

ИНЖЕНЕРНЫЙ МЕТОД ОПТИМИЗАЦИИ ПИ РЕГУЛЯТОРА ПО КАНАЛУ ВОЗМУЩЕНИЯ

Введение

Использование микропроцессорной техники на современном производстве изменяет подходы к анализу и синтезу систем автоматического управления (САУ) технологических процессов (ТП). В настоящее время к САУ ТП предъявляются высокие требования по обеспечению эффективности работы в стационарных и переменных режимах. На современном этапе САУ ТП должна обеспечивать необходимое качество регулирования, минимизировать расход материальных и/или энергетических ресурсов для достижения поставленных целей, а также ограничивать износ исполнительных устройств.

В процессе настройки САУ наладчики отдают предпочтение элементарным формулам определения параметров настройки регуляторов, используя параметры объекта управления (ОУ). На сегодня наиболее полный обзор существующих зависимостей за последнее 50 лет собран в справочнике [1]. В большинстве случаев существующие формулы расчета регулятора ориентированы на ОУ первого порядка с запаздыванием (при этом диапазон применимости формул небольшой) и практически все формулы справедливы только для расчета системы управления по каналу задание – выход.

Однако, для многих непрерывных ТП (в частности для процессов ТЭС и АЭС) основной задачей регуляторов является стабилизация выходных переменных на заданных значениях в условиях действия эксплуатационных возмущений.

Постановка задачи исследования

Учитывая изложенное, цель работы – разработать инженерный метод оптимальной настройки САУ по каналу возмущения для ОУ второго порядка с запаздыванием. Кроме этого, метод должен отличаться удобством и простотой практического использования для настройки аналоговых и цифровых систем управления.

Инженерный метод оптимизации САУ

Рассмотрим одноконтурную САУ, структурная схема, которой представлена рис. 1. САУ состоит из регулятора, ОУ и сумматоров.

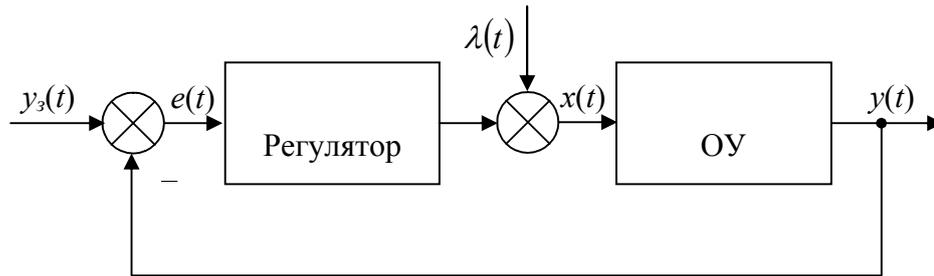


Рис. 1. Структура схема САУ

На схеме используются следующие обозначения: $y_3(t)$ – сигнал задания, $e(t)$ – ошибка регулирования, $\lambda(t)$ – внешнее возмущение, $x(t)$ – входной сигнал ОУ, $y(t)$ – выходной сигнал ОУ. В общем случае сигнал внешнего возмущения $\lambda(t)$ может прикладываться в разных точках ОУ. Если точка приложения возмущения не конкретизирована, считают, что возмущение действует на входе ОУ как максимально возможное внешнее возмущение. Примером такого возмущения может служить изменение расхода материального потока в регулируемом трубопроводе за счет изменения перепада давлений в трубной системе при постоянном положении штока регулирующего клапана. Другим примером может быть изменение температуры теплоносителя (за счет температурных возмущений внешней среды) в технологическом процессе при регулировании расхода теплоносителя. В ТП таких примеров множество.

В качестве математической модели ОУ рассмотрим аperiodическое звено второго порядка с запаздыванием:

$$W_{Oy}(p) = \frac{K}{(T_1 p + 1)(T_2 p + 1)} e^{-p\tau}, \quad (1)$$

где: K – коэффициент передачи, T_1 и T_2 – постоянные времени, τ – запаздывание ОУ. Использование модели (1) для синтеза САУ в большинстве практических применений считается достаточным.

Для оптимизации настроек параметров регулятора будем использовать модификацию критерия рассмотренного в [2, 3]:

$$I = \begin{cases} \int_0^{t_f} (q|e| + (1-q)|y_3 - Kx|) dt, & Nk = 1; \\ \int_0^{t_f} (q e^2 + (1-q)(y_3 - Kx)^2) dt, & Nk = 2, \end{cases} \quad (2)$$

здесь: t_f – время наблюдения переходного процесса; q – весовой коэффициент, перераспределяющий доли между сигналами рассогласования e и приведенным отклонением регулирующего

воздействия $y_3 - Kx$, $q \in [0...1]$; Nk – номер критерия качества. Достоинством критерия (2) является то, что он учитывает ошибку регулирования e и изменение регулирующего воздействия u приведенное к условиям протекания ТП.

Для настройки будем рассматривать ПИ регулятор:

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

где: K_r – коэффициент передачи, T_i – время интегрирования.

Динамические свойства САУ определяются передаточной функцией разомкнутой системы (РС) [4]. При условии, что $T_1 \geq T_2$ и если в качестве “единицы времени” используется постоянная времени T_1 – передаточная функция РС примет вид:

$$W_{PC}(p) = K_r^* \left(1 + \frac{1}{T_i^* p} \right) \frac{e^{-p\tau^*}}{(p+1)(T^* p + 1)}, \quad (4)$$

здесь

$$\tau^* = \frac{\tau}{T_1}, \quad T^* = \frac{T_2}{T_1}, \quad T_i^* = \frac{T_i}{T_1}, \quad K_r^* = K \cdot K_r. \quad (5)$$

Переменные с индексом «*» обозначают динамику САУ в масштабе постоянной времени T_1 . Учитывая (4), можно рассматривать САУ, в которой ОУ представляется передаточной функцией:

$$W_{OV}^*(p) = \frac{e^{-p\tau^*}}{(p+1)(T^* p + 1)}. \quad (6)$$

Таким образом, динамические свойства ОУ однозначно определяются относительным запаздыванием τ^* и постоянной времени T^* ($0 \leq T^* \leq 1$).

Для “безразмерного масштаба времени” функционал (2) примет вид:

$$I^* = \begin{cases} \int_0^{t_f^*} (q |e^*| + (1-q) |y_3^* - x^*|) dt^*, & Nk = 1; \\ \int_0^{t_f^*} (q (e^*)^2 + (1-q) (y_3^* - x^*)^2) dt^*, & Nk = 2. \end{cases} \quad (7)$$

Поиск оптимальных настроек ПИ регулятора для ОУ (6) по критерию (7) производился численно. Алгоритмы и программная реализация методов поиска представлены в [2, 5]. Инженерный метод оптимизации САУ по каналу $y_3 \rightarrow u$ и результаты исследований изложены в [6, 7].

Рассмотрим результаты оптимизации САУ по каналу $\lambda \rightarrow y$. Чтобы найти глобальный оптимум и исключить из рассмотрения локальные, поиск производился методом сканирования. В программе задавалась область поиска, где производился перебор настроек регулятора с заданным шагом. Если настройки регулятора не обеспечивали устойчивость САУ – результаты моделирования отбраковывались.

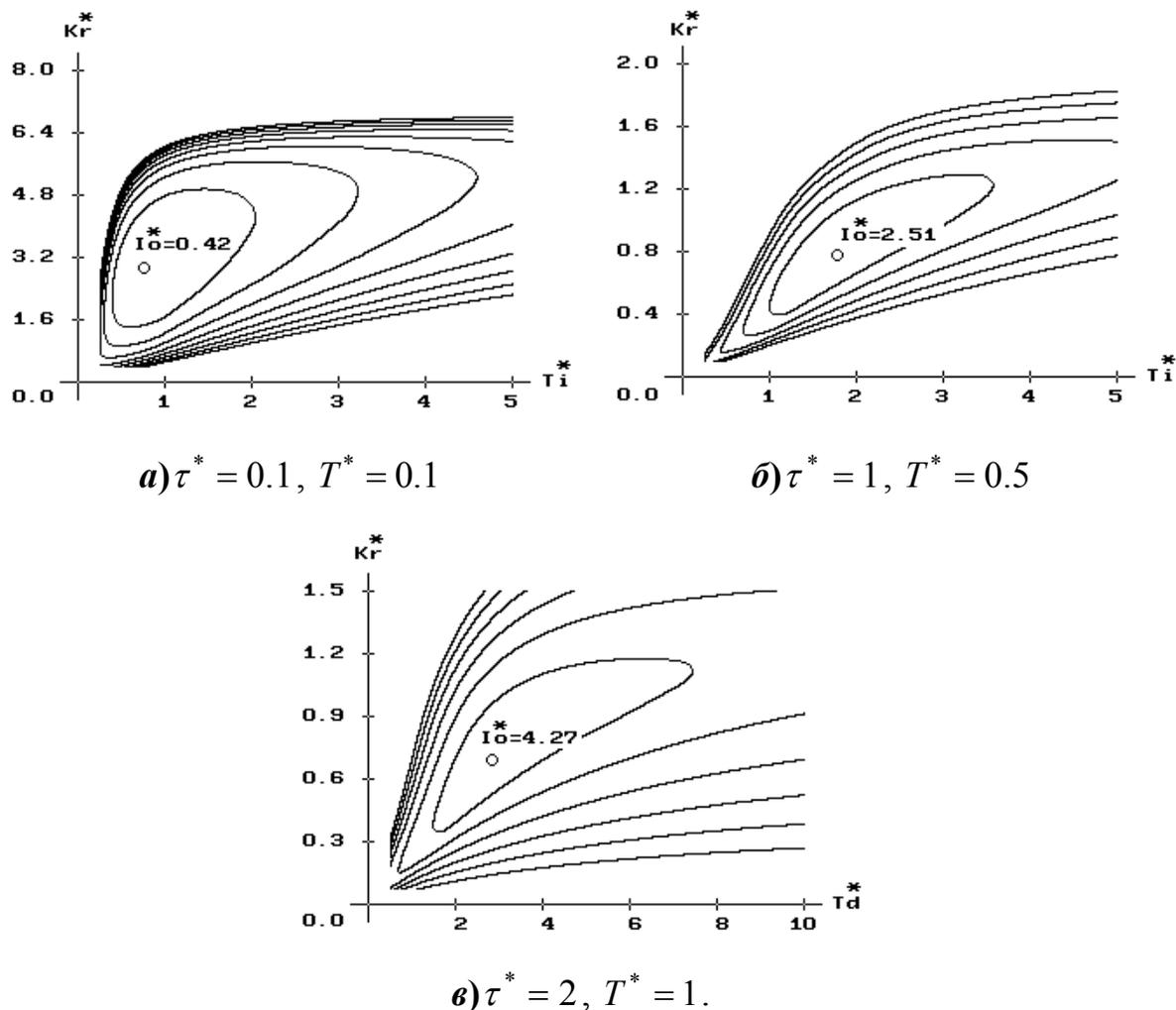


Рис. 2. Рельеф поверхности функционала (7) для САУ с ПИ регулятором

На рис. 2 представлены результаты оптимизации САУ с ПИ регулятором по каналу $\lambda \rightarrow y$ для критерия (7) ($Nk=1, q=0.5$) и трех значений τ^* и T^* . Если варьировать параметры Nk, q, τ^* и T^* – качественный характер графиков не изменится. Можно утверждать, что оптимизация САУ по каналу $\lambda \rightarrow y$ для ОУ (6) является унимодальной задачей. Учитывая унимодальность решаемой задачи, основной алгоритм численной оптимизации САУ реализован используя метод Хука-Дживса.

Результаты численного поиска настроек регулятора аппроксимировались, используя метод наименьших квадратов:

$$\varepsilon^* = \sum_{s=0}^m \sum_{z=0}^n [y_{s,z}^* - f_a(\tau_s^*, T_z^*)]^2 \rightarrow \min, \quad (8)$$

здесь $y_{s,z}^*$ – 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. Для обеспечения условия (10) в качестве аппроксимирующей функции $f_a(\tau^*, T^*)$ использовались зависимости:

$$f_a(\tau^*, T^*) = a_0 + a_1 \left(\frac{1}{\tau^*} \right)^{a_2} + a_3 \left(\frac{1}{\tau^* + T^*} \right)^{a_4} \quad - \quad \text{для параметра } K_r^*$$

регулятора; $f_a(\tau^*, T^*) = a_0 + a_1 (\tau^*)^{a_2} + a_3 (\tau^* + T^*)^{a_4}$ – для параметра T_i^* регулятора. Поиск параметров регулятора производился в области: $\tau^* \in [0.1 \dots 2]$, $\Delta \tau^* = 0.19$, $m=10$; $T^* \in [0 \dots 1]$, $\Delta T^* = 0.1$, $n=10$.

Обратный пересчет параметров регулятора к “действительному” масштабу времени производится следующим образом. Например, $T_i^* = a_0 + a_1 (\tau^*)^{a_2} + a_3 (\tau^* + T^*)^{a_4}$, учитывая (5) можно записать $\frac{T_i}{T_1} = a_0 + a_1 \left(\frac{\tau}{T_1} \right)^{a_2} + a_3 \left(\frac{\tau}{T_1} + \frac{T_2}{T_1} \right)^{a_4}$, откуда $T_i = T_1 \left[a_0 + a_1 \left(\frac{\tau}{T_1} \right)^{a_2} + a_3 \left(\frac{\tau + T_2}{T_1} \right)^{a_4} \right]$.

Результаты аппроксимации настроек ПИ регулятора с учетом (5) содержатся в табл. 1.

Качество аппроксимации оценивалось средней относительной погрешностью, используя формулу:

$$E^* = \frac{1}{(m+n)} \sum_{s=0}^m \sum_{z=0}^n \frac{\int_0^{t_f} |h(t) - h^a(t)| dt}{\int_0^{t_f} h(t) dt} \cdot 100, \quad (9)$$

где, $h(t)$ и $h^a(t)$ – оптимальные переходные процессы в САУ полученные численно и с помощью аппроксимирующих зависимостей из табл. 1. Полученная погрешность аппроксимации вполне допустима для инженерных задач. Следует отметить, что полученные зависимости оптимального поиска параметров ПИ регуляторов для $q < 0.5$ практического интереса не представляют, так как в расчетах САУ главным является учет ошибки рассогласования.

В случае оптимизации цифровой САУ (ЦСАУ), необходимо учитывать дискретную работу регулятора. Из теории цифровых систем известно [8], что период квантования T_{kv} вносит запаздывание в работу

системы управления равную $\frac{T_{kv}}{2}$. Таким образом, чтобы рассчитать оптимальные настройки ЦСАУ используя зависимости табл. 1, достаточно определить эквивалентное запаздывание ОУ в системе как сумму: $\tau_э = \tau + \frac{T_{kv}}{2}$, а для расчетов использовать передаточную функцию эквивалентного ОУ с учетом T_{kv} :

$$W_{эоу}(p) = \frac{K}{(T_1 p + 1)(T_2 p + 1)} e^{-p\tau_э}. \quad (10)$$

Таблица 1.

Функциональные зависимости для оптимизации САУ с ПИ регулятором

Параметры критерия (2)	Расчетные формулы, $0.1 \leq \frac{\tau}{T_1} \leq 2, T_1 \geq T_2$
$Nk=1, q=1,$ $E^* = 1.4 \%$	$K_r = \frac{1}{K} \left[1.048 + 1.152 \left(\frac{T_1}{\tau} \right)^{0.778} - 1.306 \left(\frac{T_1}{\tau + T_2} \right)^{0.281} \right],$ $T_i = T_1 \left[0.206 - 1.331 \left(\frac{\tau}{T_1} \right)^{0.663} + 2.467 \left(\frac{\tau + T_2}{T_1} \right)^{0.619} \right]$
$Nk=1, q=0.5,$ $E^* = 2.54 \%$	$K_r = \frac{1}{K} \left[0.162 + 0.678 \left(\frac{T_1}{\tau} \right)^{0.684} + 0.03 \left(\frac{T_1}{\tau + T_2} \right)^{1.787} \right],$ $T_i = T_1 \left[0.617 - 0.913 \left(\frac{\tau}{T_1} \right)^{0.672} + 1.572 \left(\frac{\tau + T_2}{T_1} \right)^{0.753} \right]$
$Nk=2, q=1,$ $E^* = 3.24 \%$	$K_r = \frac{1}{K} \left[0.856 + 1.46 \left(\frac{T_1}{\tau} \right)^{0.797} - 1.117 \left(\frac{T_1}{\tau + T_2} \right)^{0.435} \right],$ $T_i = T_1 \left[0.077 - 1.451 \left(\frac{\tau}{T_1} \right)^{0.716} + 3.075 \left(\frac{\tau + T_2}{T_1} \right)^{0.613} \right]$
$Nk=2, q=0.5,$ $E^* = 2.45 \%$	$K_r = \frac{1}{K} \left[0.305 + 0.83 \left(\frac{T_1}{\tau} \right)^{0.736} + 0.031 \left(\frac{T_1}{\tau + T_2} \right)^{1.577} \right],$

Параметры критерия (2)	Расчетные формулы, $0.1 \leq \frac{\tau}{T_1} \leq 2, T_1 \geq T_2$
	$T_i = T_1 \left[1.96 - 3.13 \left(\frac{\tau}{T_1} \right)^{0.358} + 2.818 \left(\frac{\tau + T_2}{T_1} \right)^{0.624} \right]$

Примеры моделирования САУ

В качестве примера рассмотрим расчет оптимальной САУ с ПИ регулятором без привязки к конкретному ТП. Динамические свойства ОУ и настройки регулятора представляются без размерностей. Динамические свойства ОУ выбраны произвольно:

$$W_{OY}(p) = \frac{2.3}{(49p+1)(98p+1)} e^{-10p}. \quad (11)$$

Используя табл. 1 и (11), рассчитаны настройки ПИ регулятора для возможных вариантов критерия (2), численные значения сведены в табл. 2. Также в табл. 2 представлены оптимальные настройки ПИ регулятора для канала $y_3 \rightarrow y$. Значения параметров получены численно используя методы и алгоритмы, описанные в [6].

Таблица 2.

Оптимальные настройки регулятора по критерию (2)

Параметры критерия (2)	Значения параметров ПИ регулятора	
	$\lambda \rightarrow y$; (номер графика)	$y_3 \rightarrow y$; (номер графика)
$Nk=1, q=1$	$K_r=2.76, T_i=168.1$; (график 1)	$K_r=1.74, T_i=190$; (график 5)
$Nk=1, q=0.5$	$K_r=1.05, T_i=146.3$; (график 2)	$K_r=1.02, T_i=184$; (график 6)
$Nk=2, q=1$	$K_r=3.68, T_i=200.6$; (график 3)	$K_r=2.96, T_i=424$; (график 7)
$Nk=2, q=0.5$	$K_r=2.1, T_i=257.8$; (график 4)	$K_r=0.78, T_i=650$; (график 8)

На рис. 3 и рис. 4 представлены результаты моделирования переходных процессов в САУ для каналов $\lambda \rightarrow y$ и $y_3 \rightarrow y$. Сравнивая пары графиков 1 и 5, 2 и 6, 3 и 7, 4 и 8 видно, что значения критерия меньше для переходных процессов, которые оптимизированы для необходимого канала воздействия. Таким образом, можно сделать вывод,

что настройки ПИ регулятора, оптимизированные по каналу $y_3 \rightarrow y$, не являются оптимальными для канала $\lambda \rightarrow y$ и наоборот.

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

$$W_{ЭОУ}(p) = \frac{2.3}{(49p+1)(98p+1)} e^{-14p} \quad \text{для ЦСАУ с } T_{kv} = 8 \quad \text{и}$$

$$W_{ЭОУ}(p) = \frac{2.3}{(49p+1)(98p+1)} e^{-18p} \quad \text{для ЦСАУ с } T_{kv} = 16.$$

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

$$W_{ЭОУ}(p) = \frac{2.3}{(49p+1)(98p+1)} e^{-14p} \quad \text{для ЦСАУ с } T_{kv} = 8 \quad \text{и}$$

$$W_{ЭОУ}(p) = \frac{2.3}{(49p+1)(98p+1)} e^{-18p} \quad \text{для ЦСАУ с } T_{kv} = 16.$$

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.

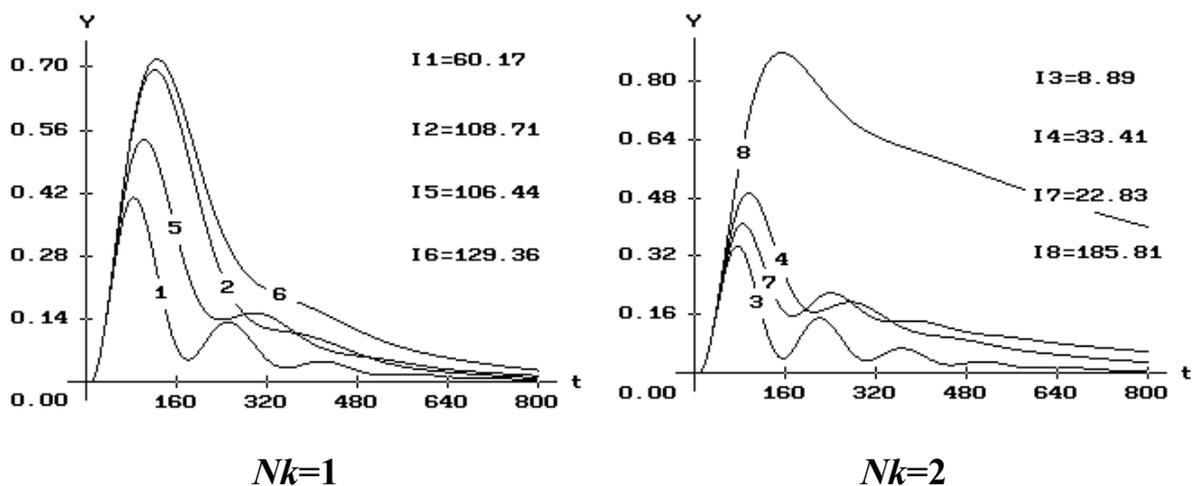


Рис. 3. Переходные характеристики САУ с ПИ регулятором по каналу $\lambda \rightarrow y$

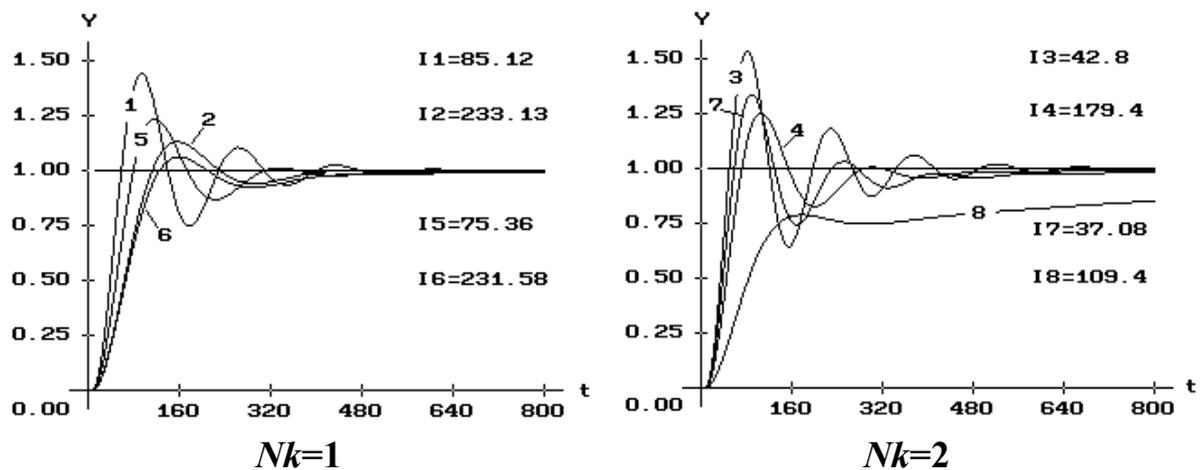


Рис. 4. Переходные характеристики САУ с ПИ регулятором по каналу $y_3 \rightarrow y$

Таблица 3.

Оптимальные настройки регулятора по критерию (2)

Параметры критерия (2)	Значения параметров ПИ регулятора по каналу $\lambda \rightarrow y$	
	$T_{kv} = 8$; (номер графика)	$T_{kv} = 16$; (номер графика)
$Nk=1, q=1$	$K_r=2.09, T_i=168.2$; (график 1, расчеты по табл.1)	$K_r=1.74, T_i=190$; (график3, расчеты по табл.1)
$Nk=1, q=1$	$K_r=1.9, T_i=168$; (график 2, численные расчеты [6])	$K_r=1.6, T_i=168$; (график 4, численные расчеты [6])

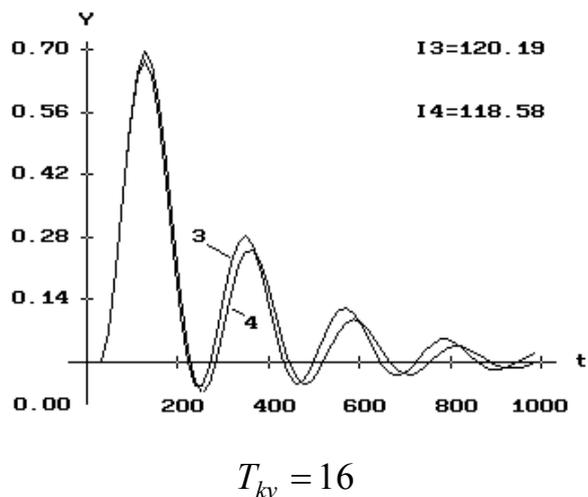
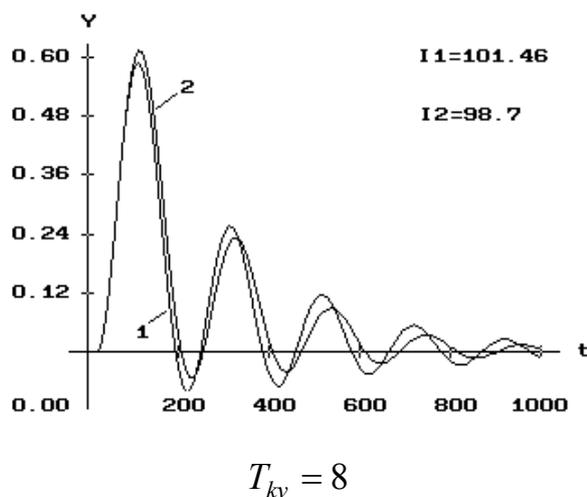


Рис. 5. Переходные процессы в ЦСАУ с ПИ регулятором по каналу $\lambda \rightarrow y$

Выводы

Для оптимизации САУ с ОУ (1) предлагается использовать функционал (2), учитывающий рассогласование и изменение регулирующего воздействия, что позволяет минимизировать расход материальных и/или энергетических потоков. Оптимизация САУ по каналу возмущения является унимодальной задачей. Для предложенного критерия оптимизации САУ получены функциональные зависимости расчета параметров ПИ регулятора от динамических свойств ОУ. В отличие от существующих формул, полученные зависимости позволяют оптимизировать аналоговые и цифровые САУ по каналу возмущения, что актуально для непрерывных технологических процессов. Расчетные формулы обеспечивают высокую точность, удобны для практического использования. В предложенном инженерном методе отсутствуют графические номограммы, что исключает субъективность определения параметров ПИ регулятора. Функциональные зависимости могут применяться для настройки аналоговых и цифровых САУ в широком диапазоне динамических свойств ОУ: $0.1 \leq \frac{\tau}{T_1} \leq 2, T_1 \geq T_2$.

Список використаної літератури

1. *Aidan O'Dwyer Handbook of PI and PID Controller Tuning Rules.* – Dublin Institute of Technology, 2006. – 545 p.
2. *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.
3. *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.
4. *Ротач В. Я.* Теория автоматического управления. – М.: Издательский дом МЭИ, 2008. – 396 с.
5. *Голінко І. М.* Моделювання та оптимізація систем керування: Монографія / І. М. Голінко, А. І. Кубрак // – Кам'янець–Подільський: Рута, 2012. – 262 с.
6. *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.

7. *Голінко І. М.* Оптимальне налаштування ПІ регулятора за інтегральними показниками якості / *І. М. Голінко* // Автоматика – 2013: Тези доповідей XX Міжнародної конференції з автоматичного управління, 25 – 27 вересня 2013 р. – Київ, 2013. С. 71-72.
8. *Романенко В.Д.* Методи автоматизації прогресивних технологій: Підручник. / *В.Д. Романенко*//–К.: Вища школа, 1995. -519 с.