau_{\text{об}}+\theta}$, т.е. близким к идеальному является П-регулятор с коэффициентом передачи $k_{\text{р}}=\frac{T_{\text{об}}}{\tau_{\text{об}}+\theta}$. Для объекта второго типа квазиоптимальным будет ПИ-регулятор, его передаточная функция будет иметь вид $W_{\text{р}}(p)=\frac{T_{\text{об}}}{k_{\text{об}}(\tau_{\text{об}}+\theta)}\left[1+\frac{1}{T_{\text{об}}p}\right]$. Передаточная функция регулятора для объекта третьего типа будет такой $W_{\text{р}}(p)=\frac{a_1}{k_{\text{об}}(\tau_{\text{об}}+\theta)}\left[1+\frac{1}{a_1 p}+\frac{a_2}{a_1}p\right]$, т.е. целесообразно применение ПИД-регулятора.

2. Обоснование вида эталонной передаточной функции

При выборе эталонной передаточной функции замкнутой системы руководствовались следующими соображениями. Очевидно, что идеальной передаточной функцией замкнутой системы по задающему воздействию является передаточная функция вида $W_{\text{зс}}(p)=1$ [4]. В этом случае САР абсолютно точно отрабатывает задание, а также полностью исключает влияние возмущений на процесс управления [4]. Однако, как это достаточно хорошо известно научной общественности, добиться такой передаточной функции совершенно невозможно. Поэтому есть смысл попытаться за счет выбора регулятора получить такую передаточную функцию замкнутой системы, которая в определенной мере будет близка к идеальной. Нетрудно видеть, что при малом значении параметра θ следующие передаточные функции близки к 1: $\frac{1}{\theta p+1}$, $e^{-\theta p}$, причем при $\theta\to 0$ предел этих передаточных функций будет точно равен 1. Кроме того $\frac{1}{\theta p+1}\approx e^{-\theta p}$, т.е. данные передаточные функции приближенно равноценны. Отметим также, что по данным работы [5] система с передаточной функцией $\frac{1}{\theta p+1}$ является оптимальной по робастности и точности. В этой работе, в частности, приводятся следующие интересные для рассматриваемой проблемы данные: «...чем ближе к отрицательной вещественной полуоси располагаются корни характеристического уравнения системы», «...тем большую робастность имеет система» и что «...если все полюсы системы находятся на отрицательной вещественной полуоси, то она» «...обладает» «...наиболее высоким потенциалом по робастности», «...из множества чисто инерционных систем наиболее структурно-робастным является простейшее инерционное звено первого порядка».

Кроме того, дополнительным обоснованием для выбора данной передаточной функции в качестве эталона являются следующие соображения.

Известно [6], что достаточно рациональным (вполне предпочтительным) является следующий критерий качества переходных процессов в САР:

$$I=\int_0^{\infty}[\varepsilon^2+\alpha^2(d\varepsilon/dt)^2]dt, \qquad (1)$$

где $\varepsilon(t)=x^3(t)-x(t)$ – ошибка регулирования (рассогласование), $x^3(t)$ и $x(t)$ – соответственно заданное и действительное значение регулируемой величины, t – время, α^2 – некоторый весовой коэффициент.

Известно также [6], что оптимальным по минимуму этого критерия переходным процессом является экспоненциальный процесс, т.е. процесс вида

$$\varepsilon(t)=\varepsilon(0)\exp(-t/\alpha), \qquad (2)$$

где $\varepsilon(0)$ – значение ошибки регулирования при $t=0$.

Если при этом считать, что такой переходный процесс должен иметь место при отработке САР единичного ступенчатого задания $x^3(t)=1(t)$, то в этом случае $\varepsilon(0)=1$ и выходной сигнал САР будет иметь вид

$$x(t)=1-\exp(-t/\alpha). \qquad (3)$$

В связи с этим Лапласово изображение выходной величины запишется так

$$L\{x(t)\}=X(p)=\frac{1}{p(\alpha p+1)}, \qquad (4)$$

далее, учитывая, что

$$L\{x^3(t)\}=X^3(p)=\frac{1}{p} \qquad (5)$$

найдем передаточную функцию образцовой (эталонной) САР

$$W(p)=\frac{X(p)}{X^3(p)}=\frac{1}{\alpha p+1}, \qquad (6)$$

что соответствует вышеотмеченному.

Для выбора величины α имеются следующие рекомендации [6]: так как длительность переходного процесса в САР с передаточной функцией (6) составляет примерно $(3\div 4)\alpha$, поэтому если задано время регулирования $t_{\text{р}}$, то, допуская известный запас, α следует вычислять по соотношению

$$\alpha=\frac{t_{\text{р}}}{(5\div 6)}. \qquad (7)$$

Понятно, что параметр α в этом случае играет роль постоянной времени θ эталонной передаточной функции САР.

Если известна передаточная функция замкнутой САР по заданию $W_{зс}(p)$, то передаточная функция регулятора $W_р(p)$ находится по формуле:

$$W_р(p)=\frac{W_{зс}(p)}{W_{об}(p)[1-W_{зс}(p)]}, \qquad (8)$$

где $W_{об}(p)$ – передаточная функция объекта.

Если динамические свойства объектов управления описывать вышеприведенными передаточными функциями и при этом $W_{зс}(p)$ выбрать в виде $\frac{1}{\theta p+1}$, то в соответствии с формулой (8) будут получаться физически нереализуемые структуры регуляторов из-за наличия в числителе $W_р(p)$ сомножителя вида $\exp(\tau_{об}p)$. Поэтому, учитывая все вышеизложенное, при решении задачи полагали, что $W_{зс}(p)=\frac{1}{\theta p+1}\exp(-\tau_{об}p)$. Таким образом, было и установлено, что для каждого конкретного объекта управления, принадлежащего множеству типовых динамических объектов целесообразно применение конкретного регулятора из ПИД-семейства.

3. Обсуждение подхода к решению задачи

Следует отметить, что данный подход к решению задачи синтеза (посредством предварительного выбора передаточной функции замкнутой системы) вообще-то известен уже давно. По-видимому, впервые в отечественной литературе идея этого метода достаточно ясно изложена в работе [7, с. 7-8]. Многие методы синтеза САР, в частности, и методы [4] по существу основаны на предварительном выборе желаемой передаточной функции замкнутой системы. В известной мере этот подход используется даже при выборе желаемой логарифмической амплитудно-частотной характеристики разомкнутой системы [8-10]. Обсуждаются и используются такие подходы и в настоящее время [5, 11, 12]. Однако *непосредственно* этот метод в литературе практически не рассматривается, во всяком случае, авторам неизвестны работы конкретно с вышеизложенной постановкой и решением задачи синтеза. Вместе с тем, метод достаточно прост и отличается предельной ясностью. Очень важно, что метод приводит к явному формульному решению задачи, дает однозначный ответ на вопрос: какой регулятор следует применить на данном объекте и каковы должны быть его параметры настройки. Последнее замечание достаточно значимо, по крайней мере, в учебных целях, так как в литературе по существу нет формализованных процедур, позволяющих однозначно решать задачу синтеза регуляторов. Так, например, в [7, с. 85], в частности, отмечается, что каждый из типовых переходных процессов «...может быть обеспечен *любым* регулятором непрерывного действия». При этом в работах [7, 13] для любого типового переходного процесса предлагаются настройки любого из типовых регуляторов. Если учесть, что требование простоты закона регулирования в настоящее время уже не является существенным, то следует признать неоднозначность рекомендаций работ [7, 13] по выбору структуры регуляторов в современных условиях. Определенная неоднозначность прослеживается также и в известных процедурах параметрической настройки уже выбранного каким-то образом закона регулирования. Здесь достаточно упомянуть о показателе колебательности M, ведь в работе [9] требуется, чтобы он не превышал значения, равного двум, а в работе [14, с. 59-60] вообще утверждается, что «...обоснованные рекомендации по выбору M устанавливают на основании опыта эксплуатации каждого класса систем», т.е. уже после проектирования и внедрения САР. Таким образом, рассмотренный метод, на наш взгляд, незаслуженно обделен вниманием.

Примечательно то, что в ряде случаев полученные настройки достаточно близки к рекомендациям работ [7, 13]. Для объекта второго типа полученные настройки ПИ-регулятора при $\theta = 0$ полностью совпадают с настройками работы [13] для переходного процесса с минимальной квадратичной площадью отклонения от идеального результата. Для объекта первого типа настройка П-регулятора для апериодического переходного процесса и переходного процесса с 20 % перерегулированием в работе [13] отличается от полученной только на постоянный множитель. Для переходного процесса с минимальной квадратичной площадью отклонения настройка П-регулятора в работе [13] отсутствует, причем никаких разъяснений на этот счет не приводится. Для объекта третьего типа в работах [7, 13] вообще нет никаких рекомендаций. Подчеркнем, однако, что в работах [7, 13] не указывается, как была найдена структура приводимых формул для настройки.

4. Свойства сконструированных систем

Нетрудно видеть, что во всех рассмотренных случаях передаточная функция разомкнутой системы $W_{рс}(p)$ получается одинаковой и равной $W_{рс}(p)=\frac{\exp(-\tau_{об}p)}{(\theta+\tau_{об})p}$, поэтому передаточная функция замкнутой САР по задающему воздействию будет равна $W_{зс}(p)=\frac{\exp(-\tau_{об}p)}{(\theta+\tau_{об})p+\exp(-\tau_{об}p)}$.

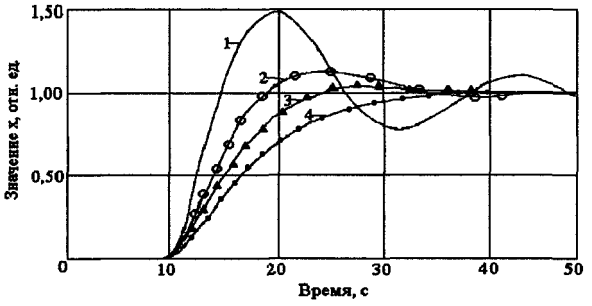
Отсюда следует, что дифференциальное уравнение замкнутой САР будет иметь вид:

$$(\theta+\tau_{об})\frac{dx(t)}{dt}+x(t-\tau_{об})=x^3(t-\tau_{об}). \qquad (9)$$

Решая уравнение (9) для единичного ступенчатого воздействия, найдем переходную функцию замкнутой системы. На рисунке приведены переход-

ные функции САР для $\tau_{об} = 5$ с и различных значений параметра θ : для кривой 1 $\theta = 0$ с; для кривой 2 $\theta = 3$ с; для кривой 3 $\theta = 5$ с; для кривой 4 $\theta = 8$ с.

Как видно из рисунке во всех случаях САР устойчивая, причем с увеличением параметра θ колебательность переходной функции уменьшается, переходный процесс все в большей степени приобретает апериодический характер (демпфированность САР возрастает), причем при $t \to \infty, x \to 1$, т.е. САР астатическая.



Переходные функции САР

Проанализировали влияние параметра $\tau_{об}$ на показатели качества переходных процессов в рассматриваемых САР, определялись перерегулирование σ, время регулирования t_P, а также значения следующих критериев:

$$I_1 = \int_0^{t_K} |\varepsilon(t)|\, dt ; \qquad (10)$$

$$I_2 = \int_0^{t_K} \varepsilon^2(t) dt , \qquad (П)$$

где t_K – конечное время оценки переходного процесса. Здесь время регулирования t_P определялось как время, по истечение которого отклонение регулируемой величины от задания не будет превышать 5 %. Результаты приведены в табл. 1.

Как видно из табл. 1, перерегулирование σ с увеличением параметра $\tau_{об}$ растет, начиная с величины 45 %, однако рост достаточно медленный, в наших расчетах эта величина не превышала 50 %, t_P также растет, причем практически прямо пропорционально увеличению $\tau_{об}$, растут и величины I_1 и I_2, которые оценивают близость переходных процессов к идеальному результату – единичной функции $1(t)$. Таким образом, можно сделать вывод, что чем больше запаздывание объекта управления $\tau_{об}$, тем хуже переходный процесс в системе, сконструированной по рассматриваемому методу. Вместе с тем удалось установить достаточно интересное влияние параметра θ, небольшое положительное значение этого параметра приближает САР к идеалу, уменьшаются все перечисленные показатели (табл. 2). Отметим также, что при некоторых сочетаниях параметров $\tau_{об}$ и θ показатели качества переходного процесса, особенно перерегулирование σ резко меняются, так, например, если $\tau = 1$ с, то при $\theta = 0$ с $\sigma = 45\,\%$, а при $\theta = 1$ с уже $\sigma = 2{,}5\,\%$, при $\theta = 2$ с, $\sigma = 0\,\%$. При этом очевидно, что во многих случаях за счет выбора параметра θ всегда можно добиться приемлемого качества процесса регулирования.

Таблица 1

Показатели качества переходных процессов в САР при $\theta = 0$ с и возмущении по заданию

$\tau_{об}$, с	1,0	2,0	3,0	5,0	7,0	10,0	15,0	20,0
σ, %	45,0	47,5	48,3	48,9	49,2	49,4	49,6	49,7
t_P, с	8,2	16,8	25,4	42,5	70,4	101,6	153,2	204,8
I_1, ед. регулируемой величины×с	2,57	5,45	8,35	14,12	19,75	28,63	43,12	57,62
I_2, ед. регулируемой величины^2×с	15,62	32,58	49,60	83,66	117,72	168,84	254,04	339,25

Таблица 2

Показатели качества переходных процессов в САР при $\theta = 1$ с и возмущении по заданию

$\tau_{об}$, с	1,0	3,0	5,0	10,0
σ, %	2,5	24,1	32,6	40,4
t_P, с	3,4	19,4	33,5	84,6
I_1, ед. регулируемой величины×с	2,10	6,51	11,67	25,46
I_2, ед. регулируемой величины^2×с	15,39	45,19	76,69	158,95

Если проанализировать передаточные функции САР по каналу «возмущение со стороны регулирующего органа – рассогласование», то несложно установить, что квазиоптимальные системы с объектами второго и третьего типов также будут астатическими и в этом случае, однако система с объектом первого типа будет только статической, причем установившаяся ошибка регулирования будет равна $1/k_{\text{р}} = (\tau_{\text{об}} + \theta)/T_{\text{об}}$, т.е. она тем меньше, чем больше коэффициент передачи П-регулятора.

Используя критерий устойчивости Найквиста для систем с запаздыванием [8], нашли, что критическая частота $\omega_{\text{кр}}$ будет равна $\omega_{\text{кр}} = \dfrac{1}{\theta + \tau_{\text{об}}}$, поэтому условие устойчивости замкнутой САР в общем случае запишется так: $\tau_{\text{об}}/(\theta + \tau_{\text{об}}) < \pi/2$. В нашем же случае всегда $\tau_{\text{об}}/(\theta + \tau_{\text{об}}) < 1$, поэтому рассматриваемая САР устойчива.

Отметим также, что в данной работе структуру и настройки автоматических регуляторов выбирали, полагая, что передаточная функция замкнутой системы должна быть следующей $W_{\text{зс}}(p) = \dfrac{\exp(-\tau_{\text{об}} p)}{\theta p + 1}$. Однако на самом деле получилось, что $W_{\text{зс}}(p) = \dfrac{\exp(-\tau_{\text{об}} p)}{(\theta + \tau_{\text{об}}) p + \exp(-\tau_{\text{об}} p)}$. Нетрудно видеть, что поставленная цель все таки достигнута, но с той степенью точности, с какой выполняется соотношение $\exp(-\tau_{\text{об}} p) \approx 1 - \tau_{\text{об}} p$.

5. Некоторые замечания

В.Я. Ротачем в [1, с. 188] предлагается так называемое «...формальное обоснование применимости ПИД-регулятора»: оптимальная передаточная функция регулятора выбирается из условия минимума дисперсии выходной величины САР при отработке эквивалентного возмущения, «...приведенного непосредственно к выходу объекта» [1, с. 180]. Здесь получаемый ответ зависит от вида основного возмущающего воздействия, для возмущения, являющегося, например, белым шумом, оптимальная передаточная функция регулятора будет одной, а для возмущения другого типа совсем другой. Заметим, что, применяя этот метод, иногда можно получить результаты, достаточно близкие к тем, что следуют из вышеизложенной методики. Так, например, для объекта управления с передаточной функцией третьего типа В.Я. Ротач, полагая, что САР обладает высоким показателем технологической работоспособности, т.е. при низкочастотном характере основных возмущений получает совершенно такой же результат, что получен нами для $W_{\text{зс}}(p) = \exp(-\tau_{\text{об}} p)$. Вместе с тем, как нам представляется, вышеизложенный способ синтеза, во-первых, заметно проще по содержанию, чем способ [1], во-вторых, не требует определения характера возмущающих воздействий и, в-третьих, предпочтительнее потому, что задача у САР вообще-то двоякая: как можно точнее отрабатывать задание, влияние же возмущений на регулируемую величину при этом должно быть как можно менее заметным (САР должна отрабатывать два вида воздействий – это задающие и возмущающие воздействия). При этом хорошо известно, что «...реакция регулируемой величины на скачок задающей позволяет судить о том, насколько хорошо оптимизирован контур и по отношению к возмущениям» [4, с. 6], т.е. безусловно предпочтительнее использовать способ синтеза, ориентированный на оптимальную отработку задающего воздействия. Кроме того, аргументы, приведенные В.Я. Ротачем [1, с. 190, с. 191]), являются, по существу, одним из вариантов обоснования структуры регулятора Ресвика.

В работах А.З. Сметаны [15–18] утверждается, что для объекта с передаточной функцией в виде звена чистого запаздывания $W_{\text{об}}(p) = \exp(-\tau_{\text{об}} p)$ найдена (на оптимизаторе!?) передаточная функция оптимального регулятора, эта передаточная функция имеет вид $W_{\text{р}}(p) = \dfrac{0{,}75(0{,}5\tau_{\text{об}} p + 1)}{\tau_{\text{об}} p}$, очевидно, что это ПИ-регулятор. По-видимому, никакой формализованной процедуры выбора структуры регулятора у автора нет, речь может идти лишь об определении оптимальных параметров настройки регулятора, при этом критерием оптимальности здесь является функционал $I = \int_0^\infty |\varepsilon| dt$. Вместе с тем заметим, что в работе [19, с. 242] существенно аргументировано (достаточно обоснованно) показывается, что для звена чистого запаздывания идеальным регулятором является И-регулятор, такой же результат получается и при применении рассматриваемого способа синтеза САР: действительно, подставляя $W_{\text{об}}(p) = \exp(-\tau_{\text{об}} p)$ в (8) и учитывая используемые допущения, получим, что $W_{\text{р}}(p) = \dfrac{1}{(\theta + \tau_{\text{об}}) p}$.

Далее, сообщается, что если объект имеет передаточную функцию вида $W_{\text{об}}(p) = \exp(-\tau_{\text{об}} p) W_1(p)$, то передаточная функция оптимального регулятора будет такой: $W_{\text{р}}(p) = \dfrac{0{,}75(0{,}5\tau_{\text{об}} p + 1)}{\tau_{\text{об}} p W_1(p)}$. При этом автор предлагает описывать широкий класс объектов управления следующей, якобы «нестандартной», передаточной функцией:

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

где λ – некоторый параметр. Выбор такой передаточной функции автор в работе [15] объясняет тем, что «...большинство объектов регулирования в теплоэнергетике описываются передаточными

функциями, характеристические уравнения которых имеют комплексные корни», «...известные модели типа $\exp(-\tau_{об}p)/(T_{об}p+1)$ или более сложные $\exp(-\tau_{об}p)/[(T_{об}p+1)(T_1p+1)^n]$ имеют характеристические уравнения только с действительными корнями». Нетрудно видеть, что данный предлог является достаточно надуманным, никакой необходимости во включении в этом случае в знаменатель передаточной функции трансцендентного члена $e^{-\lambda p}$ нет, достаточно записать знаменатель передаточной функции объекта в виде многочлена общего вида относительно ρ, как известно, всякий такой многочлен с действительными коэффициентами и со степенью, начиная со второй и выше, может иметь как действительные, так и комплексные корни. Затем же А.З. Сметана указывает, что данная передаточная функция «...может быть преобразована в передаточную функцию третьего или второго порядка с запаздыванием», т.е. происходит возврат к так называемому стандартному представлению динамических свойств объектов управления. Поэтому естественно возникает вопрос: так в чем же заключается оригинальность и новизна работы?

Если использовать метод А.З. Сметаны, то передаточная функция разомкнутой САР будет иметь вид:

$$W_{рс}(p)=\frac{0,75(0,5\tau_{об}p+1)\exp(-\tau_{об}p)}{\tau_{об}p},$$

поэтому передаточная функция замкнутой САР по задающему воздействию будет равна:

$$W_{зс}(p)=\frac{0,75(0,5\tau_{об}p+1)\exp(-\tau_{об}p)}{\tau_{об}p+0,75(0,5\tau_{об}p+1)\exp(-\tau_{об}p)}.$$

Отсюда следует, что дифференциальное уравнение замкнутой САР будет следующим:

$$(\tau_{об}/0,75)\frac{dx(t)}{dt}+0,5\tau_{об}\frac{dx(t-\tau_{об})}{dt}+$$

$$x(t-\tau_{об})=0,5\tau_{об}\frac{dU(t-\tau_{об})}{dt}+U(t-\tau_{об}), \quad (12)$$

т.е. получается довольно близкая к (9) структура. Однако следует заметить, что все результаты получены автором работ [15-18] достаточно сложным, запутанным и не совсем «прозрачным» путем. В работе [16] приводится условие устойчивости систем с такими передаточными функциями, это условие применительно к нашему случаю полностью совпадает с вышеприведенным неравенством. В этой же работе [16] указывается, что если при этом $0\le\tau_{об}/(\theta+\tau_{об})\le 0,37$, то переходный процесс в САР монотонный, если $0,37<\tau_{об}/(\theta+\tau_{об})<\pi/2$ - колебательный затухающий, при $\tau_{об}/(\theta+\tau_{об})>\pi/2$ переходный процесс колебательный расходящийся. Численное моделирование показало также, что область монотонных переходных процессов, выделяемая автором работы [16] неравенством

$$0\le\tau_{об}/(\theta+\tau_{об})\le 0,37$$

подтверждается, однако, только приближенно.

Как показал анализ литературных источников, некоторые из вышеприведенных результатов при определенных допущениях можно получить и методами работ [1, 19]. Однако, в частности, подход работы [19] излишне усложнен: задача решается методом эвристического конструирования алгоритмической структуры идеальной САР, при этом в процессе решения (задачи структурно-параметрического синтеза) используются структуры *практически нереализуемых* регулятора Ресвика и предиктора Смита. Найденная таким образом структура идеального регулятора, как отмечает и сам автор [19, с. 240, с. 241], имеет ряд недостатков. Так в работе [19, с. 241], в частности, утверждается, что «...существенным недостатком системы с регулятором Ресвика является ее критичность или сильная чувствительность к малым вариациям запаздывания объекта: система устойчива только при точном равенстве запаздывания объекта и запаздывания» модели. Однако при этом никаких конкретных данных не приводится, по-видимому, этот вопрос - вопрос исследования грубости структур с регуляторами типа Ресвика все-таки еще требует детального исследования. Предложенная процедура решения задачи, на наш взгляд, заметно проще, причем на всех этапах решения получаются структурно устойчивые регуляторы и системы, кроме того, конкретно робастность предлагаемых нами структур и настроек регуляторов, насколько это нам известно, еще не исследована.

В работе [20] задача структурно-параметрического синтеза автоматических регуляторов решается методом В.Я. Ротача [1]. Если найденная таким образом передаточная функция регулятора не выражается через передаточные функции П-, И-, ПИ-, ПИД-регуляторов, то методом разложения в цепную дробь, а в сложных случаях, дополнительно, проводя предварительную декомпозицию задачи, эту передаточную функцию представляют в виде соединения «...двух-трех типовых законов» [20]. Данная процедура применяется авторами также и к так называемому восстановительно-прогнозирующему регулятору (ВП-регулятору). Таким образом, устанавливается приближенная связь между квазиоптимальными и типовыми законами регулирования.

Понятно, что недостатки метода [1] целиком и полностью присутствуют и в работе [20], кроме того, метод работы [20] нельзя назвать полностью формализуемым.

Следует заметить, что представление динамических свойств реальных объектов управления приведенными передаточными функциями, как известно, является достаточно приближенным.

Неоптимальными могут быть как структура математической модели объекта, так и численные значения ее параметров, т.е. возможно неоднозначное решение этих вопросов. Так, например, в работах [21, 22] утверждается, что «...во многих случаях ... динамика объектов регулирования с достаточной точностью может быть представлена передаточными функциями без учета транспортного (чистого) запаздывания» [22, с. 56] и что запаздывание авторами называется «кажущимся» [22, с. 56]. Вместе с тем следует отметить, что подавляющее большинство исследователей все-таки отдают предпочтение моделям с запаздыванием, здесь следует отметить работы [5-7, 9, 13, 14, 19]. Звено чистого запаздывания, если оно присутствует в модели объекта управления, переносится в характеристическое уравнение замкнутой системы, что делает невозможным применение некоторых аналитических методов синтеза автоматических регуляторов. Этим, как нам представляется, в частности, и объясняется стремление некоторых авторов исключить это затруднение. Кстати говоря, структура прогнозатора Смита такова, что позволяет уничтожить именно запаздывание в характеристическом уравнении замкнутой системы.

Так как качество выбора и настройки автоматических регуляторов напрямую зависит от решения задачи построения математической модели объекта управления, то качество переходных процессов в реальных системах может отличаться от ожидаемого и весь вопрос состоит в том, насколько в каждом конкретном случае будет допустимым это отличие. Сконструированная САР, в частности, может и не удовлетворять такому требованию как робастность [25], этот вопрос, как и в целом вопрос о приемлемости для практики рассмотренного способа синтеза САР требуют конкретных исследований и достаточно тщательной проверки. Вместе с тем нельзя не упомянуть, что уже частичное одобрение и применение способа можно усмотреть в работах [7, 13], а также в работах [9, 14, 23, 24] и других. В данном же случае ограничимся исследованием того, как точность определения времени запаздывания объекта сказывается на свойствах системы. Выполненные расчеты показали, что если параметры объекта определены точно, то при $\theta = 0\,\text{с}$ перерегулирование $\sigma = 49\,\%$. Если же параметры объекта определены неточно, причем если время запаздывания модели $\tau_{мод}$ меньше времени запаздывания, имеющего место на реальном объекте, $\tau_{об}$ то перерегулирование возрастает. Так, например, если $\tau_{мод} = 4\,\text{с}$, а $\tau_{об} = 5\,\text{с}$, то $\sigma = 72\,\%$. САР в такой ситуации, когда из-за погрешности параметрической идентификации получилось, что $\tau_{мод} < \tau_{об}$, может и потерять устойчивость. В самом деле, если структура математической модели объекта и все ее параметры, кроме времени запаздывания, определены достаточно точно, то во всех рассмотренных случаях передаточная функция разомкнутой системы получается одинаковой и равной $W_{рс}(p) = \dfrac{\exp(-\tau_{об} p)}{(\theta + \tau_{мод})p}$, поэтому САР будет устойчива лишь при удовлетворении следующего неравенства: $\tau_{об} / (\theta + \tau_{мод}) < \pi / 2$.

Влияние $\tau_{мод} > \tau_{об}$ аналогично увеличению параметра θ, т.е. демпфированность САР возрастает.

В заключение заметим, что в работах [23, с. 132, 26, с. 182] указывается, что передаточная функция замкнутой системы может быть выбрана в виде инерционного звена с чистым запаздыванием, однако при этом порядок инерционного звена не оговаривается и никаких аргументов, обоснований для такого выбора не приводится, что позволяет заключить, что у авторов по данному вопросу нет никаких особых предпочтений. По нашему мнению, данные предложения - это ничто иное, как один из вариантов задания передаточной функции замкнутой системы.

Заключение

Приводится некоторое формальное обоснование применимости семейства ПИД-регуляторов на промышленных объектах. Анализируются свойства сконструированных систем автоматического регулирования.

Литература

1.Ротач, В. Я. Теория автоматического управления: учебник для вузов / В. Я. Ротач. - М.: Изд-во МЭИ, 2004. - 400 с.

2. Панферов, В. И. Об одном подходе к решению задачи выбора и настройки автоматических регуляторов / В. И. Панферов // Известия Челябинского научного центра. — 2004. — Вып. 4(26). — С. 139-144.

3. Панферов, В. И. Выбор и настройка автоматических регуляторов в системах теплоснабжения / В. И. Панферов // Вестник ЮУрГУ. Серия «Строительство и архитектура». - Челябинск: Изд-во ЮУрГУ, 2005. -Вып. 3, № 13(53). - С. 81-84.

4. Фрер, Ф. Введение в электронную технику регулирования / Ф. Фрер, Ф. Орттенбургер. — М.: Энергия, 1973. - 190 с.

5. Мань, Н. В. Оптимальный синтез робастной каскадной автоматической системы управления / Н. В. Мань // Теплоэнергетика. - 2000. -№9. -С. 22-28.

6. Воронов, А. А. Основы теории автоматического управления. Автоматическое регулирование непрерывных линейных систем / А. А. Воронов. - М.: Энергия, 1980. - 312 с.

7. Копелович, А. П. Инженерные методы расчета при выборе автоматических регуляторов /

А. П. Копелович. - М.: Металлургиздат, 1960. - 190 с.

8. Теория автоматического управления: ч. 1: Теория линейных систем автоматического управления/Под ред. А. А. Воронова. - М.: Высш. школа, 1977.-304 с.

9. Теория автоматического управления: учебник для вузов / Под ред. А. В. Нетушила. — М.: Высшая школа, 1976. - 400 с.

10. Цыпкин, Я. З. Основы теории автоматических систем /Я. З. Цыпкин. - М.: Наука, 1977. - 560 с.

П.Гончаров, В. И. Синтез робастных регуляторов низкого порядка / В. И. Гончаров, А. В. Лиепиньш, В. А. Рудницкий // Изв. РАН. Теория и системы управления. - 2001. -№ 4. -С. 36-43.

12. Лозгачев, Г. И. Построение модальных робастных регуляторов по передаточной функции замкнутой системы / Г. И. Лозгачев, Л. А. Тютюнникова // Изв. РАН. Теория и системы управления. -2006. -№4.-С. 5-8.

13. Проектирование систем контроля и автоматического регулирования металлургических процессов / Г. М. Глинков, В. А. Маковский, С. Л. Лотман, М. Р. Шапировский; под ред. Г. М. Глинкова. — М.: Металлургия, 1986. — 352 с.

14. Кулаков, Г. Т. Инженерные экспресс-мето-ды расчета промышленных систем регулирования: справ, пособие / Г. Т. Кулаков. - Минск: Вышэйшая школа, 1984. -192 с.

15. Сметана, А. З. Методика расчета параметров настройки систем автоматического регулирования теплоэнергетических процессов / А. З. Сметана // Теплоэнергетика. — 2002. —№10. -С. 40-45.

16. Сметана, А. З. Методика определения передаточной функции линейного динамического объекта по его переходной характеристике / А. З. Сметана // Изв. РАН. Энергетика. - 1998. - №2. -С. 142-155.

17. Сметана, А. З. Методика определения параметров настройки регуляторов теплоэнергетических процессов / А. З. Сметана // Изв. РАН. Энергетика. - 2001. -№2.-С 80-87.

18. Сметана, А. З. Автоматическая и автоматизированная настройка регуляторов теплоэнергетических процессов / А. З. Сметана // Теплоэнергетика. -2004. -№ 11.-С. 47-52.

19. Лукас, В. А. Теория автоматического управления /В. А. Лукас. -М: Недра, 1990. - 416 с.

20. Кулаков, СМ. О приближенном соответствии между квазиоптимальными и типовыми законами управления / С. М. Кулаков, В. В. Штефан, С. П. Огнев, И. А. Штефан // Изв. вузов. Черная металлургия. -1999. -№4.-С 33-40.

21. Чертков, Н. К. Аналитические формулы оптимальной настройки авторегуляторов / Н. К. Чертков, С. В. Корябина // Теплоэнергетика. -1969.-№9. -С. 28-30.

22. Чертков, Н. К. Пакет компьютерных программ для настройки систем автоматического регулирования / Н К. Чертков, В. Н Чертков // Теплоэнергетика. -2007. -№9. -С. 56-60.

23. Скаржепа, В. А. Тиристорные цифровые регуляторы температуры / В. А. Скаржепа, К. В. Шелехов, А. С. Герасимов. - Киев: Техника, 1979. -144 с.

24. Петелин, Д. П. Автоматизация производственных процессов текстильной промышленности: учебник для вузов, в 5 кн.; кн. 1: Основы автоматики и технические средства автоматизации в текстильной промышленности /Д. П. Петелин, Э. М. Ромаш, А. Б. Козлов и др. - М.: Легпромбытиздат, 1992. — 240 с.

25.Дорф, Р. Современные системы управления / Р. Дорф, Р. Бишоп - М.: Лаборатория Базовых Знаний, 2002. - 832 с.

26. Медведев, Р. Б. АСУ ТП в металлургии / Р. Б. Медведев, Ю. Б. Бондарь, В. Д. Романенко. - М.: Металлургия, 1987. - 256 с.

Поступила в редакцию 2 октября 2008 г.