

13. Danilevsky, L. N. (2011) *Designing Principles and Engineering Equipment of Energy-Efficient Houses*. Minsk, Businessofset. 375 p. (in Russian).
14. Seppanen, O. (2010) Benchmarking Regulations on Energy-Efficiency of Buildings in EU Countries. *Energoberezhenie [Power Saving]*, 7, 42–50 (in Russian).
15. Gagarin, V. G. (2009) Methods of Economic Analysis for Improving Heat Protection Rate of Building Enclosure Structures. *AVOK*, 1, 10–16 (in Russian).
16. Anderson, B. (1982) *Solar Energy (Principles of Construction Design)*. Moscow, Stroyizdat. 375 p. (in Russian).
17. Kalinin, I. M. (2003) Energy-Saving Heat Pump Technology. *Ekologicheskie Sistemy [Ecological Systems]*, 6, 12–18 (in Russian).

Представлена кафедрой
теплогазоснабжения и вентиляции

Поступила 28.08.2014

УДК 681.5

МЕТОДЫ РАСЧЕТА ОПТИМАЛЬНЫХ НАСТРОЕК СИСТЕМ УПРАВЛЕНИЯ ПО КАНАЛУ ВОЗМУЩЕНИЯ

Докторант ГОЛИНКО И. М.¹⁾, докт. техн. наук, проф. КУЛАКОВ Г. Т.²⁾,
канд. техн. наук, проф. КОВРИГО Ю. М.¹⁾

¹⁾Национальный технический университет Украины
«Киевский политехнический институт»,

²⁾Белорусский национальный технический университет

E-mail: tes_bntu@tut.by

В процессе наладки систем автоматического управления обычно отдают предпочтение элементарным формулам определения параметров оптимальной динамической настройки регуляторов, учитывающим динамику объектов управления. В большинстве случаев известные формулы ориентированы на расчет систем автоматического управления по каналу «задание – выход». Однако практически для всех непрерывных процессов основной задачей регуляторов является стабилизация выходных параметров на заданных значениях.

Разработана методика расчета параметров динамических настроек регуляторов, учитывающая динамику крайнего внешнего возмущения. Данная методика позволяет оптимизировать аналоговые и цифровые регуляторы с учетом минимизации регулирующих воздействий. При этом для оптимизации регуляторов предлагается использовать функционал, учитывающий расхождение и максимальную величину регулирующего воздействия. Так как оптимизация системы автоматического управления с ПИ-регулятором по каналу возмущения является унимодальной задачей, то основной алгоритм оптимизации реализован по методу Хука – Дживса. Для оптимизации регуляторов по каналу внешнего возмущения получены функциональные зависимости расчета параметров динамической настройки ПИ-регулятора от динамических свойств объекта управления. В отличие от существующих методов полученные зависимости позволяют оптимизировать регуляторы автоматического управления по каналу внешнего возмущения как с учетом динамических характеристик объекта управления по каналу регулирующего воздействия, так и по динамическим характеристикам канала крайнего внешнего возмущения, что, несомненно, улучшает качество регулирования переходных процессов. Расчетные формулы обеспечивают высокую точность и удобны для практического использования. В предложенном методе отсутствуют графические номограммы, что исключает субъективность исследова-

теля при определении параметров динамической настройки ПИ-регуляторов. Функциональные зависимости могут применяться для расчета настройки ПИ-регуляторов в широком диапазоне изменения динамических свойств объектов управления.

Ключевые слова: система автоматического управления, канал возмущения, оптимальная настройка.

Ил. 5. Табл. 3. Библиогр.: 13 назв.

CALCULATION METHODS OF OPTIMAL ADJUSTMENT OF CONTROL SYSTEM THROUGH DISTURBANCE CHANNEL

GOLINKO I. M.¹⁾, KULAKOV G. G.²⁾, KOVRIGO Yu. M.¹⁾

¹⁾*National Technical University of Ukraine "Kiev Polytechnic Institute"*,

²⁾*Belorussian National Technical University*

In the process of automatic control system debugging the great attention is paid to determining formulas' parameters of optimal dynamic adjustment of regulators, taking into account the dynamics of Objects control. In most cases the known formulas are oriented on design of automatic control system through channel "input-output definition". But practically in all continuous processes the main task of all regulators is stabilization of output parameters.

The Methods of parameters calculation for dynamic adjustment of regulations were developed. These methods allow to optimize the analog and digital regulators, taking into account minimization of regulated influences. There were suggested to use the fact of detuning and maximum value of regulated influence. As the automatic control system optimization with proportional plus reset controllers on disturbance channel is an unimodal task, the main algorithm of optimization is realized by Hooke – Jeeves method. For controllers optimization through channel external disturbance there were obtained functional dependences of parameters calculations of dynamic proportional plus reset controllers from dynamic characteristics of Object control. The obtained dependences allow to improve the work of controllers (regulators) of automatic control on external disturbance channel and so it allows to improve the quality of regulation of transient processes. Calculation formulas provide high accuracy and convenience in usage. In suggested method there are no nomographs and this fact expels subjectivity of investigation in determination of parameters of dynamic adjustment of proportional plus reset controllers. Functional dependences can be used for calculation of adjustment of PR controllers in a great range of change of dynamic characteristics of Objects control.

Keywords: automatic control system, the channel of disturbance, optimal adjustment.

Fig. 5. Tab. 3. Ref.: 13 titles.

Современные средства автоматизации, использующие микропроцессорную технику, позволяют существенно повысить качество регулирования и сервисные функции в системах автоматического управления (САУ) технологических процессов (ТП) при наличии необходимого программного обеспечения для микропроцессорной САУ. Среди специалистов по автоматизации стран СНГ 10 лет назад бытовало мнение, что эти задачи решают SCADA-системы (Supervisory Control and Data Acquisition). Практика

использования SCADA-систем показала, что это программное обеспечение решает только сервисные функции в системах управления, такие как диспетчеризация, архивирование трендов и их анализ, ведение технологического журнала производства и т. д. [1].

Для разработки алгоритмов регулирования и программирования контроллеров в настоящее время используют SOFTLOGIC-системы [1, 2]. Вместе с тем, большинство SOFTLOGIC-систем не могут оперировать с переменными в виде массивов, что исключает применение математических методов векторно-матричного анализа [2, 3]. На производстве в компьютерных САУ применяют программные аналоги ПИ- и ПИД-регуляторов. Эти регуляторы целесообразно настраивать оптимальным образом с учетом минимизации управляющих воздействий.

В процессе настройки САУ наладчики отдают предпочтение элементарным формулам определения параметров настройки регуляторов, используя параметры объекта управления (ОУ). Наиболее полный обзор существующих зависимостей параметров настройки регуляторов от параметров ОУ за последнее 50 лет собран в справочнике [4]. В большинстве случаев существующие формулы ориентированы на расчет САУ по каналу «задание – выход». Однако практически для всех непрерывных процессов основной задачей регуляторов является стабилизация выходных переменных на заданных значениях в условиях действия эксплуатационных возмущений, что ограничивает эффективность существующих методов расчета.

Учитывая изложенное, цель статьи – разработать инженерный метод оптимальной настройки САУ по каналу «возмущение – выход». Дополнительное условие – удобство и простота практического использования метода для настройки аналоговых и цифровых систем управления.

Рассмотрим одноконтурную САУ, структурная схема которой представлена на рис. 1. САУ состоит из регулятора, объекта управления и сумматоров. ОУ имеет два канала воздействия: канал регулирования и канал возмущения. В зависимости от ТП сигнал внешнего возмущения $\lambda(t)$ может прикладываться в разных точках ОУ. Будем считать, что в общем случае каждый канал воздействия обладает индивидуальными динамическими свойствами.

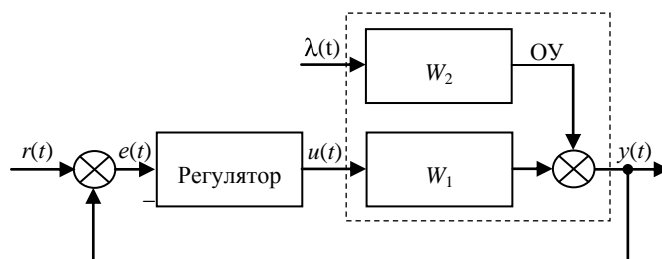


Рис. 1. Структурная схема САУ: $r(t)$ – сигнал задания; $e(t)$ – ошибка регулирования; $u(t)$ – сигнал управления; $\lambda(t)$ – внешнее возмущение; $y(t)$ – выходной сигнал ОУ; W_1, W_2 – соответственно передаточные функции ОУ по каналу управляющего воздействия $u(t)$ и внешнего возмущения $\lambda(t)$

В качестве математической модели ОУ для каналов регулирования и возмущения будем использовать передаточные функции инерционных звеньев первого порядка с запаздыванием:

$$W_1(p) = \frac{K_1}{T_1 p + 1} e^{-p\tau_1}; \quad W_2(p) = \frac{K_2}{T_2 p + 1} e^{-p\tau_2}, \quad (1)$$

где K_1, K_2 – коэффициенты передачи; T_1, T_2 – постоянные времени; τ_1, τ_2 – запаздывание ОУ для каналов регулирования и возмущения соответственно.

Использование модели (1) для синтеза САУ в большинстве практических применений считается достаточным [4–6]. Для оптимизации настроек параметров регулятора будем использовать модификацию критерия, рассмотренного в [7]:

$$I = \begin{cases} \int_0^{t_f} q|e| + 1 - q |r - K_1 u - K_2 \lambda| dt, & Nk = 1; \\ \int_0^{t_f} q e^2 + 1 - q |r - K_1 u - K_2 \lambda|^2 dt, & Nk = 2, \end{cases} \quad (2)$$

где t_f – время наблюдения переходного процесса; q – весовой коэффициент, перераспределяющий доли между сигналами рассогласования e и приведенным отклонением регулирующего воздействия $r - K_1 u - K_2 \lambda$, $q \in 0 \dots 1$; Nk – номер критерия качества.

Критерий (2) учитывает ошибку регулирования $e(t)$ и изменение регулирующего воздействия $u(t)$, приведенное к условиям протекания ТП, что позволяет минимизировать расход материальных и/или энергетических ресурсов.

В качестве регулятора будем использовать ПИ-закон регулирования с передаточной функцией вида

$$W_P(p) = K_r \left(1 + \frac{1}{T_i p} \right), \quad (3)$$

где K_r – коэффициент передачи; T_i – время интегрирования.

Динамические свойства САУ по каналу $\lambda \rightarrow y$ определяются передаточной функцией разомкнутой системы (РС) [8]

$$W_{PC}(p) = K_r \left(1 + \frac{1}{T_i p} \right) \frac{K_1 e^{-p\tau_1}}{T_1 p + 1} \quad (4)$$

и передаточной функцией канала возмущения $W_2(p)$. Так как $W_2(p)$ находится вне контура регулирования, компенсировать влияние параметра τ_2 настройками регулятора (3) не представляется возможным. Коэффициент передачи K_2 усиливает величину возмущающего воздействия пропорционально своему значению, однако не влияет на локализацию оптимальных значений настроек регулятора, учитывая линейные свойства САУ. Это позволяет оптимизировать САУ без учета параметров K_2 и τ_2 , рассматривая передаточную функцию следующего вида:

$$W_{\text{САУ}}^{\lambda \rightarrow y} p = \frac{1}{T_2 p + 1} \frac{K_1 e^{-p\tau_1}}{1 + K_r \left(1 + \frac{1}{T_i p}\right) T_1 p + 1}. \quad (5)$$

Используя подход, предложенный в [9, 10], представим (5) в «безразмерном» масштабе времени

$$W_{\text{САУ}}^* p = \frac{1}{T^* p + 1} \frac{e^{-p\tau^*}}{1 + K_r^* \left(1 + \frac{1}{T_i^* p}\right) p + 1}, \quad (6)$$

где

$$\tau^* = \frac{\tau_1}{T_1}, \quad T^* = \frac{T_2}{T_1}, \quad T_i^* = \frac{T_i}{T_1}, \quad K_r^* = K_1 K_r. \quad (7)$$

Здесь в качестве «единицы времени» используют постоянную времени T_1 . При этом переменные с индексом «*» характеризуют динамику системы управления в масштабе постоянной времени ОУ T_1 .

Для «безразмерного» масштаба времени функционал (2) примет вид:

$$I^* = \begin{cases} \int_0^{t_r^*} q |e^*| + 1 - q |r^* - u^* - \lambda^*| dt^*, & Nk = 1; \\ \int_0^{t_r^*} \left(q e^{*2} + 1 - q |r^* - u^* - \lambda^*|^2 \right) dt^*, & Nk = 2. \end{cases} \quad (8)$$

Поиск оптимальных настроек регулятора (K_r^* , T_i^*) для САУ (6) по критерию (8) производили численным методом. Алгоритмы и программная реализация методов поиска представлены в [10, 11]. Инженерный метод оптимизации САУ по каналу $r \rightarrow y$ и результаты исследований изложены в [9, 12].

Рассмотрим результаты численного исследования САУ по каналу $\lambda \rightarrow y$. Чтобы найти глобальный оптимум и исключить из рассмотрения локальные, поиск производили методом сканирования. В программе задавали область поиска, где вели перебор настроек регулятора с заданным ша-

гом. Если настройки регулятора не обеспечивали устойчивость САУ – результаты моделирования отбраковывали. Результаты оптимизации САУ с ПИ-регулятором по каналу $\lambda \rightarrow y$ для критерия (8) ($Nk = 1, q = 0,5$) и трех значений τ^* и T^* представлены на рис. 2. Если варьировать параметры Nk, q, τ^* и T^* , качественный характер графиков сохранится. Можно утверждать, что оптимизация САУ с ПИ-регулятором по критерию (8) является унимодальной задачей. Учитывая унимодальность, основной алгоритм оптимизации реализован по методу Хука – Дживса.

Результаты численного поиска настроек регулятора аппроксимировали, используя метод наименьших квадратов

$$\varepsilon^* = \sum_{s=0}^{m-1} \sum_{z=0}^{n-1} [y_{s,z}^* - f_a(\tau_s^*, T_z^*)]^2 \rightarrow \min, \quad (9)$$

где $y_{s,z}^*$ – численно найденное значение параметра регулятора; $f_a(\tau_s^*, T_z^*)$ – аппроксимирующая функция; $m \times n$ – количество численно найденных решений для параметра регулятора в области поиска.

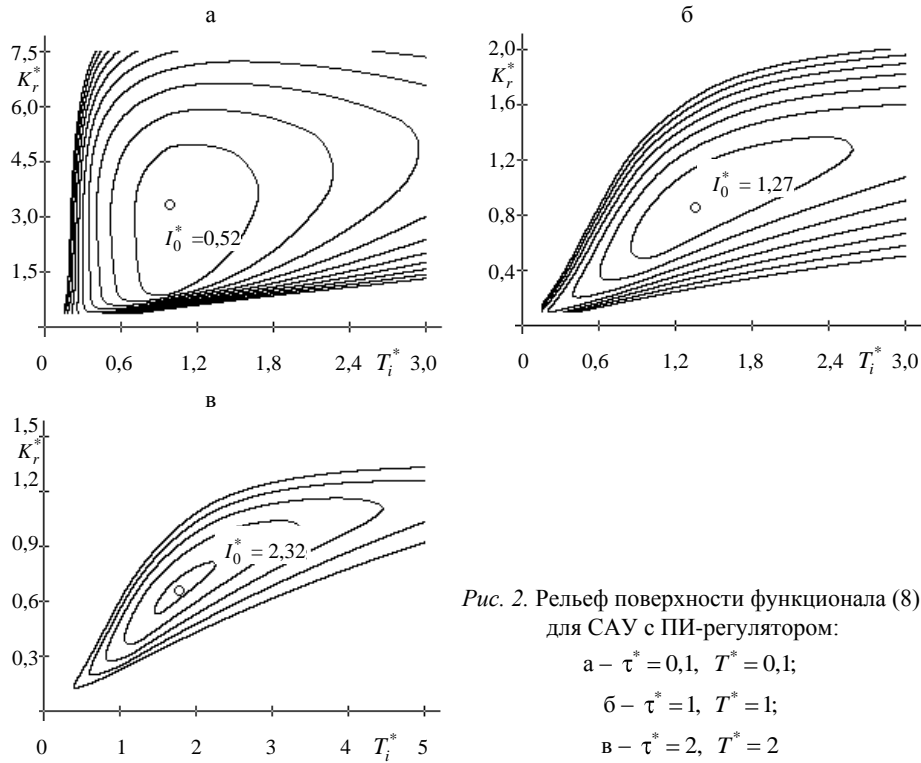


Рис. 2. Рельеф поверхности функционала (8) для САУ с ПИ-регулятором:

а – $\tau^* = 0,1, T^* = 0,1$;

б – $\tau^* = 1, T^* = 1$;

в – $\tau^* = 2, T^* = 2$

Для обеспечения условия (9) в качестве аппроксимирующей функции $f_a(\tau^*, T^*)$ использовали следующие зависимости:

$$K_r^* \tau^*, T^* = a_0 + a_1 \left(\frac{1}{\tau^*} \right)^{a_2} + a_3 \left(\frac{1}{T^* + \tau^*} \right)^{a_4}; \quad (10)$$

$$T_i^* \tau^*, T^* = b_0 + b_1 \tau^{* b_2} + b_3 T^* + \tau^{* b_4}. \quad (11)$$

Поиск параметров регулятора производили в области $\tau^* \in 0,1 \dots 2$; $\Delta\tau^* = 0,095$; $m = 10$; $T^* \in 0 \dots 2$; $\Delta T^* = 0,2$; $n = 10$.

Обратный пересчет параметров регулятора к «действительному» масштабу времени производили следующим образом. Например,

$$T_i^* = b_0 + b_1 \tau^{* b_2} + b_3 T^* + \tau^{* b_4},$$

учитывая (7), можно записать

$$\frac{T_i}{T_1} = b_0 + b_1 \left(\frac{\tau_1}{T_1} \right)^{b_2} + b_3 \left(\frac{T_2 + \tau_1}{T_1} \right)^{b_4},$$

откуда

$$T_i = T_1 \left[b_0 + b_1 \left(\frac{\tau_1}{T_1} \right)^{b_2} + b_3 \left(\frac{T_2 + \tau_1}{T_1} \right)^{b_4} \right].$$

Результаты аппроксимации настроек регулятора с учетом (7) представлены в табл. 1.

Качество аппроксимации оценивали средней относительной погрешностью, используя формулу

$$E^* = \frac{1}{m+n} \sum_{s=0}^{m-1} \sum_{z=0}^{n-1} \frac{\int_0^{t_f} |h^* t - h^a t| dt}{\int_0^{t_f} h^* t dt} \cdot 100, \quad (12)$$

$$0,1 \leq \frac{\tau_1}{T_1} \leq 2,$$

где $h^* t$, $h^a t$ – оптимальные переходные процессы в САУ, полученные численно и с помощью аппроксимирующих зависимостей из табл. 1. Найденная погрешность аппроксимации вполне допустима для инженерных задач.

Таблица 1

Параметры критерия (2)	Расчетные формулы, $0,1 \leq \frac{\tau_1}{T_1} \leq 2, 2T_1 \geq T_2$
$Nk = 1, q = 1,$ $E^* = 1,06 \%$	$K_r = \frac{1}{K_1} \left[0,257 + 1,064 \left(\frac{T_1}{\tau_1} \right)^{0,821} - 0,541 \left(\frac{T_1}{T_2 + \tau_1} \right)^{0,735} \right],$ $T_i = T_1 \left[0,61 + 1,6 \left(\frac{\tau_1}{T_1} \right)^{0,484} - 0,651 \left(\frac{T_2 + \tau_1}{T_1} \right)^{0,341} \right]$
$Nk = 1, q = 0,5,$ $E^* = 2,83 \%$	$K_r = \frac{1}{K_1} \left[0,253 + 0,89 \left(\frac{T_1}{\tau_1} \right)^{0,826} - 0,525 \frac{T_1}{T_2 + \tau_1} \right],$

	$T_i = T_1 \left[1,181 + 0,885 \left(\frac{\tau_1}{T_1} \right)^{0,756} - 0,686 \left(\frac{T_2 + \tau_1}{T_1} \right)^{0,19} \right]$
$Nk = 2, q = 1, \\ E^* = 0,75 \%$	$K_r = \frac{1}{K_1} \left[0,312 + 1,357 \left(\frac{T_1}{\tau_1} \right)^{0,792} - 0,567 \left(\frac{T_1}{T_2 + \tau_1} \right)^{0,712} \right],$ $T_i = T_1 \left[1,156 + 1,972 \left(\frac{\tau_1}{T_1} \right)^{0,548} - 1,081 \left(\frac{T_2 + \tau_1}{T_1} \right)^{0,362} \right]$
$Nk = 2, q = 0,5, \\ E^* = 4,35 \%$	$K_r = \frac{1}{K_1} \left[0,52 + 1,311 \left(\frac{T_1}{\tau_1} \right)^{0,693} - 1,149 \left(\frac{T_1}{T_2 + \tau_1} \right)^{0,702} \right],$ $T_i = 1,127 T_1 + 0,678 \tau_1 - 0,154 T_2$

Если оптимизируют параметры регулятора в цифровой САУ (ЦСАУ), необходимо учесть период квантования T_{kv} . Из теории цифровых систем известно, что период квантования T_{kv} вносит запаздывание в работу системы управления, приблизительно равное $\frac{T_{kv}}{2}$ [13]. Чтобы рассчитать оптимальные настройки ЦСАУ, используя зависимости табл. 1, достаточно определить эквивалентное запаздывание ОУ по каналу регулирования как сумму: $\tau_s = \tau_1 + \frac{T_{kv}}{2}$. Затем использовать это значение вместо τ_1 для передаточной функции $W_1(p)$

$$W_1(p) = \frac{K_1}{T_1 p + 1} e^{-p \tau_s}. \quad (13)$$

В качестве примера рассмотрим расчет оптимальной САУ с ПИ-регулятором для ОУ со следующими безразмерными передаточными функциями:

$$W_1(p) = \frac{3,6}{65p + 1} e^{-14p}; \quad W_2(p) = \frac{1,4}{54p + 1} e^{-10p}. \quad (14)$$

С учетом табл. 1 и (12) рассчитаны настройки ПИ-регулятора для возможных вариантов критерия (2), а полученные численные значения оптимальных настроек сведены в табл. 2. Также в табл. 2 представлены оптимальные настройки ПИ-регулятора для канала $r \rightarrow y$. Эти значения получены численно на основе методов и алгоритмов, приведенных в [11]. Результаты моделирования переходных процессов в САУ для каналов $\lambda \rightarrow y$ и $r \rightarrow y$ представлены на рис. 3, 4. Сравнивая пары графиков 1 и 2, 3 и 4, 5 и 6, 7 и 8, видим, что значения критерия меньше для переходных процессов, которые оптимизированы для необходимого канала воздействия. Можно сделать вывод, что настройки ПИ-регулятора, оптимизированные по каналу $r \rightarrow y$, не являются оптимальными для канала $\lambda \rightarrow y$, и наоборот. Зависимости из табл. 1 позволяют проводить расчет оптималь-

ных параметров ПИ-регулятора для САУ по каналу $\lambda \rightarrow y$ с учетом динамики канала возмущения, это отличает полученные формулы от существующих [4].

Таблица 2

Параметр критерия (2)	Параметр ПИ-регулятора, оптимизированный по каналу	
	$\lambda \rightarrow y$	$r \rightarrow y$
$Nk = 1, q = 1,0$	$K_r = 0,91, T_i = 46,1$ (график 1)	$K_r = 0,70, T_i = 63,2$ (график 2)
$Nk = 1, q = 0,5$	$K_r = 0,81, T_i = 49,8$ (график 3)	$K_r = 0,46, T_i = 62,7$ (график 4)
$Nk = 2, q = 1,0$	$K_r = 1,21, T_i = 64,3$ (график 5)	$K_r = 0,95, T_i = 94,8$ (график 6)
$Nk = 2, q = 0,5$	$K_r = 0,89, T_i = 74,4$ (график 7)	$K_r = 0,32, T_i = 70,9$ (график 8)

Рассмотрим пример расчета оптимальных настроек цифрового ПИ-регулятора. Зададимся периодами квантования в ЦСАУ, равными $T_{kv} = 8$ и 16. Для этих случаев эквивалентные передаточные функции ОУ

по каналу регулирования примут вид: $W_1 p = \frac{3,6}{65p+1} e^{-18p}$ для ЦСАУ

с $T_{kv} = 8$; $W_1 p = \frac{3,6}{65p+1} e^{-22p}$ для ЦСАУ с $T_{kv} = 16$. Результаты расчетов

сведены в табл. 3. Результаты моделирования ЦСАУ представлены на рис. 5. С учетом заявленной погрешности результаты моделирования подтверждают правомерность использования полученных формул для оптимизации ЦСАУ.

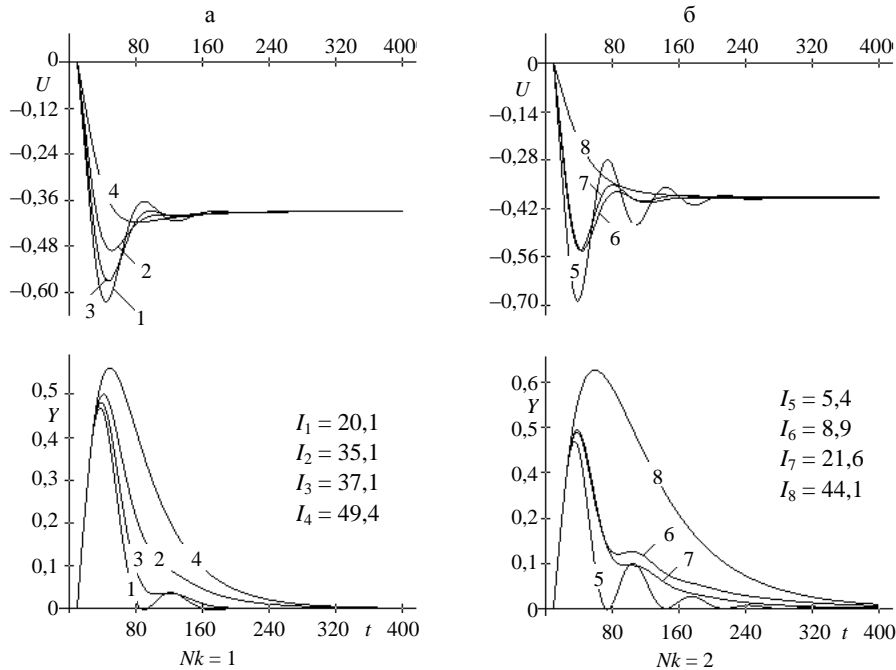


Рис. 3. Переходные характеристики САУ с ПИ-регулятором по каналу $\lambda \rightarrow y$

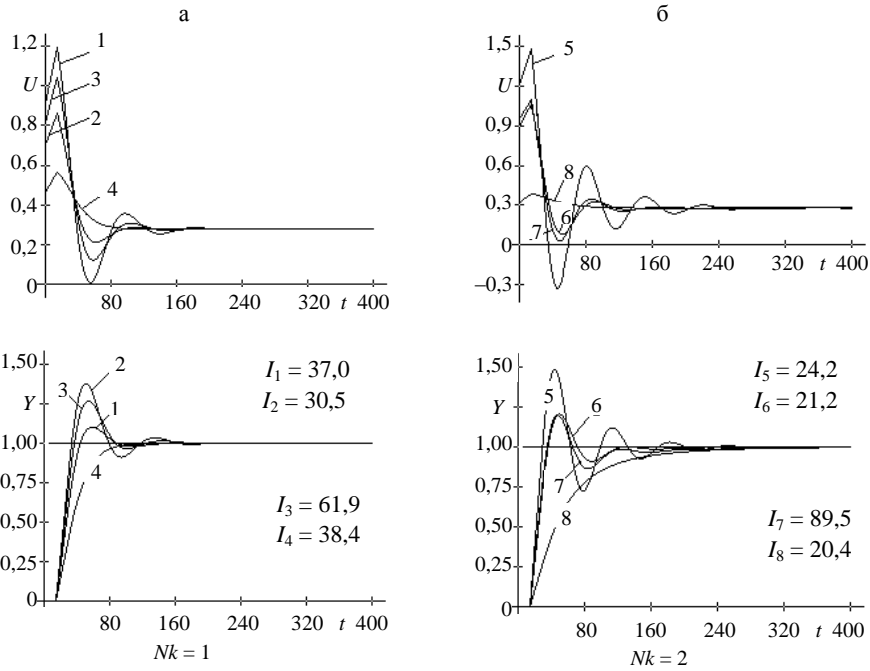


Рис. 4. Переходные характеристики САУ с ПИ-регулятором по каналу $r \rightarrow y$

Таблица 3

Параметр критерия (2)	Параметр ПИ-регулятора, оптимизированный по каналу $\lambda \rightarrow y$	
	$T_{kv} = 8$	$T_{kv} = 16$
$Nk = 1; q = 1$	$K_r = 0,78, T_i = 51,7$ (график 1, расчеты по табл. 1)	$K_r = 0,66, T_i = 56,6$ (график 3, расчеты по табл. 1)
$Nk = 1; q = 1$	$K_r = 0,86, T_i = 51,8$ (график 2, численные расчеты [9])	$K_r = 0,67, T_i = 56,2;$ (график 4, численные расчеты [9])

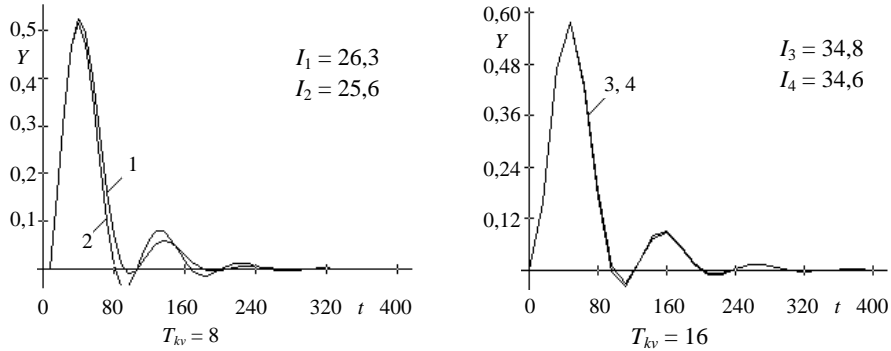


Рис. 5. Переходные процессы в ЦСАУ с ПИ-регулятором по каналу $\lambda \rightarrow y$

ВЫВОДЫ

1. Для оптимизации системы автоматического управления предлагается использовать функционал, учитывающий рассогласование и регулирующее воздействие. Оптимизация системы автоматического управления с ПИ-регулятором по каналу возмущения является унимодальной задачей.

2. Для оптимизации системы автоматического управления по каналу внешнего возмущения получены функциональные зависимости расчета па-

раметров динамической настройки ПИ-регулятора от динамических свойств объекта управления. В отличие от существующих методов полученные зависимости позволяют оптимизировать аналоговые и цифровые системы автоматического управления по каналу внешнего возмущения с учетом динамических свойств канала возмущения. Расчетные формулы обеспечивают высокую точность, удобны для практического использования.

3. В предложенном методе отсутствуют графические номограммы, что исключает субъективность исследователя при определении параметров динамической настройки ПИ-регуляторов. Функциональные зависимости могут применяться для настройки как аналоговых, так и цифровых систем автоматического управления в широком диапазоне изменения динамических свойств объектов управления:

$$0,1 \leq \frac{\tau_1}{T_1} \leq 2,0; \quad T_2 \leq 2T_1.$$

ЛИТЕРАТУРА

1. Денисенко, В. В. Компьютерное управление технологическим процессом, экспериментом, оборудованием / В. В. Денисенко. – М.: Горячая линия–Телеком, 2009. – 608 с.
2. Патрахин, В. А. Средства программирования PC-совместимых контроллеров / В. А. Патрахин // Информатизация и системы управления в промышленности. – 2004. – № 3. – С. 3–8.
3. Слободюк, М. В. Огляд сучасних засобів програмування PC-BASED контролерів / М. В. Слободюк, І. М. Голінко // Тези доповідей ІХ Міжнар. наук.-практ. конф. «Сучасні проблеми наукового забезпечення енергетики», Київ, 18–22 квітня 2011 р. – Киев: НТУУ «КПІ», 2011. – С. 304.
4. O'Dwyer, A. Handbook of PI and PID Controller Tuning Rules. – 3rd ed ICP / A. O'Dwyer. – Dublin Institute of Technology, 2010. – 623 p.
5. Кулаков, Г. Т. Анализ и синтез систем автоматического регулирования: учеб. пособие / Г. Т. Кулаков. – Минск: Технопринт, 2003. – 136 с.
6. Кузьмицкий, И. Ф. Теория автоматического управления: учеб. / И. Ф. Кузьмицкий, Г. Т. Кулаков. – Минск: БГТУ, 2010. – 574 с.
7. Голінко, І. М. Синтез оптимальної системи керування із частковою компенсацією збурення / І. М. Голінко // Наукові праці Національного університету харчових технологій. – 2013. – № 48. – С. 23–28.
8. Ротач, В. Я. Теория автоматического управления. – М.: Издательский дом МЭИ, 2008. – 396 с.
9. Голінко, І. М. Оптимальне налаштування ПІ-регулятора за інтегральними показниками якості / І. М. Голінко // Автоматика-2013: тези доповідей ХХ Міжнар. конф. з автоматичного управління, 25–27 вересня 2013 р. – Миколаїв, 2013. – С. 71–72.
10. Голінко, І. М. Синтез оптимальних систем керування із мінімізацією керуючого впливу / І. М. Голінко // Радіоелектронні і комп'ютерні системи. – 2012. – № 2 (54). – С. 79–88.
11. Голінко, І. М. Моделювання та оптимізація систем керування / І. М. Голінко, А. І. Кубрак. – Кам.–Под.: Рута, 2012. – 262 с.
12. Голінко, І. М. Оптимізація системи керування за модульним критерієм якості / І. М. Голінко, І. Є. Галицька // Інформаційні системи, механіка та керування. – 2013. – № 9. – С. 105–113.
13. Романенко, В. Д. Методи автоматизації прогресивних технологій: підручник / В. Д. Романенко. – Киев: Вища школа, 1995. – 519 с.

REFERENCES

1. Denisenko, V. V. (2009) *Computer Control of Technological Processes, Experiment, Equipment*. Moscow, Hot Line–Telecom. 608 p. (in Russian).

2. P a t r a k h i n, V. A. (2004) Means of Programming PC-Compatible Controllers. *Informatizatsiia i Sistemy Upravleniia v Promyshlennosti* [Data Storage and Control Systems in Industry], 3, 3–8 (in Russian).
3. S l o b o d j u k, M. V., & Golinko, I. M. (2011) The Inspection of Modern Peculiarities of Programming PC-BASED Controllers. *Tezi Dopovidei IX Mizhnar. Nauk.-Prakt. Konf. "Suchasni Problemi Naukovogo Zabezpechennia Energetiki"* [Proceedings of the IX International Scientific and Practical Conference "Modern Problems of Scientific Support of Power Engineering"]. Kiev: National Technical University of Ukraine "Kyiv Polytechnic Institute", 304 p. (in Ukrainian).
4. O' D w y e r, A. (2010) *Handbook of PI and PID Controller Tuning Rules*. 3rd ed ICP. Dublin Institute of Technology. 623 p.
5. K u l a k o v, G. T. (2003) *Analysis and Synthesis of Automatic Control System*. Minsk, Tehnoprnt. 136 p. (in Russian).
6. K u z m i t s k y, I. F., & Kulakov, G. T. (2010) *Theory of Automatic Control*. Minsk: BGTU. 574 p. (in Russian).
7. G o l i n k o, I. M. (2013) Synthesis of Optimal Control System. *Naukovi Pratsi Natsional'nogo Universitetu Kharkovikh Tekhnologii* [Scientific Works of National University of Food Technology], 48, 23–28 (in Ukrainian).
8. R o t a c h, V. Ya. (2008) *Theory of Automatic Control*. Moscow: Publishing House of Moscow Power Engineering Institute. 396 p. (in Russian).
9. G o l i n k o, I. M. (2013) Optimal Adjustment of PR Controllers with Integrated Factors of Quality. *Avtomatika-2013: Tezi Dopovidei XX Mizhnar. Konf. z Avtomatichnogo Upravlinnia* [Avtomatika-2013: Proceedings of the XX International Conference about Automatic Control]. Nikolaev, 71–72 (in Ukrainian).
10. G o l i n k o, I. M. (2012) Synthesis of Optimal Control System with Minimization of Regulated influences. *Radioelektronni i Komp'uterni Sistemi* [Radioelectronics and Computer Systems], 2 (54), 79–88 (in Ukrainian).
11. G o l i n k o, I. M., & Kubrak, A. I. (2012) *Methods of Optimization of Control Systems*. Kamenets-Podol'skii, Ruta. 262 p. (in Ukrainian).
12. G o l i n k o, I. M., & Galitska, I. E. (2013) Optimization of Control System with Modular – Type of Quality. *Informatsiini Sistemi, Mekhanika ta Keruvannia* [Information Systems, Mechanics, Control], 9, 105–113 (in Ukrainian).
13. R o m a n e n k o, V. D. (1995) *Methods of Automation of Advanced Technologies*. Kiev, Higher School. 519 p. (in Ukrainian).

Представлена кафедрой ТЭС БНТУ

Поступила 22.01.2014

УДК (519.9+518.5); 532.54

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ КОМПЬЮТЕРНЫХ МОДЕЛЕЙ ДЛЯ ПРОЕКТИРОВАНИЯ СЛОЖНЫХ ТРУБОПРОВОДНЫХ СИСТЕМ

**Канд. техн. наук КОЛЕСНИКОВ С. В., канд. техн. наук, доц. КУДИНОВ И. В.,
аспиранты ЕРЕМИН А. В., БРАНФИЛЕВА А. Н.**

ФГБОУ ВПО «Самарский государственный технический университет»

E-mail: totig@yandex.ru

Разработаны основные положения построения компьютерных моделей, предназначенных для проектирования трубопроводных сетей, рассматривая их как единые целые гидравлические системы. Построение новых участков теплосетей возможно лишь после их проектирования с целью обеспечения