

ОПТИМИЗАЦИЯ НАСТРОЕЧНЫХ ПАРАМЕТРОВ АВТОМАТИЧЕСКИХ СИСТЕМ РЕГУЛИРОВАНИЯ С ДИФФЕРЕНЦИАТОРОМ

Смирнов Н.И. канд. техн. наук, Сабанин В.Р. канд. техн. наук, Ретин А.И. аспирант

Московский энергетический институт (технический университет)

Решается задача поиска оптимальных значений настроечных параметров в двухконтурной АСР с дифференциатором численным методом с использованием алгоритма многоэкстремальной оптимизации. Для сравнения приводятся результаты анализа известных аналитических методов расчета таких систем.

При автоматизации технологических процессов в теплоэнергетике широкое распространение получили автоматические системы регулирования с добавочными вспомогательными переменными состояния объекта, получившие название многоконтурных.

На практике обычно ограничиваются двумя контурами. Под двухконтурными понимают каскадные АСР с корректирующим $W_{кр}(s)$ и стабилизирующим $W_{сп}(s)$ регуляторами и АСР с регулятором $W_p(s)$ и дифференциатором $W_\partial(s)$, которая приводится к эквивалентной каскадной. Первая структура широко используется при регулировании тепловой нагрузки котлов, вторая при стабилизации температуры перегрева пара. Регуляторы в таких АСР, как правило, работают по ПИ-алгоритму и имеют два настроечных параметра K_p и K_u , а дифференциатор функционирует как РД-звено с параметрами K_∂ и T_∂ .

В эквивалентной структурной схеме АСР с дифференциатором корректирующий регулятор имеет передаточную функцию, обратную передаточной функции дифференциатора $W_{кр}^\partial(s) = 1/W_\partial(s)$. При реализации дифференциатора в виде реального дифференцирующего звена эквивалентный корректирующий регулятор функционирует по ПИ-алгоритму с настроечными параметрами

$$k_p^\partial = \frac{1}{k_\partial}; \quad k_u^\partial = \frac{1}{k_\partial \cdot T_\partial}; \quad T_u^\partial = T_\partial. \quad (1)$$

Передаточная функция эквивалентного стабилизирующего регулятора определяется произведением

$$W_{сп}^\partial(s) = W_p(s) \cdot W_\partial(s). \quad (2)$$

Аналитические методы расчета двухконтурных АСР достаточно подробно изложены в известных монографиях и статьях [1, 2, 3, 4].

При малой инерционности вспомогательного канала $W_{\mu z}(s)$ порядок настройки каскадных АСР и АСР с дифференциатором в целом совпадает.

Корректирующий регулятор $W_{кр}(s)$ в каскадной АСР и дифференциатор $W_\partial(s)$ рассчитываются на заданный запас устойчивости по отношению передаточных функций основного и вспомогательного каналов $W_{\mu y}(s)/W_{\mu z}(s)$. Такой подход является вполне оправданным из-за существенного различия рабочих частот внутреннего и внешнего контуров.

Стабилизирующий регулятор в каскадной АСР рассчитывается по эквивалентному объекту

$$W_{o\partial}^{CP}(s) = W_{\mu z}(s) + W_{\mu y}(s) \cdot W_{kp}(s) . \quad (3)$$

Передачная функция эквивалентного объекта для расчета настроек регулятора в АСР с дифференциатором имеет вид

$$W_{o\partial}^P(s) = W_{\mu y}(s) + W_{\mu z}(s) \cdot W_{\partial}(s) . \quad (4)$$

Для случая, когда инерционность вспомогательного канала $W_{\mu z}(s)$ сравнима с инерционностью основного $W_{\mu y}(s)$, рекомендуется итерационная процедура до выполнения условия сходимости [4,5].

Однако, следует заметить, если для корректирующего регулятора в эквивалентный объект при выполнении итераций входит лишь передачная функция стабилизирующего регулятора $W_{cp}(s)$, то передачная функция эквивалентного объекта для уточнения настроек дифференциатора содержит кроме передачной функции регулятора $W_p(s)$ ещё и передачную функцию самого дифференциатора $W_{\partial}(s)$. В связи с этим, в итерационной процедуре приходится использовать его же параметры, взятые на предыдущем шаге.

$$W_{o\partial}^{kp}(s) = \frac{W_{\mu y}(s) \cdot W_{cp}(s)}{1 + W_{\mu z}(s) \cdot W_{cp}(s)} ; \quad (5)$$

$$W_{o\partial}^{\partial}(s) = \frac{W_{\mu y}(s) \cdot W_p(s) \cdot W_{\partial}(s)}{1 + W_{\mu z}(s) \cdot W_p(s) \cdot W_{\partial}(s)} .$$

Наличие замкнутого контура в эквивалентном объекте и особенность итерационной процедуры при уточнении настроек дифференциатора сказывается на сходимости, что заметно усложняет решение задачи за счет увеличения числа расчетных циклов.

В работах [2, 3] для расчета подобных систем предложен эффективный метод многомерного сканирования, свободный от рассмотренных недостатков итерационных процедур.

В предлагаемой работе, наряду с попыткой применения численных методов оптимизации настроечных параметров, рассмотрена возможность решения поставленной задачи способом последовательного приближения к глобальному экстремуму с использованием рекомендаций, изложенных в [2, 3].

Предлагается следующий порядок действий:

1. Определяется первое приближение настроечных параметров дифференциатора $W_{\partial}(s)$ по эквивалентному объекту

$$W_{o\partial}^{\partial}(s) = \frac{W_{\mu y}(s)}{W_{\mu z}(s)} . \quad (6)$$

По найденным параметрам K_Δ и T_Δ в соответствии с передаточной функцией эквивалентного объекта $W_{\Delta}^P(s)$, выражение (4), определяются настроечные параметры регулятора $W_p(s)$.

Границы запаса устойчивости, заданного корневым показателем колебательности m , рассчитываются через расширенные вещественные и мнимые частотные характеристики соответствующих эквивалентных объектов из условия, определяемого критерием Найквиста

$$\begin{aligned} W_\Delta(m, j\omega) \cdot W_{\Delta}^D(m, j\omega) + 1 &= 0, \\ W_p(m, j\omega) \cdot W_{\Delta}^P(m, j\omega) + 1 &= 0. \end{aligned} \quad (7)$$

В качестве показателя оптимальности для выбора настроечных параметров принимается минимум линейного интегрального критерия $I_{л,у}(t)$, соответствующий для ПИ- алгоритма максимальному значению $K_u = K_p / T_u$.

2. При фиксированном значении постоянной времени дифференциатора $T_\Delta = T_{\Delta,исх}$ производится увеличение с выбранной дискретностью коэффициента передачи K_Δ с определением на каждом шаге оптимальных в смысле K_u^P, max настроек регулятора.

Из ряда проведенных расчетов выбирается значение K_Δ , обеспечивающие локальный экстремум при соответствующих настроечных параметрах регулятора и $T_{\Delta,исх}$.

Многочисленные расчеты с применением приемов имитационного моделирования показали, что получаемая при этом величина произведения $K_\Delta \cdot T_{\Delta,исх}$, обеспечивающая локальный экстремум, сохраняет свое значение и при других значениях T_Δ . При этом характер расположения локальных экстремумов $I_{л}$ имеет вид гиперболической зависимости $K_\Delta \cdot T_\Delta = const$. Произведение $K_\Delta \cdot T_\Delta$ для анализируемой системы определяется принятым значением показателя запаса устойчивости.

3. Дальнейшее приближение к глобальному экстремуму осуществляется в направлении одновременного увеличения K_Δ и уменьшения T_Δ , связанных зависимостью $K_\Delta \cdot T_\Delta = const$. На каждом шаге дискретности оцениваются оптимальные настроечные параметры регулятора. Из полученного ряда выбирается точка с наибольшим значением K_u^P , которая вместе с соответствующими ей параметрами K_Δ и T_Δ считается оптимальной, соответствующей глобальному экстремуму.

В случае технического ограничения на коэффициент передачи дифференциатора, оптимальные настройки выбираются в соответствии с п.3 для заданного значения K_Δ .

Сложность рекомендуемых вычислительных процедур склоняет к попытке непосредственного поиска оптимальных настроечных параметров с применением численных методов оптимизации выбранной целевой функции.

В последнее время в практике решения многопараметрических и многоэкстремальных оптимизационных задач, к числу которых может быть отнесена настройка многоконтурных АСР, широкое применение находят генетические

алгоритмы. При решении задачи оптимальной настройки АСР с дифференциатором использовалась авторская версия модифицированного генетического алгоритма, далее МГА [6].

Предложенный авторами алгоритм совмещает в себе известные генетические качества статистической селекции популяции от поколения к поколению и регулярный поиск локальных экстремумов методом деформируемого многогранника Нелдера-Мида. Модифицированный генетический алгоритм хорошо себя зарекомендовал в задачах оптимизации сравнительно небольшой размерности с большими объемами вычислений при обращении к функции цели. К числу таких задач относится процедура настройки на минимум интегрального критерия многоконтурных АСР при подаче на её входы ступенчатых возмущений. Для модифицированного генетического алгоритма разработана программа для ЭВМ *Optim-MGA* как инструментальное средство многопараметрической и многоэкстремальной оптимизации. Программа позволяет находить наилучшее значение функций, представленных в виде динамически присоединяемых библиотек (dll-файлов).

Для оценки качества регулирования в случае ступенчатого входного воздействия обычно используют интегральные критерии, учитывающие площадь на интервале времени t_p , ограниченную переходным процессом $y(t)$. К числу наиболее

распространенных относится линейный интеграл $I_{л,y(t)} = \int_0^{t_p} y(t) dt$, поскольку он имеет

аналитическую связь с настроечными параметрами. Такой интеграл при заданном запасе устойчивости имеет минимальное значение при $K_u = (K_p / T_u)_{max}$. Поскольку при значительных отрицательных отклонениях регулируемой величины от заданного значения результат оценки качества заметно искажается, то такой интеграл применяется лишь для слабоколебательных процессов.

Наиболее удобным обобщенным показателем оптимальности качества функционирования системы является интеграл от модуля переходного процесса

$I_{м,y(t)} = \int_0^{t_p} |y(t)| dt$. Модуль устраняет влияние отрицательных значений $y(t)$, имеющих

место в колебательных системах.

При этом поверхность отклика с таким интегралом имеет наиболее предсказуемый характер с точки зрения применения численных поисковых процедур.

Однако, наряду с отмеченным преимуществом, интеграл по модулю в отличие от линейного не является инвариантным относительно возмущений, действующих по различным каналам. Поэтому может оказаться, что параметры настройки, минимизирующие этот критерий при действии одного возмущения не будут оптимальными по отношению к другому.

Известно, что при анализе систем управления принято рассматривать два типа входных воздействий: возмущение по каналу регулирующего органа $\lambda(t)$ и управляющее воздействие по заданию $u(t)$.

Если задачей системы является поддержание постоянного значения физической переменной при наличии возмущений, то её принято называть системой регулирования. В этом случае можно считать, что $\lambda(t) = var$, $u(t) = const$, а для оценки качества используется интеграл

$$I_{м,\lambda} = \int_0^{t_p} |y(p, \lambda, t)| dt \rightarrow min . \quad (8)$$

Систему, реализующую заданное значение управляющего воздействия, называют следящей (соответственно, $\lambda(t) = const$, $u(t) = var$). Для неё интегральный критерий может быть записан в виде

$$I_{M,u} = \int_0^{t_p} |1 - y(p, u, t)| dt \rightarrow \min. \quad (9)$$

При этом, одна и та же система, реализующая названные выше задачи, будет иметь различные оптимальные настройки.

Численный метод оптимизации позволяет добиться компромисса, обеспечивающего минимум суммарного интегрального критерия по модулю при соблюдении в случае необходимости ограничения на запас устойчивости.

Выражение для суммарного интеграла при единичных ступенчатых воздействиях соответственно при $\lambda(t) = 1$ и $u(t) = 1$ запишется

$$I_{M,\Sigma} = a \cdot I_{M,\lambda} + I_{M,u}, \quad (10)$$

где a - масштабный коэффициент, приводящий вес интеграла $I_{M,\lambda}$ к весу интеграла $I_{M,u}$.

Для обеспечения заданного запаса устойчивости в задачах поиска и оптимизации настроечных параметров методом имитационного моделирования используются прямые показатели запаса устойчивости, например, степень затухания ψ , которая вводится в целевой критерий в виде функции штрафа

$$f(p, x, t) = I_{M,\Sigma} + b \cdot |\psi_{3\delta} - \psi| \rightarrow \min, \quad (11)$$

где b - масштабный коэффициент, учитывающий вес штрафной функции.

Изложенный подход позволяет произвести оптимальный синтез системы непосредственно с учетом её целевого назначения, приняв для системы регулирования $u(t) = 0$, а для следящей системы $\lambda(t) = 0$.

Изложенные рекомендации иллюстрируются на примере исследования АСР температуры перегрева пара котла БМ-35-РФ с поверхностным охладителем (котел №2 ТЭЦ МЭИ) [3, 4, 5].

Динамика основной переменной $y(t)$ и вспомогательной переменной $z(t)$ по каналам пароперегревателя представлена передаточными функциями вида

$$W_{\mu y}(s) = 0.08 \cdot \frac{e^{-23 \cdot s}}{(54.7 \cdot s + 1) \cdot (9.1 \cdot s + 1)}, \quad (12)$$

$$W_{\mu z}(s) = 0.1 \cdot \frac{e^{-10 \cdot s}}{(48.9 \cdot s + 1) \cdot (11.5 \cdot s + 1)}.$$

Результаты расчета настроек регулятора в соответствии с аналитической процедурой последовательного приближения к глобальному экстремуму представлены в табл. 1.

Таблица 1.

№ точки	$W_{\partial}(s)$			$W_p(s)$		$I_{л,y}(t)$ при $\lambda(t)=1$
	K_{∂}	T_{∂}	$K_{\partial} \cdot T_{\partial}$	K_p^p	K_u^p	
1	3.5	3.00	10.5	29.4	0.927	1.079
2	5.0	3.00	15.0	39.9	1.595	0.627
3	6.0	3.00	18.0	40.0	1.956	0.510
4	6.4	3.00	19.2	37.4	1.991	0.502
5	6.8	3.00	20.4	34.0	1.975	0.506
6	8.0	3.00	24.0	25.8	1.792	0.558
7	9.0	2.13	19.2	53.2	3.258	0.308
8	9.5	2.02	19.2	53.0	3.504	0.286
9	10.0	1.92	19.2	51.9	3.645	0.275
10	10.5	1.83	19.2	50.9	3.704	0.270
11	11.0	1.75	19.2	49.3	3.643	0.274
12	12.0	1.60	19.2	46.1	3.451	0.290
13	3.6	4.00	14.4	32.2	1.309	0.764
14	4.2	4.00	16.8	31.3	1.498	0.668
15	4.8	4.00	19.2	28.1	1.565	0.639
16	5.4	4.00	21.6	24.6	1.537	0.651
17	6.0	4.00	24.0	21.4	1.462	0.684
18	8.5	2.00	17.0	52.6	2.772	0.361
19	9.0	2.00	18.0	53.1	3.159	0.316
20	9.6	2.00	19.2	53.0	3.549	0.282
21	10.0	2.00	20.0	48.3	3.244	0.308
22	10.5	2.00	21.0	43.1	2.954	0.338
Л[3]	13	1.50	19.5	44.6	2.165	0.462

Расчеты проводились по минимуму линейного интегрального критерия $I_{л,y}(t)$, определяемого максимальным значением K_u^p при ограничении на корневой показатель колебательности $m = 0.366$.

На рис. 1 в координатах $K_{\partial}, T_{\partial}$ показана траектория изменения параметров дифференциатора при движении к глобальному экстремуму (сплошная линия) и отмечены исходная настройка (точка 1), локальный экстремум при $T_{\partial,uscx}$ (точка 4) и глобальный экстремум на линии $K_{\partial} \cdot T_{\partial} = const = 19.2$ (точка 10).

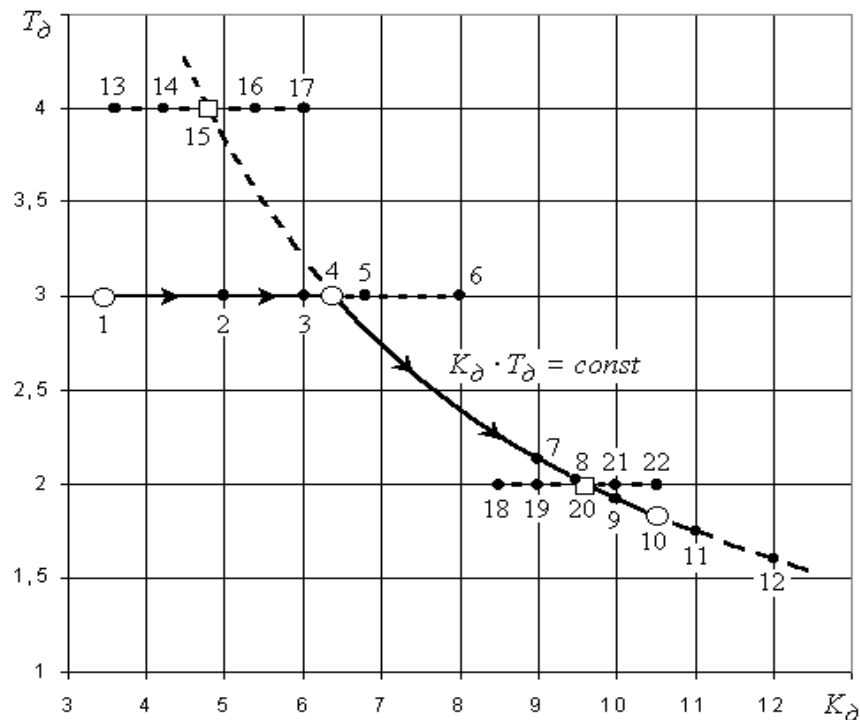


Рис.1. Траектория изменения параметров дифференциатора в процедуре целенаправленного движения к глобальному экстремуму

Здесь же нанесены точки при постоянных значениях T_d (т.т. 13-17 при $T_d = 4$ с, т.т. 18-22 при $T_d = 2$ с, а также т.т. 1-6 при $T_{d,ucx} = 3$ с). Выявленные при этом локальные экстремумы (т.т. 15, 20 и 4, табл. 1) показали, что они имеют место при постоянном значении произведения $K_d \cdot T_d$. При этом движение к глобальному экстремуму по оптимальной линии $K_d \cdot T_d = const = 19.2$ в направлении увеличения K_d соответствует приближению дифференциатора к идеальному дифференцирующему звену.

Значительное приближение к идеальному дифференцирующему звену на практике неизбежно приводит к проблеме помехозащищенности [3]. Поэтому в каждом конкретном случае следует устанавливать приемлемое ограничение на K_d . Особенно, как показали проведенные исследования, такая процедура становится необходимой при оптимизации настроечных параметров численными методами.

На рис.2 показаны линии заданного запаса устойчивости ($m=0.366$) для регулятора $W_p(s)$ в плоскости его настроечных параметров K_p^p, K_u^p при параметрах дифференциатора, соответствующих т.т. 1-22 (табл. 1).

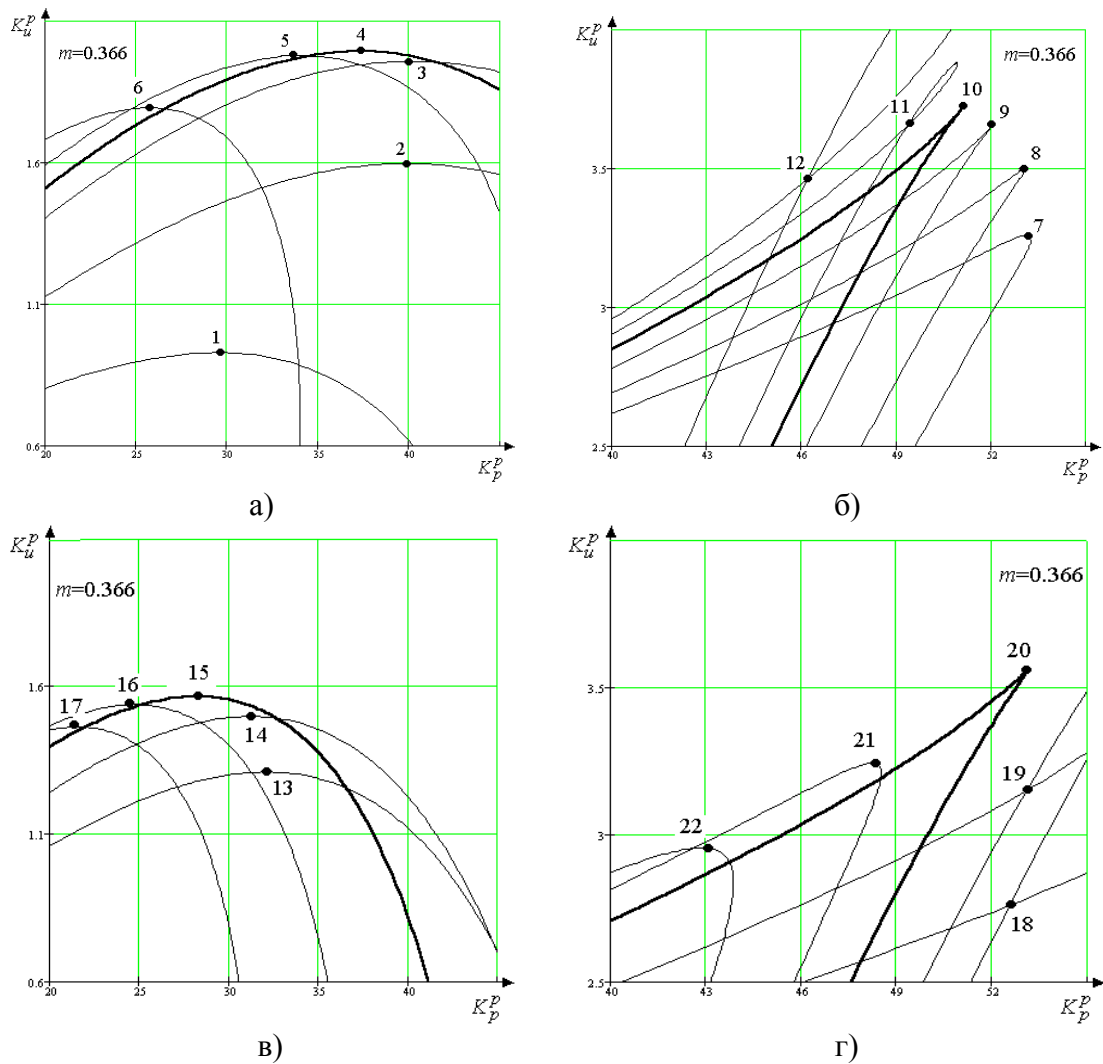


Рис.2. Линии заданного запаса устойчивости для регулятора ($m=0.366$)

а) изменение K_D при $T_{D,usc} = 3$ с; б) изменение K_D при $K_D \cdot T_D = const = 19.2$; в) изменение K_D при $T_D = 4$ с; г) изменение K_D при $T_D = 2$ с.

Локальный экстремум при $T_D = T_{D,usc} = 3$ с соответствует т.4, рис. 2 а. На рис. 2 б следует отметить т. 10, соответствующую настройке регулятора, которая обеспечивает глобальный экстремум. Показаны также локальные экстремумы для $T_D = 4$ с (т.15, рис. 2 в) и для $T_D = 2$ с (т. 20, рис. 2 г).

Общий вид переходных процессов для $y(t)$ при единичном ступенчатом возмущении $\lambda(t)=1$ по каналу регулирующего органа в соответствии с принятой процедурой движения к оптимуму показан на рис. 3 а (номера переходных процессов соответствуют номерам точек в табл.1, на рис. 1 и на рис. 2). Сравнение переходного процесса при полученных оптимальных настройках (график 10) с исходным процессом при настройках по эквивалентным объектам (график 1) показывает улучшение качества регулирования (по линейному интегральному критерию $I_{л,y(t)}$ в 4 раза, по интегральному критерию по модулю $I_{м,y(t)}$ в 3.4 раза). Переходные процессы

изменения во времени основной $y(t)$ и вспомогательной $z(t)$ регулируемых величин при оптимальных настройках (т.10, табл. 1) и при ступенчатом возмущении, идущем со стороны регулирующего органа, показаны на рис. 3 б (графики $y(t)_{10}$ и $z(t)_{10}$). Для сравнения здесь же приведены процессы, полученные в [3] при оптимальных настройках с ограничением на частотный показатель колебательности $M \leq 1.55$ (графики $y(t)_{Л[3]}$ и $z(t)_{Л[3]}$).

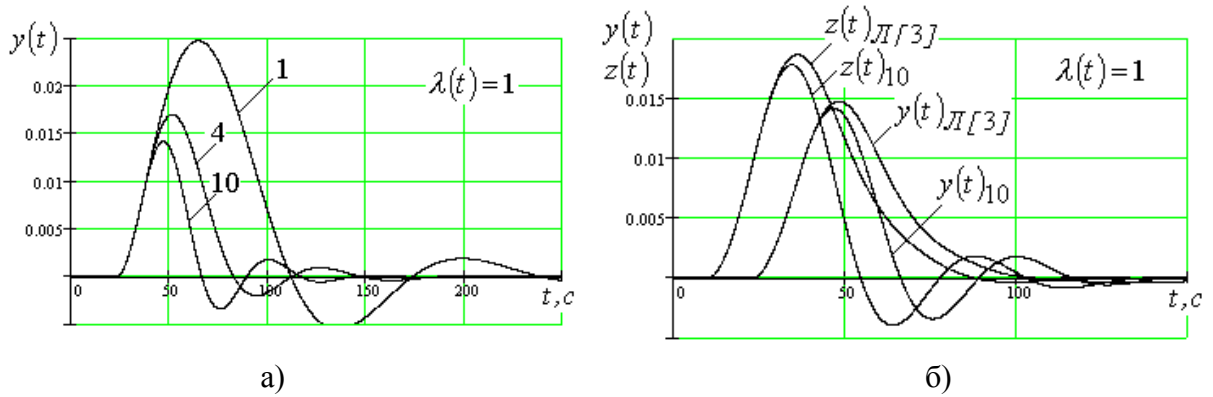


Рис.3. Переходные процессы.

Результаты расчета оптимальных настроечных параметров рассматриваемой системы регулирования, полученные численным методом имитационного моделирования с использованием модифицированного генетического алгоритма приведены в табл.2.

Таблица 2.

№ точки	$W_{\partial}(s)$		$W_p(s)$		$I_{M,y(t)}$	$I_{L,y(t)}$ при $\lambda(t)=1$
	K_{∂}	T_{∂}	K_p^p	K_u^p		
$I_{M,\lambda} = \int_0^{t_p} y(\lambda,t) dt \rightarrow \min, \lambda(t)=1$						
1	280.2	0.074	45.8	3.901	0.307	0.256
2	12.0	1.33	75.2	3.440	0.327	0.291
3	10.0	1.510	83.4	3.330	0.329	0.300
$I_{M,u} = \int_0^{t_p} 1-y(u,t) dt \rightarrow \min, u(t)=1$						
4	11.4	1.500	59.0	0.880	37.081	1.136
5	12.0	1.430	59.6	0.882	37.179	1.134
6	10.0	1.710	59.8	0.877	37.104	1.140
$I_{M,\Sigma} = a \cdot I_{M,\lambda} + I_{M,u}, \lambda(t)=1, u(t)=1$						
7	169.9	0.133	39.8	3.560	41.448	0.281
8	12.0	1.448	63.9	3.120	43.842	0.321
9	10.0	1.644	71.1	3.014	43.849	0.332

Параметрическая оптимизация АСР проводилась путем поиска минимального значения интеграла по модулю от основной регулируемой величины $I_{M,y(t)}$ для единичного ступенчатого воздействия по каналу регулирующего органа $\lambda(t)$ (т.т. 1, 2, 3) и для единичного ступенчатого воздействия по управляющему каналу $u(t)$ (т.т. 4,5,6). Был рассмотрен также компромиссный вариант настроек, минимизирующий суммарный интегральный критерий (т.т. 7, 8, 9). Точки 1, 4, 7 соответствуют глобальным экстремумам, точки 2, 3, 5, 6, 8, 9 соответствуют локальным экстремумам при ограничении на коэффициент передачи дифференциатора K_D .

На рис 4 приведены переходные процессы соответствующие настройкам, минимизирующим $I_{M,\lambda}$, $I_{M,u}$, $I_{M,\Sigma}$ (в табл. 2 они соответствуют т.т. 1, 4, 7).

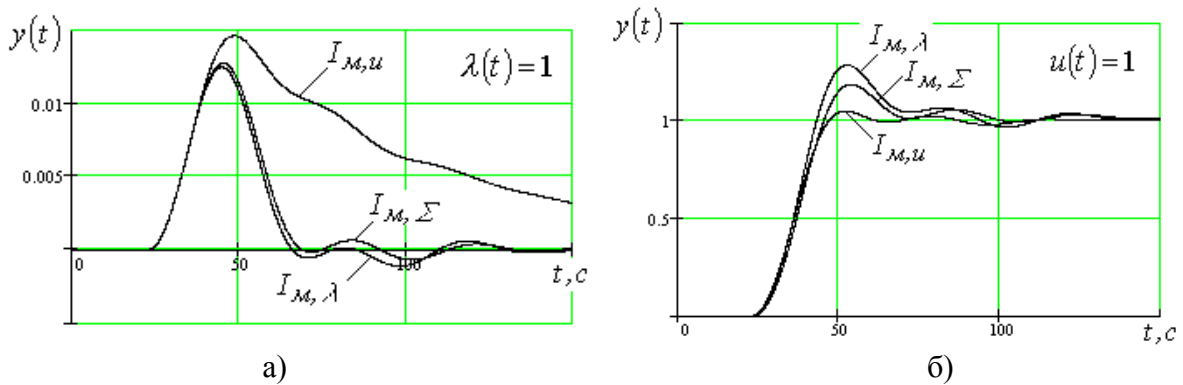


Рис.4. Переходные процессы при оптимальных настройках, определенных численным методом
 а) возмущение по каналу регулирующего органа; б) возмущение по управляющему воздействию.

На рис.5. для сравнения представлены переходные процессы, при оптимальных настройках, полученных численным методом имитационного моделирования (графики $I_{M,\Sigma}$), методом многомерного сканирования [3] (графики $y(t)_{Л[3]}$) и методом, изложенным в настоящей статье (графики $y(t)_{10}$).

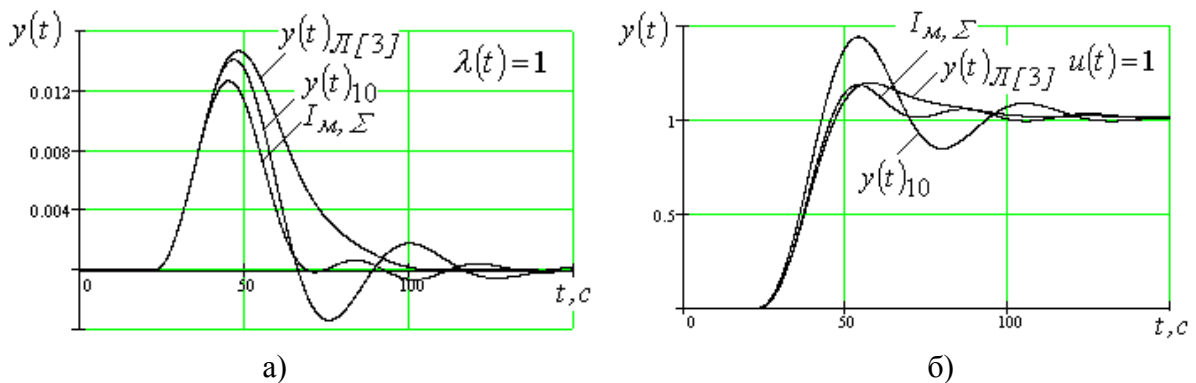


Рис.5. Переходные процессы
 а) возмущение по каналу регулирующего органа; б) возмущение по управляющему воздействию.

По сравнению с исходной аналитической настройкой (т.1 в табл. 1) все они дают значительный выигрыш в качественных показателях и могут быть рекомендованы для анализа подобных систем регулирования.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Ротач В.Я.** Теория автоматического управления теплоэнергетическими процессами. М.: Энергоатомиздат, 1985.
2. **Ротач В.Я.** Метод многомерного сканирования в расчетах автоматических систем управления // Теплоэнергетика. №10.2001.С. 33-38.
3. **Ротач В.Я.** К расчету систем автоматического регулирования со вспомогательными информационными каналами методом многомерного сканирования // Теплоэнергетика. №11.2001.С. 61-65.
4. **Панько М.А., Харахорин Д.А.** Расчет оптимальных настроек регулятора в автоматической системе регулирования с сигналом по производной // Сб. научных трудов "Теория и практика построения и функционирования АСУТП". МЭИ. 1998. С. 61-69.
5. **Смирнов Н.И., Сабанин В.Р., Репин А.И.** Оптимизация настроек автоматических систем регулирования с дифференциатором // Труды международной научной конференции Control 2003. МЭИ. 2003. С. 159-165.
6. **Сабанин В.Р., Смирнов Н.И., Репин А.И.** Оптимальный синтез АСР методом имитационного моделирования с использованием генетических алгоритмов оптимизации // Труды всероссийской научной конференции ИММОД 2003. Санкт-Петербург.: ФГУП ЦНИИ технологии судостроения. 2003. С. 87-91.