

НАСТРОЙКА ТРЕХКОНТУРНОЙ СИСТЕМЫ РЕГУЛИРОВАНИЯ ТЕМПЕРАТУРЫ ПАРА МЕТОДОМ ЭВОЛЮЦИОННОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ

Смирнов Н.И., Сабанин В.Р., кандидаты техн. наук,
Репин А.И., Бочкарева Е.Ю., инж

Приводятся результаты настройки ПИ-регулятора и двух дифференциаторов применительно к трехконтурной системе регулирования температуры пара с двумя опережающими скоростными сигналами, предложенной в [1]. Расчет выполнен численным методом имитационного моделирования с применением авторской версии эволюционного алгоритма оптимизации [2].

В статье [1] приведены результаты модельного исследования трехконтурной автоматической системы регулирования температуры пара с двумя опережающими скоростными сигналами и ПИ-регулятором.

В практике автоматического регулирования технологических процессов обычно применяются двухконтурные АСР, расчет которых можно выполнить с помощью аналитических методов, в основе которых лежат как одношаговые, так и многошаговые итерационные процедуры. Наибольшее распространение получил метод поиска с применением итерационной многошаговой процедуры [3] и метод многомерного сканирования [4]. Эти методы практически снимают ограничения на различие инерционностей основного и вспомогательного каналов объекта регулирования. Рассмотренные методы с учетом упрощающих допущений могут быть применены и к расчету трехконтурных АСР, однако, расчетные процедуры при этом станут достаточно сложными и трудоемкими, особенно в случае применения законов регулирования с большим числом настроечных параметров.

Применение классических методов оптимизации, основанных на градиенте целевой функции в связи с её возможной многоэкстремальностью не может гарантировать нахождение наилучшего решения. Поэтому для решения подобных задач целесообразно использовать алгоритмы глобальной оптимизации. В последнее время в практике решения многопараметрических и многоэкстремальных оптимизационных задач широкое распространение получили эволюционные алгоритмы, представляющие собой совокупность генетического программирования и эволюционных стратегий.

В предлагаемой статье для оптимальной настройки трехконтурной АСР использовалась авторская версия эволюционного алгоритма оптимизации "Optim-MGA". Алгоритм реализован в виде универсальной программы "Optim-MGA" для ЭВМ, зарегистрированной в Российском агентстве по патентам и товарным знакам [2] и в виде пользовательской программы для MathCAD [5]. Алгоритм работает в контексте Particle Swarm Optimization (PSO) [9]. В соответствии с PSO множество точек может быть представлено как популяция взаимодействующих элементов (особей), передвигающихся в n-мерном пространстве поиска с целью нахождения наилучшего решения на каждом шаге вычислений. Следует заметить, что концепция PSO не использует операций кроссовера и мутации, характерных для генетических алгоритмов. На каждом шаге работы такого алгоритма осуществляется селекция особей популяции, удаляется часть наихудших особей, место которых занимают потомки. Для их определения в алгоритме используются операции метода Нелдера и Мида, такие как отражение, растяжение, сжатие и редукция (метод деформируемого многогранника). В работе [6] авторами была представлена информационная блок-схема алгоритма "Optim-MGA" и рассмотрен пример расчета настроечных параметров двухконтурной АСР с ПИ-регулятором и дифференциатором.

Значения целевой функции при настройке трехконтурной АСР вычислялись по имитационной цифровой модели системы. Идея цифровой модели состоит в замене дифференциальных уравнений на разностные. Авторами использовался метод Рунге-Кутты второго порядка. Решение разностных уравнений при малом шаге приближаются к решению дифференциального уравнения. Моделирование анализируемой системы регулирования практически было сведено к моделированию аperiodических звеньев, описываемых дифференциальными уравнениями первого порядка, а использование метода Рунге-Кутты второго порядка в значительной степени снизило чувствительность модели к интервалу дискретности вычисления.

Для обеспечения заданного запаса устойчивости использовался частотный показатель колебательности M_{don} , определяемый в виде максимального значения амплитудно-частотной характеристики АЧХ замкнутой системы на резонансной частоте. Для многоконтурной АСР требуется, чтобы этот показатель для всех ее замкнутых контуров не превышал заданной допустимой величины.

Динамические характеристики объекта регулирования

Положенная в основу имитационной модели структурная схема автоматической системы регулирования с двумя опережающими скоростными сигналами представлена на рис. 1.

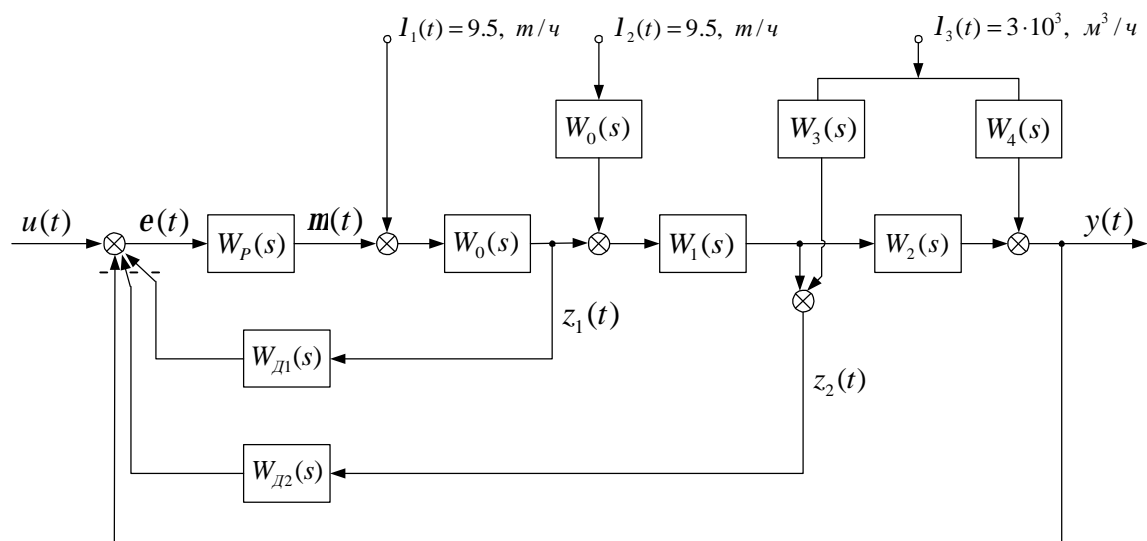


Рис. 1. Структурная схема АСР температуры перегретого пара с двумя опережающими скоростными сигналами

Динамические характеристики объекта по каналу регулирующего воздействия $\mu(t)$ представлены в виде последовательного соединения трех участков: опережающего $W_0(s)$, промежуточного $W_1(s)$ и выходного $W_2(s)$. Выражения передаточных функций этих участков приведены ниже:

$$\begin{aligned}
 W_0(s) &= -2.9 \cdot \frac{1}{20 \cdot s + 1}; \\
 W_1(s) &= 0.98 \cdot e^{-30 \cdot s} \cdot \frac{20 \cdot s + 1}{(33 \cdot s + 1)^3}; \\
 W_2(s) &= 0.98 \cdot e^{-25 \cdot s} \cdot \frac{(33 \cdot s + 1)^3}{(37.5 \cdot s + 1)^4}.
 \end{aligned}
 \tag{1}$$

Обычно при решении задач анализа и синтеза АСР в качестве основного возмущения рассматривают воздействие по каналу регулирующего органа $\lambda_1(t)$. Однако наибольший интерес при анализе представленной схемы представляет не перехватываемое опережающим сигналом $z_1(t)$ возмущение расходом воды на второй впрыск $\lambda_2(t)$, и совместное возмущение расходом газа и расходом общего воздуха в котел $\lambda_3(t)$. Для них на схеме показаны точки приложения через передаточные функции $W_0(s)$, $W_3(s)$ и $W_4(s)$. Выражения передаточных функций $W_3(s)$ и $W_4(s)$ имеют вид:

$$W_3(s) = \left[7.7 - \frac{6.3}{(60 \cdot s + 1)^2} \right] \cdot \frac{e^{-10 \cdot s}}{(54.5 \cdot s + 1) \cdot (20 \cdot s + 1)};$$

$$W_4(s) = \left[11.8 - \frac{9.7}{(60 \cdot s + 1)^2} \right] \cdot \frac{e^{-10 \cdot s}}{(92.5 \cdot s + 1) \cdot (20 \cdot s + 1)}.$$
(2)

Регулятор реализует ПИ-алгоритм с передаточной функцией:

$$W_p(s) = K_p + \frac{K_u}{s},$$
(3)

где K_p - коэффициент усиления; $K_u = \frac{K_p}{T_u}$ - коэффициент интегральной составляющей (T_u - интегральная постоянная времени).

На вход регулятора поступает сигнал по главной температуре $y(t)$, два опережающих сигнала от дифференциаторов $W_{Д1}(s)$ и $W_{Д2}(s)$ и сигнал по заданию $u(t)$.

Скоростные опережающие сигналы формируются дифференциаторами с передаточными функциями:

$$W_{Д1}(s) = \frac{K_{Д1} \cdot T_{Д1} \cdot s}{T_{Д1} \cdot s + 1} \text{ и } W_{Д2}(s) = \frac{K_{Д2} \cdot T_{Д2} \cdot s}{T_{Д2} \cdot s + 1},$$
(4)

где $K_{Д1}$ и $K_{Д2}$ - коэффициенты усиления, а $T_{Д1}$ и $T_{Д2}$ - постоянные времени дифференцирования, являющиеся параметрами настройки дифференциаторов.

Формирование критерия оптимальности

Для оценки качества регулирования при настройке АСР наиболее часто применяется

линейный интеграл на интервале времени переходного процесса t_p $I_L = \int_0^{t_p} y(t) \cdot dt$, имеющий

аналитическую связь с настроечными параметрами регулирующего устройства. Однако, с точки зрения численных поисковых процедур, предпочтение следует отдать абсолютному интегралу

по модулю $I_M = \int_0^{t_p} |y(t)| \cdot dt$, поскольку он в отличие от линейного имеет экстремальный

характер, что делает процедуру поиска оптимума устойчивой [7]. Поскольку для анализируемой АСР рассматривается возможность действия трех видов возмущений $\lambda_1(t)$, $\lambda_2(t)$ и $\lambda_3(t)$, то в качестве критерия предлагается рассматривать сумму интегралов по модулю главной регулируемой величины $y(t)$ от последовательно вводимых перечисленных возмущений.

Такой критерий выбран в качестве примера. АСР может быть настроена на минимум интеграла по модулю I_M по любому возмущению в отдельности и на любую их комбинацию. Следует заметить, что оптимизация по λ_1 в силу малоинерционности опережающего контура $W_o(s)$ без ограничений на настроечные параметры регулятора приводит к настройкам, практически сводящим выбранный критерий к нулю. При этом получаются большие значения K_p и малые значения T_u . Их практическая реализация в традиционно применяемых релейно-импульсных регуляторах с исполнительными механизмами постоянной скорости вызывает затруднения. В этом случае на настроечные параметры регулятора могут быть наложены ограничения, с учетом рекомендаций, изложенных в [8], что позволит получить настройки, реализуемые на реальных технических средствах автоматизации.

Для обеспечения заданного запаса устойчивости в целевой критерий вводились ограничения в виде функций штрафа на допустимую величину показателя колебательности для каждого из трех контуров анализируемой АСР. Рассматривались ограничения двух типов: жесткие, если функции штрафа записаны в виде равенств и нежесткие, если штрафные функции записываются в виде неравенств. В случае жестких ограничений целевая функция принимает вид:

$$F = I_{m,\lambda_1} + I_{m,\lambda_2} + I_{m,\lambda_3} + \alpha \cdot \left| M_{\partial on}^{z1} - A_{3c}^{z1}(\omega_p) \right| + \beta \cdot \left| M_{\partial on}^{z2} - A_{3c}^{z2}(\omega_p) \right| + \gamma \cdot \left| M_{\partial on}^y - A_{3c}^y(\omega_p) \right|, \quad (5)$$

где ω_p - резонансная частота соответствующего контура, α, β, γ - норма штрафа на отклонение показателя колебательности соответствующего контура от заданного значения.

Для нежестких ограничений критерий оптимальности запишется в виде:

$$\begin{aligned} F = & I_{m,\lambda_1} + I_{m,\lambda_2} + I_{m,\lambda_3} + \\ & + \alpha \cdot \left\{ \left| A_{3c}^{z1}(\omega_p) - M_{\partial on}^{z1} \right|, \text{если } A_{3c}^{z1}(\omega_p) > M_{\partial on}^{z1}; 0, \text{если } A_{3c}^{z1}(\omega_p) \leq M_{\partial on}^{z1} \right\} + \\ & + \beta \cdot \left\{ \left| A_{3c}^{z2}(\omega_p) - M_{\partial on}^{z2} \right|, \text{если } A_{3c}^{z2}(\omega_p) > M_{\partial on}^{z2}; 0, \text{если } A_{3c}^{z2}(\omega_p) \leq M_{\partial on}^{z2} \right\} + \\ & + \gamma \cdot \left\{ \left| A_{3c}^y(\omega_p) - M_{\partial on}^y \right|, \text{если } A_{3c}^y(\omega_p) > M_{\partial on}^y; 0, \text{если } A_{3c}^y(\omega_p) \leq M_{\partial on}^y \right\} \end{aligned} \quad (6)$$

Выражения для АЧХ, позволяющие на резонансной частоте определять величину показателя колебательности для всех замкнутых контуров с учетом принятых на рис. 1 обозначений, будут иметь вид:

$$\begin{aligned} A_{3c}^{z1}(\omega) &= \left| \frac{W_0(j\omega) \cdot W_{D1}(j\omega) \cdot W_P(j\omega) + W_0(j\omega) \cdot W_1(j\omega) \cdot W_{D2}(j\omega) \cdot W_P(j\omega) + W_0(j\omega) \cdot W_1(j\omega) \cdot W_2(j\omega) \cdot W_P(j\omega)}{1 + W_0(j\omega) \cdot W_{D1}(j\omega) \cdot W_P(j\omega) + W_0(j\omega) \cdot W_1(j\omega) \cdot W_{D2}(j\omega) \cdot W_P(j\omega) + W_0(j\omega) \cdot W_1(j\omega) \cdot W_2(j\omega) \cdot W_P(j\omega)} \right|; \\ A_{3c}^{z2}(\omega) &= \left| \frac{W_0(j\omega) \cdot W_1(j\omega) \cdot W_{D2}(j\omega) \cdot W_P(j\omega) + W_0(j\omega) \cdot W_1(j\omega) \cdot W_2(j\omega) \cdot W_P(j\omega)}{1 + W_0(j\omega) \cdot W_{D1}(j\omega) \cdot W_P(j\omega) + W_0(j\omega) \cdot W_1(j\omega) \cdot W_{D2}(j\omega) \cdot W_P(j\omega) + W_0(j\omega) \cdot W_1(j\omega) \cdot W_2(j\omega) \cdot W_P(j\omega)} \right|; \\ A_{3c}^y(\omega) &= \left| \frac{W_0(j\omega) \cdot W_1(j\omega) \cdot W_2(j\omega) \cdot W_P(j\omega)}{1 + W_0(j\omega) \cdot W_{D1}(j\omega) \cdot W_P(j\omega) + W_0(j\omega) \cdot W_1(j\omega) \cdot W_{D2}(j\omega) \cdot W_P(j\omega) + W_0(j\omega) \cdot W_1(j\omega) \cdot W_2(j\omega) \cdot W_P(j\omega)} \right|. \end{aligned} \quad (7)$$

Нормы штрафа для всех ограничений были приняты равными 1000, а резонансные частоты на каждом шаге оптимизации определялись по максимумам АЧХ. При необходимости ограничения могут вводиться как на отдельные настроечные параметры, так и на прямые

показатели качества, такие как степень затухания, перерегулирование, время переходного процесса и другие показатели по желанию разработчика.

Пример расчета трехконтурной системы регулирования температуры пара с двумя опережающими скоростными сигналами

Настройка анализируемой трехконтурной АСР проводилась из условия компромисса с учетом всех действующих возмущений $\lambda_1(t)$, $\lambda_2(t)$ и $\lambda_3(t)$ в соответствии с критериями (5, 6). Варианты полученных значений настроечных параметров, включая случай без ограничения на показатели колебательности контуров, приведены в табл. 1.

Таблица 1. Настроечные параметры для анализируемых вариантов

№ п/п	Варианты	$W_p(s)$		$W_{Д1}(s)$		$W_{Д2}(s)$	
		K_p $\frac{m/ч}{°C}$	K_u $\frac{m/ч}{°C \cdot c}$	$K_{Д1}$ -	$T_{Д1}$ с	$K_{Д2}$ -	$T_{Д2}$ с
1	Без ограничений	22,10	16,500	0,27	176,0	1,47	33,0
2	Жесткие ограничения для всех контуров, $M_{дон}=1,55$	0,28	0,182	0,61	76,2	1,47	37,8
3	Жесткие ограничения для всех контуров, $M_{дон}=1,20$	2,00	0,421	0,69	82,0	1,56	38,0
4	Нежесткие ограничения для всех контуров, $M_{дон} \leq 1,55$	2,21	0,475	0,76	62,3	1,85	39,9
5	Жесткие ограничения на параметры регулятора $K_p = 1,0 \frac{m/ч}{°C}$, $T_u = 20$ с, и нежесткие на M для всех контуров, $M_{дон} \leq 1,20$	1,00	0,05	0,62	106,7	2,37	26,3
6	Настройки по данным [1]	0,69	0,0345	1,50	95,0	2,00	76,00

Авторами было выполнено моделирование переходных процессов при всех видах возмущающих воздействий, включая возмущение заданием $u(t)$. Величины возмущений выбирались в соответствии с данными, приведенными в [1].

Возмущения $\lambda_1(t)$ практически полностью и быстро компенсировались малоинерционным внутренним контуром, а переходные процессы при возмущении по заданию с учетом того, что задание можно вводить с помощью интегрирующего задатчика и получать желаемый качественный характер процессов, в предлагаемой статье не рассматриваются. В связи с этим, наибольший интерес, как отмечено и в [1], представляют переходные процессы при возмущениях $\lambda_2(t)$ и $\lambda_3(t)$.

Сравнительный характер переходных процессов, соответствующих вариантам настроек 1,2,3 (табл. 1) показаны на рис. 2, а соответствующие этим настройкам АЧХ всех контуров приведены на рис. 3.

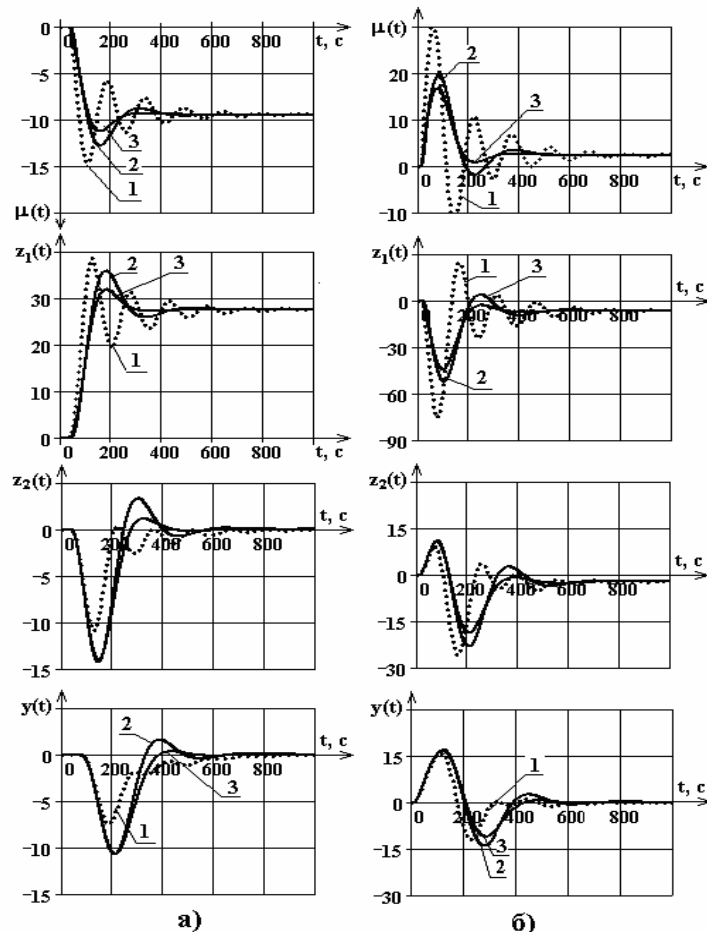


Рис. 2. Переходные процессы в трехконтурной АСР температуры перегретого пара при ступенчатом возмущении $\lambda_2(t) = 9,5 \text{ Т/ч}$ (а) и $\lambda_3(t) = 3 \cdot 10^3 \text{ м}^3/\text{ч}$ (б) (обозначения параметров соответствуют рис. 1, а цифры переходных процессов вариантам табл.1)

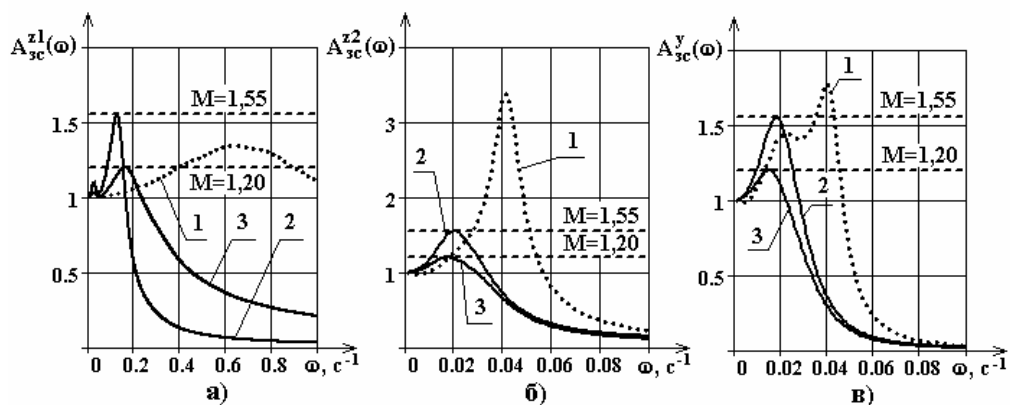


Рис. 3. АЧХ внутреннего опережающего (а), промежуточного (б) и внешнего контура (в) (цифры соответствуют вариантам табл.1)

Как показали проведенные исследования, введение нежестких ограничений на M_{don} приводит к лучшим результатам по сравнению с жесткими ограничениями. Результаты сравнения вариантов 2 и 4 (табл. 1) представлены на рис. 4 и рис. 5, а также в табл. 2.

Интегральные показатели переходных процессов при нежестких ограничениях (табл. 2) снижаются на 15÷20 %.

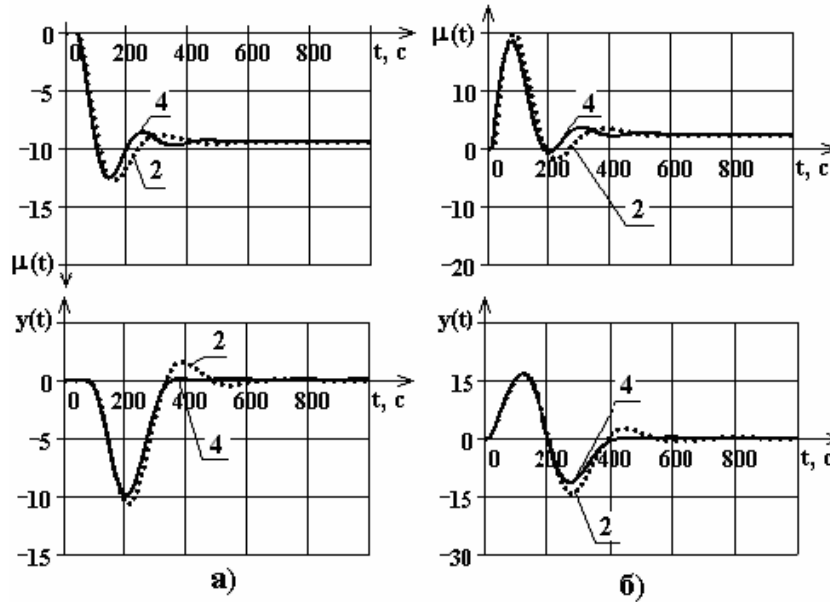


Рис. 4. Переходные процессы при ступенчатых возмущениях

$$\lambda_2(t) = 9,5 \text{ т/ч (а) и } \lambda_3(t) = 3 \cdot 10^3 \text{ м}^3/\text{ч (б)}$$

(цифры переходных процессов соответствуют вариантам табл.1)

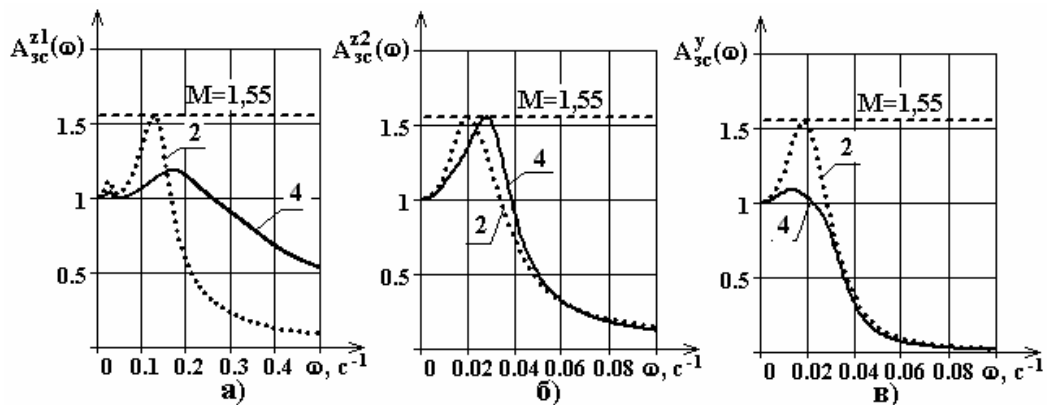


Рис. 5. АЧХ внутреннего опережающего (а), промежуточного (б) и внешнего контура (в)
(цифры АЧХ соответствуют вариантам настроек табл.1)

При малой инерционности опережающего участка $W_o(s)$ (апериодическое звено без запаздывания) представляется возможным устанавливать в регуляторе сколь угодно большие значения коэффициента передачи, что может привести к полному устранению эффекта действия идущего со стороны регулирующего органа возмущения $\lambda_1(t)$ на основную регулируемую величину $y(t)$. На практике величина коэффициента передачи регулятора всегда ограничена и зависит от технического исполнения каждой конкретной системы. С учетом того,

что в нашем случае $T_{об} = 20 \text{ с.}$, а $K_{об} = 2,9 \frac{\text{°C}}{\text{м/ч}}$ и в соответствии с рекомендациями [1,8] для

варианта 5 было принято $K_p = 1,0 \frac{\text{м/ч}}{\text{°C}}$, а $K_u = \frac{K_p}{T_u} = 0,05 \frac{\text{м/ч}}{\text{°C} \cdot \text{с}}$. Результаты расчета с

ограничением на параметры регулятора и нежесткими ограничениями $M_{дон} \leq 1,20$ приведены в табл.1 (вариант 5). Выбор сравнительно небольшой величины показателя колебательности

можно объяснить чисто технологическими требованиями, связанными с желанием ограничить температуры перегретого пара.

Результаты моделирования представлены на рис. 6. Там же, для сравнения приведены переходные процессы, полученные по данным [1], (вариант 6, табл. 1).

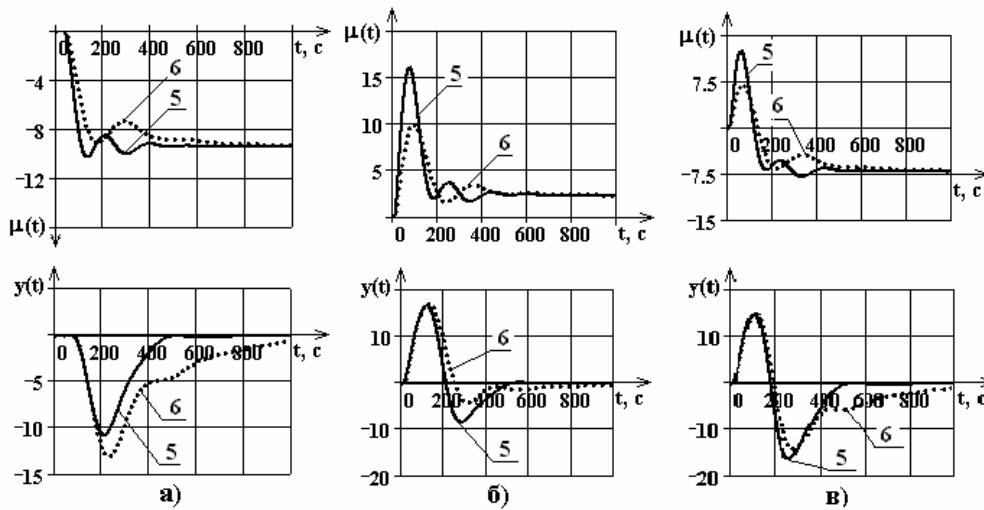


Рис. 6. Переходные процессы при ступенчатых возмущениях $\lambda_2(t) = 9,5 \text{ т/ч}$ (а) и $\lambda_3(t) = 3 \cdot 10^3 \text{ м}^3/\text{ч}$ (б) и при одновременном действии возмущений $\lambda_2(t)$ и $\lambda_3(t)$ (в).

АЧХ контуров при настройках по 5 и 6 представлены на рис. 7.

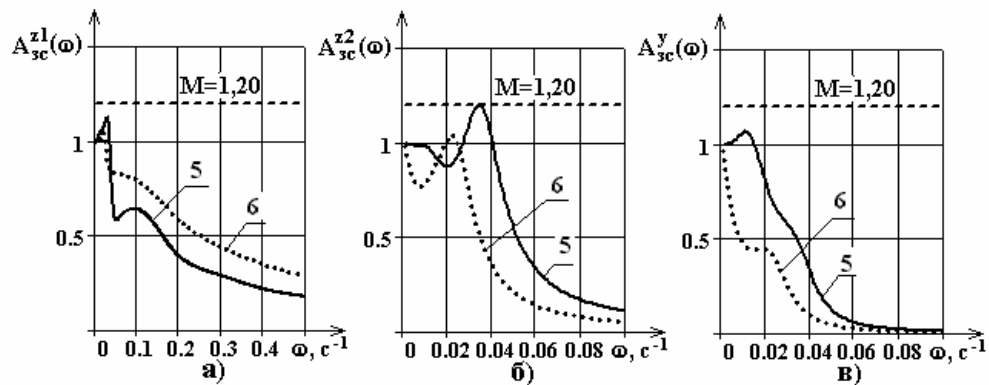


Рис.7. АЧХ внутреннего опережающего (а), промежуточного (б) и внешнего контура (в) (цифры АЧХ соответствуют вариантам настроек табл.1)

Сопоставление основных качественных показателей, таких как максимальное абсолютное отклонение (выбег) главной регулируемой величины $|y(t)|_{\max}$, интегральный критерий по модулю I_M и интегральный квадратичный критерий I_{KB} для рассмотренных выше вариантов приведено в табл. 2.

Таблица 2. Сопоставление основных показателей АСР для рассмотренных вариантов настроек

Варианты настроек (табл.1)	Возмущение						Суммарные интегральные показатели	
	$\lambda_2(t) = 9,5 \text{ т/ч}$			$\lambda_3(t) = 3 \cdot 10^3 \text{ м}^3/\text{ч}$				
	$ y(t) _{\max}$ $^{\circ}\text{C}$	I_M $^{\circ}\text{C} \cdot \text{с}$	$I_{кв}$ $(^{\circ}\text{C})^2 \cdot \text{с}$	$ y(t) _{\max}$ $^{\circ}\text{C}$	I_M $^{\circ}\text{C} \cdot \text{с}$	$I_{кв}$ $(^{\circ}\text{C})^2 \cdot \text{с}$	$I_{M,\Sigma}$ $^{\circ}\text{C} \cdot \text{с}$	$I_{кв,\Sigma}$ $(^{\circ}\text{C})^2 \cdot \text{с}$
1	7.4	1297	5095	15.8	2676	27000	3973	32095
2	10.7	1521	11590	16.8	3833	42750	5454	54340
3	10.7	1535	12460	16.8	3405	36370	5040	48830
4	9.9	1346	9682	16.5	3268	35550	4614	45232
5	10.5	2005	14560	16.5	3382	34050	5387	48610
6	13.0	4007	29510	17.1	3356	33840	7363	63350

Заключение

Как показали проведенные исследования, предлагаемая методика настройки с успехом может быть распространена на сложные структурные схемы систем регулирования и, в частности, на трехконтурную АСР с ПИ-регулятором и двумя дифференциаторами. Достоинством методики является отсутствие ограничений на различие инерционностей контуров системы регулирования, а также на структуру алгоритмов регулятора и устройств ввода опережающих сигналов и, как следствие, на число настроечных параметров системы регулирования. Кроме того представляются широкие возможности для формирования желаемой целевой функции с учетом различных точек приложения возмущающих воздействий, а также достаточно простой способ введения ограничений на требуемый запас устойчивости.

В заключение отметим, что предлагаемый метод позволит на стадии проектирования проводить достаточно глубокий структурный и параметрический анализ с выдачей рекомендаций как по алгоритмам регулирующих устройств так и по их оптимальным настройкам.

Список литературы

1. Давыдов Н.И., Тюпина Т.Г. Исследование системы регулирования температуры с двумя опережающими скоростными сигналами // Теплоэнергетика, 2002. № 10. с. 17-21.
2. Сабанин В.Р., Смирнов Н.И., Репин А.И. Универсальная программа для оптимизации многоэкстремальных задач «Optim-MGA» // Свидетельство об официальной регистрации программы для ЭВМ № 2004610862, Зарегистрировано в Реестре программ для ЭВМ г. Москва, 8 апреля 2004 г.
3. Биленко В.А., Давыдов Н.И. Метод расчета на ЭЦВМ оптимальных параметров настройки двухконтурных систем регулирования // Теплоэнергетика, 1977. № 1. с. 32-36.
4. Ротач В.Я. К расчету систем автоматического регулирования со вспомогательными информационными каналами методом многомерного сканирования // Теплоэнергетика, 2001. № 11. с. 61-65.

5. Сабанин В.Р., Смирнов Н.И., Репин А.И. Модифицированный генетический алгоритм для задач оптимизации и управления // Exponenta Pro. Математика в приложениях. 2004. № 3-4. с. 78-85.
6. Смирнов Н.И., Сабанин В.Р., Репин А.И. Оптимизация настроечных параметров автоматических систем регулирования с дифференциатором // Теплоэнергетика. 2004. №10. С. 10-16.
7. Sekaj I. Genetic algorithm-based control system design and system identification// 5-th International Conference an Soft Computing MENDEL`99, Brno, Czech Republic, June 9-12, 1999.С.139-144.
8. Александрова Н.Д., Давыдов Н.И. О настройках импульсных релейных регуляторов на малоинерционных объектах // Теплоэнергетика. 2002 № 5. с. 54-57.
9. P. Osmera. Basic principles of evolutionary computation. 11-th Zittau Fuzzy Colloquium, 2004, PP. 2-9.

.....