

## ОПТИМИЗАЦИЯ НАСТРОЕК РЕГУЛЯТОРА ПУТЕМ ИМИТАЦИОННОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ

**Затонский А.В.,**

д.т.н., профессор, заведующий кафедрой автоматизации технологических процессов Березниковского филиала Пермского национального исследовательского политехнического университета, zhenon@narod.ru

**Аннотация.** Предложен метод поиска настроек регулятора объекта первого порядка с запаздыванием путем имитационного эксперимента, позволяющий получить более качественные переходные процессы по управлению, чем традиционные методы.

**Ключевые слова:** система управления, настройка, оптимизация.

## THE OPTIMIZATION OF CONTROL PARAMETERS BY IMITATION MODELING

**Zatonskiy A.V.**

doctor of technical science, head of automation department in Berezniki branch of Perm national polytechnic research university.

**Abstract.** The method of calculation of controlled parameters to the 1st range object with transport delay is given. Processes controlled by this method are more quality then same with ordinary methods.

**Keywords:** control system, tuning, optimization.

**М**ногие технологические и промышленные объекты могут быть описаны передаточной функцией 1-го порядка с запаздыванием. Для настроек регулятора такого объекта обычно применяют метод В.Я. Ротача [1], в котором критерием качества служит искусственный параметр – показатель колебательности процесса.

Будем решать задачу подбора оптимальных настроек ПИ-регулятора для объекта первого порядка путем имитационного эксперимента. За критерий оптимальности настроек примем модульную интегральную ошибку

$$F(K_I, K_P) = \int_0^t |y^* - y(t, K_I, K_P)| dt, \quad (1)$$

где  $K_I$ ,  $K_P$  – настройки регулятора (соответственно,  $k1$  и  $k2$  в модели на рис. 1),  $y^*$  – уставка ( $R4$  на рис. 1),  $y(t, K_I, K_P)$  – выходная величина объекта, получаемая на элементе *Scope* модели. Сформулируем задачу минимизации

$$\{K_I, K_P\}: F(K_I, K_P) \rightarrow \min. \quad (2)$$

Поиск оптимума производился VBA-программой MS EXCEL во взаимодействии с Simulink-моделью [2]. Был реализован метод покоординатного спуска с адаптивным шагом. Произведен расчет около 3000 комбинаций  $\{R1, R2, R3, R4\}$  в пределах  $R1 \in [2, 5]$ ,  $R2 \in [200, 800]$ ,  $R3 = [1, 30]$  (с), где  $R3$  – запаздывание объекта (настраивается в элементе *Transport Delay* модели),  $R4 \in [30, 70]$ .

Для контроля правильности получаемых решений произведен расчет настроек методом В.Я. Ротача. Сравнительные результаты расчета настроек регулятора и интеграла ошибки (1) приведены в табл. 1.

Из табл. 1 следует, что настройки регулятора, найденные непосредственным решением задачи (2) в большинстве случаев не хуже настроек, получаемых методом В.Я. Ротача, в смысле отклонения выходной величины объекта от задания. Эффект проявляется как при малом, так и при большом запаздывании в объекте. Так, на рис. 2 приведены переходные про-

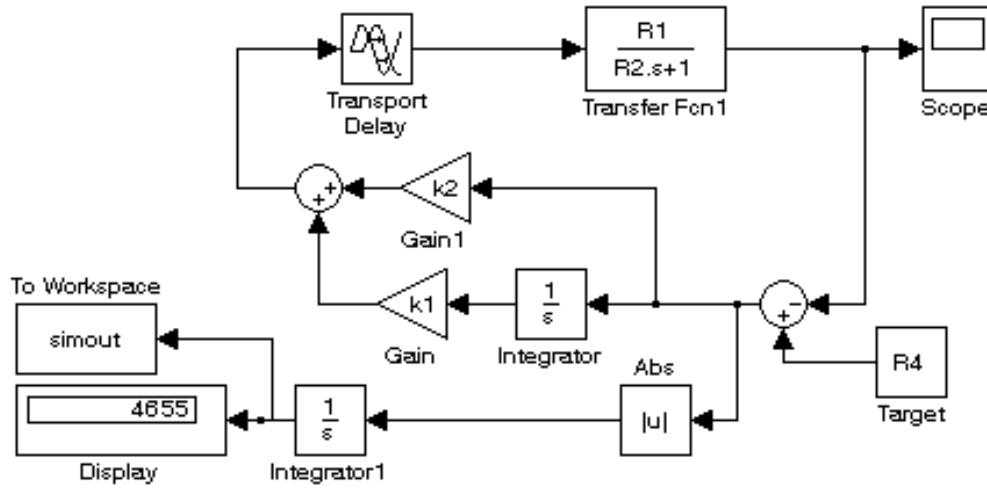


Рис. 1. Модель объекта и регулятора

Таблица 1

**Сравнение оптимальных настроек регуляторов, полученных разными методами**

Параметры модели			Настройки регулятора				Модульная интегральная ошибка	
			Новым методом		Методом Ротача		Новый метод	Метод Ротача
R1	R2	R3	k1	k2	k1	k2		
2	200	1	0,222	44,27	1,137656	9,931	116,8	698,5
3	300	10	0,0234	7,01	0,201369	6,111	1082	1055
4	800	20	0,008	6,35	0,09899	6,118	2114	3862
5	700	5	0,0268	18,96	0,874126	13,474	536,7	1164
4	600	25	0,0058	3,55	0,049142	3,663	2627	4655

цессы по управлению в системе с  $R1 = 2$ ,  $R2 = 200$ ,  $R3 = 1$  (1-я строка табл. 1), а на рис. 3 – в системе с  $R1 = 4$ ,  $R2 = 800$ ,  $R3 = 20$  (3-я строка табл. 1).

В ходе имитационного моделирования обнаружено, что оптимальные настройки зависят от уставки незначительно. Теоретически, этой зависимости быть не должно совсем, но погрешность численного интегрирования (1) вызывает малые колебания настроек.

Проведено сравнение полученных настроек с оптимальными настройками, рассчитанными по методу [3], согласно которому для ПИ-регулятора и объекта 1 порядка с запаздыванием оптимальными являются настройки:

$$k_p = \frac{0.6}{k \cdot \tau / T}$$

$$T_i = 0.8\tau + 0.5T \tag{3}$$

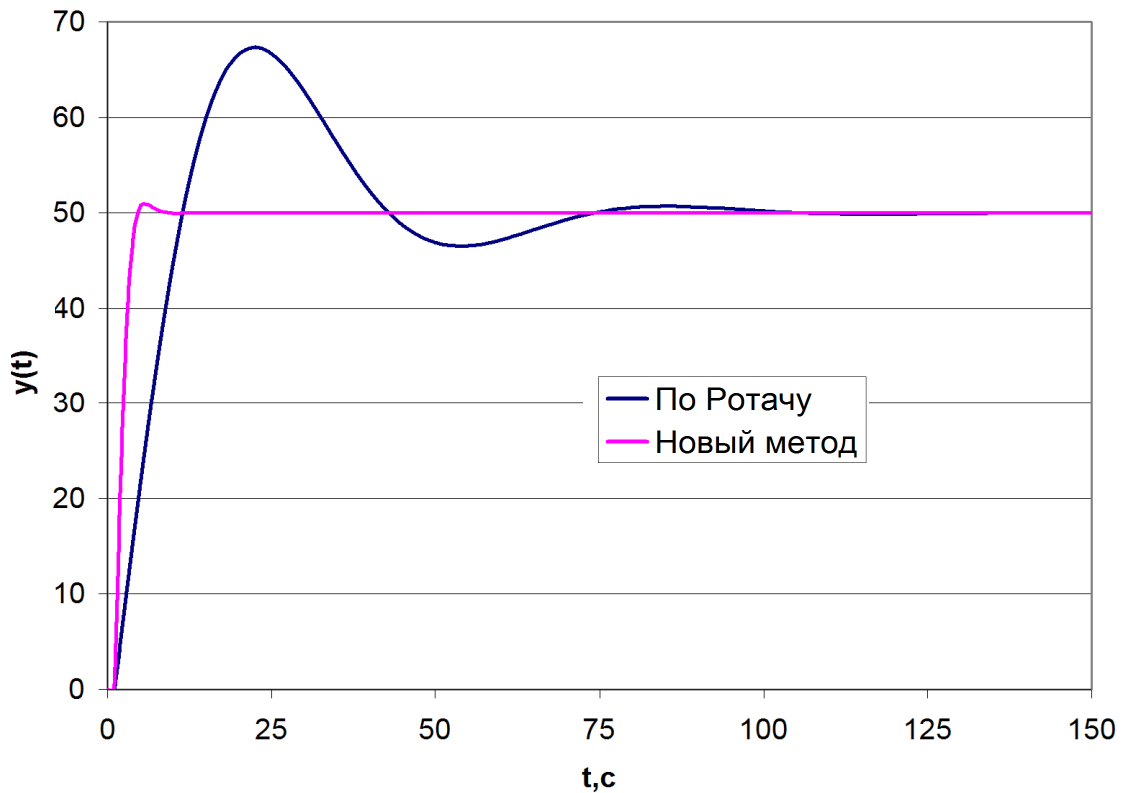


Рис. 2. Переходные процессы в системе с  $R1 = 2, R2 = 200, R3 = 1$

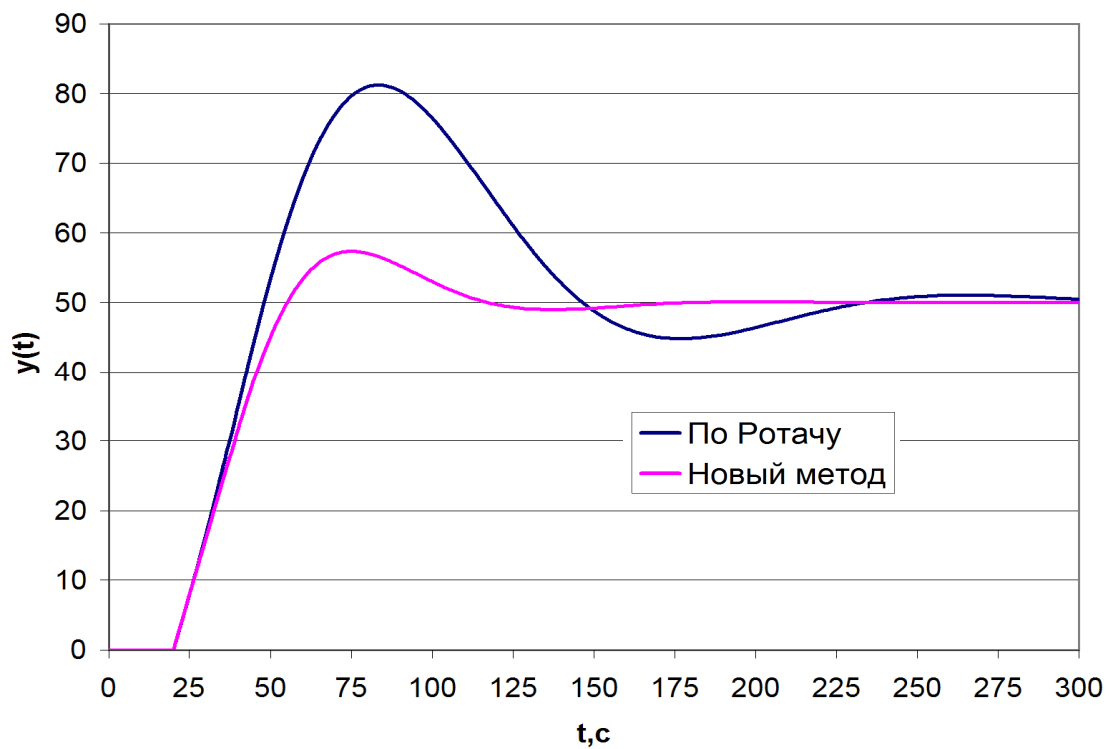


Рис. 3. Переходные процессы в системе с  $R1 = 4, R2 = 800, R3 = 20$

для апериодического процесса с минимальным временем переходного процесса,

$$k_p = \frac{0.7}{k \cdot \tau / T}$$

$$T_i = \tau + 0.3T \quad (4)$$

для процесса с 20%-ным перерегулированием,

$$k_p = \frac{1.0}{k \cdot \tau / T}$$

$$T_i = \tau + 0.35T \quad (5)$$

для минимального интегрального отклонения, где  $\tau$  – запаздывание в объекте ( $R3$  в рис. 1),  $T$  – постоянная времени объекта ( $R2$  в рис. 1),  $k$  – коэффициент передачи объекта ( $R1$  в рис. 1),  $k_p$  – коэффициент пропорциональности регулятора,  $T_i$  – время издержима регулятора, передаточная функция которого  $W(s) = k_p \left(1 + \frac{1}{T_i s}\right)$ . Для  $R1=20, R2=200, R3=1$  вычислим оптимальные настройки (табл. 2).

Модель с регулятором данного вида, вручную переключаемым с ПИ-регулятором, использованном ранее, представлена на рис. 4.

Таблица 2

Оптимальные настройки ПИ-регулятора для  $R1=20, R2=200, R3=1$

№	Критерий	$k_p$	$T_i$
1	Апериодический с минимальным временем переходного процесса	6	100,8
2	20%-ное перерегулирование	7	61
3	Минимальная интегральная ошибка	10	71

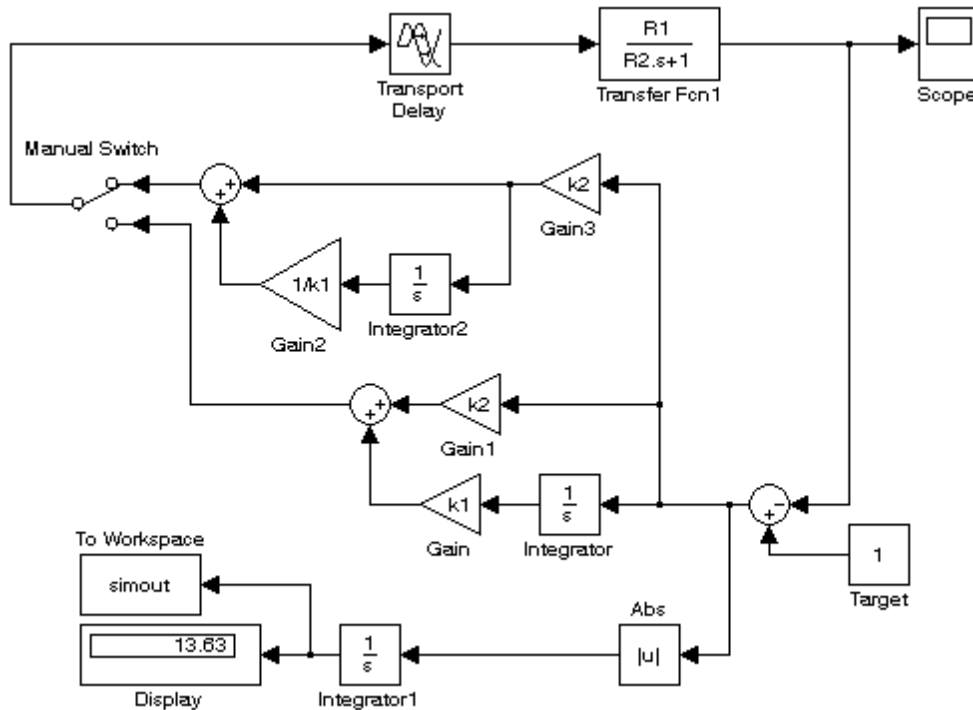


Рис. 4. Модель с двумя регуляторами

Результаты расчета модульной интегральной ошибке на интервале времени 0..300 с приведены в табл. 3.

Переходные процессы приведены на рис. 5. Таким образом, показано, что новый метод обеспечивает лучшие переходные процессы по управлению, чем применяемые раньше.

Таблица 3

**Показатели качества переходных процессов при разных настройках регуляторов**

№	Метод	Модульная интегральная ошибка
1	Апериодический с минимальным временем переходного процесса	20,04
2	20%-ное перерегулирование	18,62
3	Минимальная интегральная ошибка	13,63
4	По В.Я. Ротачу	13,91
5	Новый метод	2,124

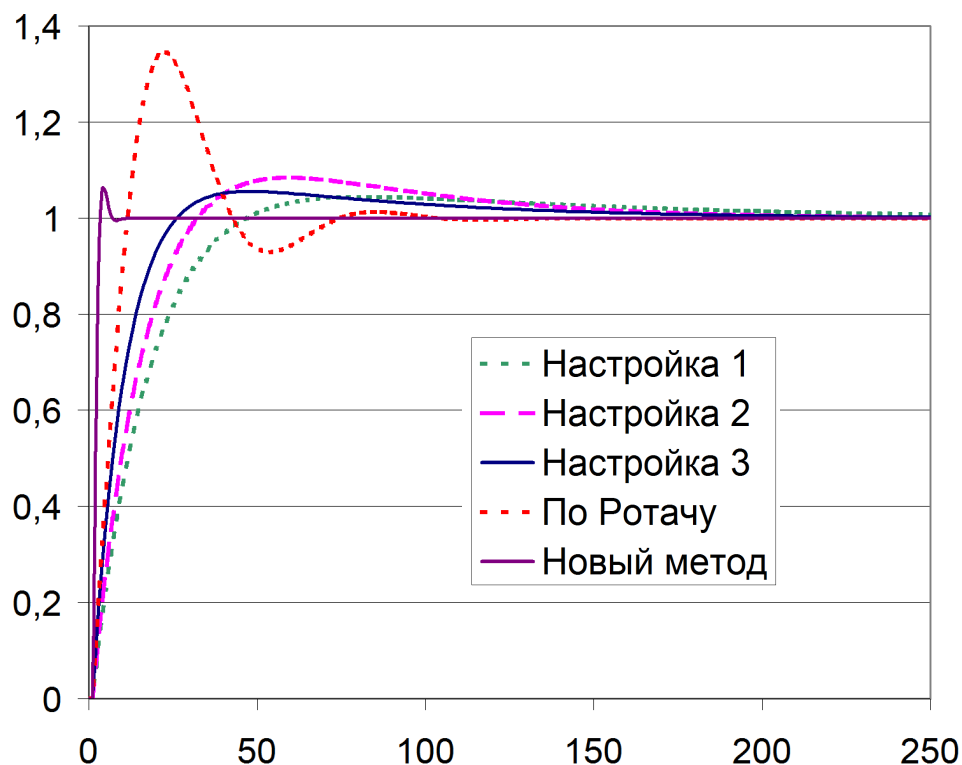


Рис. 5. Переходные процессы в модели с  $R1=20$ ,  $R2=200$ ,  $R3=1$  при разных настройках

Сделано предположение, что существуют зависимости  $K_{II} = K_{II}(R1, R2, R3)$  и  $K_{II} = K_{II}(R1, R2, R3)$ , удовлетворительно аппроксимирующие экспериментальные данные. Произведен поиск коэффициентов  $a_{ij}$  регрессионных зависимостей

$$K_1(R1, R2, R3) = a_0 + a_1R1 + a_2R2 + a_3R3$$

или

$$K_1(\bar{R}) = a_0 + \sum_{i=1}^3 a_i R_i \quad (6)$$

и

$$K_2(R1, R2, R3) = a_0 + a_1R1 + a_2R2 + a_3R3 + a_{12}R1 \cdot R2 + a_{13}R1 \cdot R3 + a_{23}R2 \cdot R3 + a_{11}R1^2 + a_{22}R2^2 + a_{33}R3^2$$

или

$$K_2(\bar{R}) = a_0 + \sum_{i=1}^3 a_i R_i + \sum_{i=1}^3 \sum_{j=1}^3 a_{ij} R_i \cdot R_j. \quad (7)$$

Результаты поиска коэффициентов для  $K_{II}(\bar{R})$  при разных уставках приведены в табл. 4

Очевидно, что  $K_{II}$  не зависит ни от  $R2$ , ни от взаимного влияния  $R2$  и других параметров. Окончательно, при решении задачи (3) получены зависимости

$$K_{II}(R1, R2, R3) = 0,1094 - 0,00643R1 - 4,2 \cdot 10^{-6} R2 - 0,00277R3$$

$$K_{II}(R1, R2, R3) = -19,1217 + 0,0408R1 - 0,00319R2 + 476,2 \cdot R3$$

а результат решения задачи (4) представлен в табл. 5.

Таблица 4

**Результат поиска коэффициентов аппроксимации (4) в разных реализациях имитационного эксперимента**

$y^*$	$a_0$	$a_1$	$a_2$	$a_3$	$a_{12}$	$a_{13}$	$a_{23}$	$a_{11}$	$a_{22}$	$a_{33}$
30	0,16043	-0,00991	0	-0,01132	0	0,00035	0	-0,00041	0	0,00019
40	0,14868	-0,00756	0	-0,01037	0	0,00000	0	0,00000	0	0,00020
50	0,11170	-0,00708	0	-0,00285	0	0,00000	0	0,00000	0	0,00000
60	0,15712	-0,00891	0	-0,01118	0	0,00033	0	-0,00048	0	0,00019
70	0,16354	-0,01239	0	-0,01126	0	0,00033	0	0,00000	0	0,00019
общее	0,162962	-0,01068	0	-0,01145	0	0,000348	0	-0,00031	0	0,000195

Таблица 5

**Результат решения задачи (2) в виде (7)**

	$a_0$	$a_1$	$a_2$	$a_3$	$a_{12}$	$a_{13}$	$a_{23}$	$a_{11}$	$a_{22}$	$a_{33}$
$K_{II}$	0,163	-0,0107	0	-0,0115	0	0,000348	0	-0,00031	0	0,000195
$K_{II}$	0,459	0	-0,0411	-4,691	0	0,9895	-0,125	0	0,00115	15,286

Погрешность результата, рассчитанного в соответствии с табл. 3,  $|K_{II}^* - K_{II}| \leq 0,127$ ,  $|K_{II}^* - K_{II}| \leq 13,12$ , где  $\{K_{II}^*, K_{II}^*\}$  – значения, полученные в результате имитационного эксперимента,  $\{K_{II}, K_{II}\}$  – расчетные значения.

Таким образом, решена задача расчета настроек регуляторов для объекта первого порядка с запаздыванием, позволяющая получать более качественные

переходные процессы по управлению, чем с использованием метода [1]. Следует отметить, что данные настройки не являются оптимальными при компенсации возмущений. Однако для объектов, уставка которых часто меняется (например, управляемых программно в интересах качества технологического процесса), их использование приведет к повышению качества управления.

### Список литературы

1. Ротач В.Я. Теория автоматического управления М.: Издательство МЭИ, 2004. 400 с.
2. Затонский А.В., Беккер В.Ф., Бильфельд Н.В. Управление объектом с переменными свойствами с помощью упредителя // Вестник Костромского государственного университета им. Н.А.Некрасова.– Т.15.– №2, 2009. – С. 34-37.
3. Копелович А.П. Инженерные методы расчета при выборе автоматических регуляторов М.: Металлургиздат, 1960. 190 с.
4. Бильфельд Н.В. Программа исследования динамики систем управления // Программные продукты и системы. 2010. №3. С. 118.
5. Беккер В.Ф. Системный подход к управлению непрерывно- дискретным производством губчатого титана // Известия Южного федерального университета. Технические науки. 2009. Т. 91. №2. С. 154-158.
6. Кравец О.Я. Гибридные алгоритмы оптимизации моделей множественной регрессии на основе кросскорреляции// Информационные технологии моделирования и управления. 2005. №4, с. 548-554.