

Автоматизация и управление технологическими процессами и производствами, системы автоматизации проектирования

Научная статья

Статья в открытом доступе

УДК 681.5

doi: 10.30987/2658-6436-2024-1-4-12

СИСТЕМА АВТОМАТИЧЕСКОГО УПРАВЛЕНИЯ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИМ ОБЪЕКТОМ ВТОРОГО ПОРЯДКА С ЗАПАЗДЫВАНИЕМ НА ОСНОВЕ РЕГУЛЯТОРА СОСТОЯНИЯ

Владимир Алексеевич Кривоносов¹, Артем Викторович Коренев^{2✉}

^{1, 2} Старооскольский технологический институт им. А.А. Угарова (филиал) Национальный исследовательский технологический университет «МИСИС», г. Старый Оскол, Россия

¹ krivonosov_v_a@mail.ru, <http://orcid.org/0009-0002-9615-2561>

² korenev01@mail.ru, <http://orcid.org/0000-0001-7252-7272>

Аннотация. Рассматривается построение системы автоматического управления (САУ) технологическими объектами на основе регулятора состояния с наблюдателем, непрерывно оценивающим координаты состояния объекта и низкочастотную составляющую входного возмущения. В качестве примера рассмотрен процесс построения САУ для технологического объекта, математическая модель которого может быть представлена в виде последовательного соединения апериодического звена второго порядка и звена запаздывания. Неизменяемая часть САУ включает объект управления и исполнительное устройство, модель которого описывается апериодическим звеном первого порядка. Подробно изложена предлагаемая процедура разработки структуры и определения коэффициентов коррекции движения наблюдателя, позволяющая обеспечить приемлемую скорость сходимости процесса наблюдения с учетом интенсивности помех измерения выходного сигнала объекта. Проведен сравнительный анализ качества функционирования разработанной САУ и альтернативной САУ на основе ПИД-регулятора. Настройка параметров регулятора состояния и ПИД-регулятора выполнена в режиме отработки ступенчатого задания при отсутствии входных возмущающих воздействий. Для настройки использованы процедуры многократного моделирования переходных процессов в MATLAB SIMULINK. Сравнительный анализ качества САУ выполнен по инженерным показателям функционирования систем при различных вариантах сочетания задающего и возмущающего воздействий. Результаты анализа показали, что система с регулятором состояния обеспечивает существенно более высокое качество управления во всех контрольных режимах. Проведенные исследования позволяют рекомендовать разработку и внедрение САУ с наблюдателем и регулятором состояния для повышения эффективности управления достаточно широким классом реальных технологических объектов, которые могут быть описаны апериодическим звеном второго порядка с запаздыванием.

Ключевые слова: САУ, пространство состояний, наблюдатель координат состояния, оценка возмущения, регулятор состояния, ПИД-регулятор

Для цитирования: Кривоносов В.А., Коренев А.В. Система автоматического управления технологическим объектом второго порядка с запаздыванием на основе регулятора состояния // Автоматизация и моделирование в проектировании и управлении. 2024. №1 (23). С.4-12. doi: 10.30987/2658-6436-2024-1-4-12.

Original article

Open Access Article

AUTOMATIC CONTROL SYSTEM FOR SECOND-ORDER TECHNOLOGICAL PROCESS WITH TIME DELAY BASED ON STATE FEEDBACK CONTROLLER

Vladimir A. Krivonosov¹, Artem V. Korenev²✉

^{1, 2} Stary Oskol Technological Institute named after A.A. Ugarov (branch) of MISiS University of Science and Technology, Stary Oskol, Russia

¹ krivonosov_v_a@mail.ru, <http://orcid.org/0009-0002-9615-2561>

² korenev01@mail.ru, <http://orcid.org/0000-0001-7252-7272>

Abstract. *The paper considers the construction of an automatic control system (ACS) for technological objects based on a state feedback controller with an observer continuously estimating the object state coordinates and the low-frequency component of the input disturbance. As an example, the paper considers the process of constructing an ACS for a technological object whose mathematical model can be represented as a serial connection of a second-order aperiodic link and a delay link. The invariant part of the ACS includes a control object and an actuator, the model of which is described by a first-order aperiodic link. The paper describes in detail the proposed procedure for developing the structure and determining the correction coefficients for the motion observer, which allows ensuring an acceptable speed of convergence of the observation process, taking into account the intensity of measurement noise of the object output signal. A comparative analysis of the quality of the developed ACS and an alternative ACS based on the PID-regulator is carried out. The parameters of the state regulator and the PID-regulator are configured in the mode of processing a step response in the absence of input disturbing influences. For configuration, procedures for multiple simulations of transients in MATLAB SIMULINK are used. The comparative analysis of ACS quality is performed according to engineering performance indicators of systems under various combinations of setting and disturbing influences. The results of the analysis show that the system with the state controller provides a significantly higher control quality in all control modes. The conducted studies allow recommending the development and implementation of ACS with an observer and a state regulator to improve the control efficiency of a fairly wide class of real technological objects, which can be described by a second-order aperiodic link with a delay.*

Keywords: ACS, state space, state coordinate observer, disturbance estimation, state controller, PID-regulator

For citation: Krivonosov V.A., Korenev A.V. Automatic Control System for Second-Order Technological Process with Time Delay Based on State Feedback Controller. Automation and modeling in design and management, 2024, no. 1 (23), pp. 4-12. doi: 10.30987/2658-6436-2024-1-4-12.

Введение

В настоящее время САУ технологических объектов управления чаще всего строятся на основе ПИ- и ПИД-регуляторов [1, 2]. Существует ряд сравнительно простых методик настройки таких регуляторов, применение которых позволяет добиться приемлемого качества управления, и которыми владеет персонал служб автоматизации предприятий. Кроме того, в большинстве контроллеров, используемых при построении САУ, имеются программы, реализующие ПИД-регуляторы.

Эффективность функционирования многих промышленных объектов существенно зависит от точности поддержания заданного технологического режима в условиях действия не измеряемых возмущений, что предъявляет повышенные требования к качеству функционирования САУ. Однако САУ на основе ПИД-регуляторов не всегда способны обеспечить и высокое качество отработки изменения задания и эффективно подавлять действие возмущения.

Одним из альтернативных вариантов САУ технологическими объектами являются системы, в которых используются регуляторы состояния [3]. Такая система использует наблюдатель, который оценивает координаты состояния и низкочастотную составляющую не измеряемого возмущения. Рассмотрим подробнее процесс разработки такой САУ на примере системы, неизменяемая часть которой представлена на рис. 1.

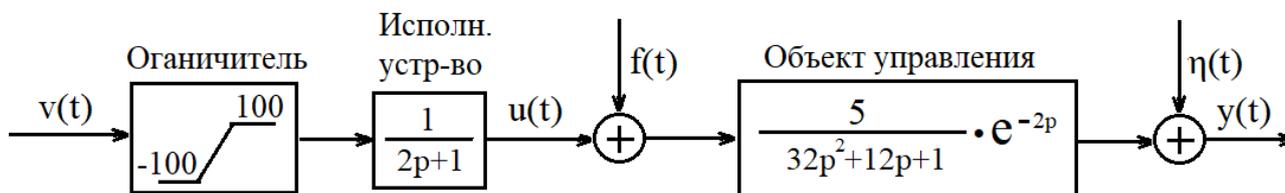


Рис. 1. Структурная схема неизменяемой части системы управления
Fig. 1. Block diagram of the immutable part of the control system

Сигнал управления $v(t)$, сформированный регулятором, перед подачей на исполнительное устройство ограничивается. На вход объекта подается управляющее воздействие $u(t)$ и не измеряемое возмущение $f(t)$. Выход объекта $y(t)$ измеряется с помехой $\eta(t)$, имеющей нулевое математическое ожидание. Математическая модель объекта описывается последовательным соединением аperiodического звена второго порядка и звена запаздывания.

Разработка САУ на основе регулятора состояния неизменяемой части

Неизменяемая часть системы включает два динамических звена:

- объект управления, математическая модель которого включает последовательное соединение аperiodического звена второго порядка и звена запаздывания;
- исполнительное устройство описывается аperiodическим звеном первого порядка, выход которого – положение исполнительного устройства измеряется.

Структурная схема разрабатываемой САУ приведена на рис. 2.

В управляющей части системы используется наблюдатель, оценивающий координаты состояния объекта и возмущение $f(t)$ [4 – 6], а также регулятор состояния [7].

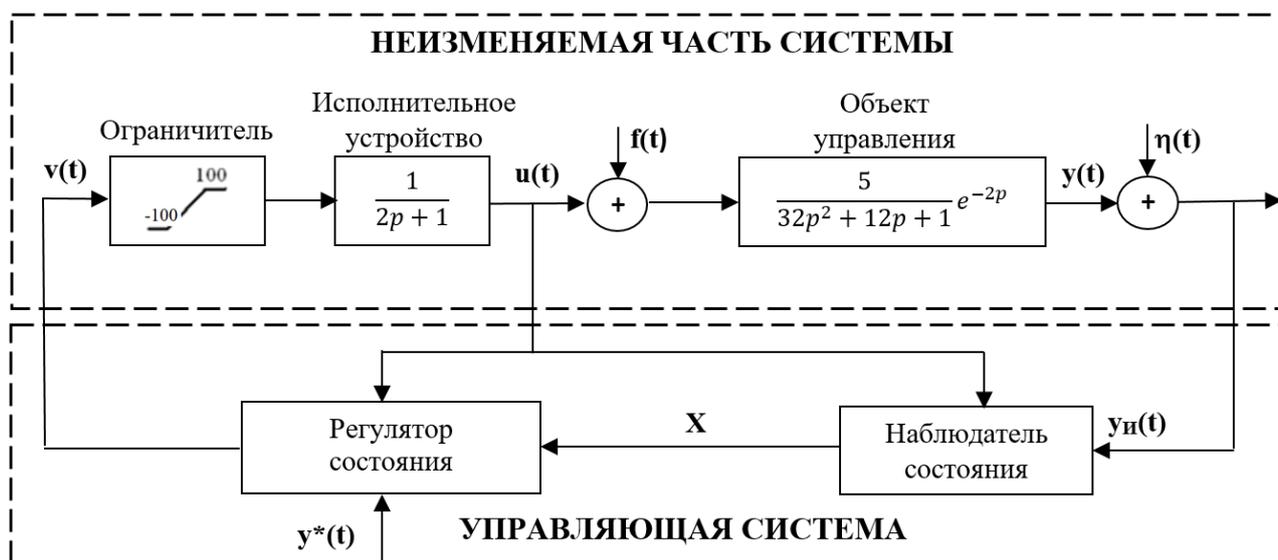


Рис. 2. Структурная схема системы управления
Fig. 2. Block diagram of the control system

Выход объекта $y(t)$ измеряется с погрешностью $\eta(t)$, и результат измерения $y_u(t)$, а также измеряемый выход исполнительного устройства $u(t)$ используются наблюдателем для оценки координат состояния объекта и возмущения $f(t)$.

Заменим передаточную функцию e^{-2p} в объекте при помощи аппроксимации Паде для экспоненциальных функций [8, 9]:

$$W_{ov}(p) = \frac{5}{32p^2 + 12p + 1} \cdot \frac{1-p}{1+p} = \frac{5-5p}{32p^3 + 44p^2 + 13p + 1}.$$

Запишем дифференциальное уравнение объекта в операторной форме:

$$(32p^3 + 44p^2 + 13p + 1)y(t) = (5 - 5p)u(t), \quad (1)$$

где p – оператор дифференцирования.

Первую координату состояния объекта $x_1(t)$ выберем, разделив обе части (1) на произведение операторов $(32p^3 + 44p^2 + 13p + 1)(5 - 5p)$:

$$(5 - 5p)^{-1}y = (32p^3 + 44p^2 + 13p + 1)^{-1}(u + f) = x_1(t).$$

Остальные координаты выберем следующим образом: $x_2(t) = x_1'(t)$; $x_3(t) = x_2'(t)$; $x_4(t) = f(t)$. Символом «'» здесь и далее обозначена производная по времени.

Объект управления является фильтром низкой частоты, который достаточно эффективно подавляет высокочастотные составляющие возмущения $f(t)$. Только низкочастотные составляющие $f(t)$ будет оценивать наблюдатель и подавлять регулятор. Поэтому в модели объекта и наблюдателя будем предполагать, что $f(t) = \text{const}$.

Уравнения, описывающие движение объекта в пространстве выбранных координат состояния, имеет вид системы нормальных уравнений:

$$\begin{cases} x_1'(t) = x_2(t); \\ x_2'(t) = x_3(t); \\ x_3'(t) = \frac{1}{32}(-44x_3(t) - 13x_2(t) - x_1(t) + u(t) + f(t)); \\ x_4'(t) = 0. \end{cases}$$

Уравнение, связывающее выход объекта $y(t)$ с координатами состояния, имеет вид:

$$y(t) = 5x_1(t) - 5x_2(t).$$

В матричной форме уравнения, описывающие движение объекта и связь выхода с координатами состояния, можно представить следующим образом [10]:

$$\begin{cases} X'(t) = AX(t) + B(u(t) + f(t)); \\ Y(t) = CX(t). \end{cases}$$

где $X(t) = \begin{bmatrix} x_1(t) \\ x_2(t) \\ x_3(t) \\ x_4(t) \end{bmatrix}$ – вектор текущих значений координат состояния объекта;

$A = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ -\frac{1}{32} & -\frac{13}{32} & -\frac{44}{32} & \frac{1}{32} \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}$ – собственная матрица модели объекта управления;

$B = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ \frac{1}{32} \\ 0 \end{bmatrix}$ – вектор влияния управляющего воздействия на координаты состояния;

$C = [5 \quad -5 \quad 0 \quad 0]$ – вектор связи измеряемого выхода $y(t)$ с координатами состояния.

Математическая модель, описывающая изменение оценок, формируемых наблюдателем, имеет вид следующей системы нормальных уравнений:

$$\begin{cases} x_{1\text{наб}}'(t) = x_{2\text{наб}}(t) + k_1\Delta y(t); \\ x_{2\text{наб}}'(t) = x_{3\text{наб}}(t) + k_2\Delta y(t); \\ x_{3\text{наб}}'(t) = \frac{1}{32}(-44x_{3\text{наб}}(t) - 13x_{2\text{наб}}(t) - x_{1\text{наб}}(t) + u(t) + x_{4\text{наб}}(t)) + k_3\Delta y(t); \\ x_{4\text{наб}}'(t) = k_4\Delta y(t). \end{cases}$$

Где $x_{i\text{наб}}(t)$ и $x_{i\text{наб}}'(t)$ – оценки соответственно i -й координаты состояния и её производной наблюдателем; k_i – коэффициенты, вносящие коррекцию в движение $x_{i\text{наб}}(t)$ в наблюдателе по результатам измерения выхода объекта $y_u(t)$; $\Delta y(t) = y_u(t) - y_{\text{наб}}(t)$ – отклонение оценки $y_{\text{наб}}(t)$ наблюдателем выхода объекта от результата измерения $y_u(t)$.

Оценка выхода объекта наблюдателем состояния имеет следующее значение:

$$y_{\text{наб}}(t) = 5x_{1\text{наб}}(t) - 5x_{2\text{наб}}(t),$$

Матрица коррекции $K = \begin{bmatrix} k_1 \\ k_2 \\ k_3 \\ k_4 \end{bmatrix}$ влияет на скорость сходимости оценок $x_{\text{наб}}(t)$ к истинным

значениям $x_i(t)$ координат состояния объекта и на чувствительность оценок к погрешностям $\eta(t)$ измерения выхода.

Необходимым условием сходимости оценок $x_{\text{наб}}(t)$ к значениям $x_i(t)$ является отрицательность вещественных частей всех четырех собственных чисел λ_i матрицы $A - KC$ движения оценок наблюдателя. Значения λ_i ($i=1, \dots, 4$) являются решениями характеристического уравнения наблюдателя:

$$\det(A - KC - \lambda I) = 0;$$

$$\det \begin{bmatrix} -\lambda - 5k_1 & 5k_1 + 1 & 0 & 0 \\ -5k_2 & -\lambda + 5k_2 & 1 & 0 \\ -5k_3 - \frac{1}{32} & 5k_3 - \frac{13}{32} & -\lambda - \frac{11}{8} & \frac{1}{32} \\ -5k_4 & 5k_4 & 0 & -\lambda \end{bmatrix} = 0.$$

где \det – определитель квадратной матрицы; I – единичная 4x4 матрица.

Вычислим определитель и сгруппируем уравнение по степеням λ :

$$\lambda^4 + \lambda^3(5k_1 - 5k_2 + \frac{11}{8}) + \lambda^2(\frac{55}{8}k_1 - \frac{11}{8}k_2 - 5k_3 + \frac{13}{32}) + \lambda(\frac{35}{16}k_1 + \frac{55}{8}k_2 + 5k_3 - \frac{5}{32}k_4 + \frac{1}{32}) + \frac{5}{32}k_4 = 0.$$

Выберем все собственные числа λ_i , равными -2 . Уравнение, в котором полином четвертого порядка относительно λ имеет все корни, равные -2 , запишем следующим образом:

$$(\lambda + 2)^4 = \lambda^4 + 8\lambda^3 + 24\lambda^2 + 32\lambda + 16.$$

Приравняем коэффициенты при одинаковых степенях λ и решим систему уравнений:

$$\begin{cases} 5k_1 - 5k_2 + \frac{11}{8} = 8; \\ \frac{55}{8}k_1 - \frac{11}{8}k_2 - 5k_3 + \frac{13}{32} = 24; \\ \frac{35}{16}k_1 + \frac{55}{8}k_2 + 5k_3 - \frac{5}{32}k_4 + \frac{1}{32} = 32; \\ \frac{5}{32}k_4 = 16. \end{cases}$$

Получаем значения коэффициентов коррекции наблюдателя:

$$\begin{cases} k_1 = 5,41; \\ k_2 = 4,09; \\ k_3 = 1,60; \\ k_4 = 102,40. \end{cases}$$

При выборе собственных чисел λ_i , влияющих на коэффициенты коррекции k_i , необходимо учитывать, что уменьшение λ_i ускоряет процесс наблюдения и повышает чувствительность оценок наблюдателя к погрешностям $\eta(t)$ измерения выхода объекта.

Регулятор состояния получает информацию о текущих значениях следующих сигналов:

– задающее воздействие (уставка) $y^*(t)$;

– оценка $(x_{1\text{наб}}(t), x_{2\text{наб}}(t), x_{3\text{наб}}(t), x_{4\text{наб}}(t))^T$ наблюдателем вектора $(x_1(t), x_2(t), x_3(t), x_4(t))^T$ координат состояния объекта, где T – символ транспонирования;

– $x_5(t) = u(t)$ – измеренное значение выхода исполнительного устройства системы.

Определим желаемые значения координат состояния в установившемся режиме. Пусть заданное значение выхода объекта управления (уставка) САУ равно $y^*(t)$.

Коэффициент усиления объекта управления $K_{\text{Об}}$ равен 5. То есть в установившемся режиме выполняется соотношение:

$$y^*(t) = K_{\text{Об}}(u^*(t) + f(t)) = 5(u^*(t) + f(t)).$$

Отсюда:

$$u^*(t) = V^*(t) = 0,2y^*(t) - x_4(t).$$

где $u^*(t)$ и $V^*(t)$ – желаемые значения сигналов $u(t)$ и $V(t)$ в установившемся режиме соответственно.

Возмущение $f(t)$ – медленно изменяющаяся величина, которая оценивается наблюдателем в виде координаты $x_4(t)$.

В установившемся режиме координаты состояния объекта и исполнительного механизма должны иметь следующие значения:

- $x_1^*(t) = 0,2y^*(t)$;
- $x_2^*(t) = (x_1^*(t))' = 0$;
- $x_3^*(t) = (x_2^*(t))' = 0$;
- $x_5^*(t) = u^*(t) = 0,2y^*(t) - x_4(t)$.

Управляющее воздействие $V(t)$, формируемое регулятором состояния, включает две составляющие $V^*(t)$ и $V_{ПЕР}(t)$. $V^*(t)$ обеспечивает поддержание выхода $y(t) = y^*(t)$ в установившемся режиме. $V_{ПЕР}(t)$ формирует реакцию регулятора на отклонение координат состояния $x_1(t)$, $x_2(t)$, $x_3(t)$ и $x_5(t)$ от их значений $x_1^*(t)$, $x_2^*(t)$, $x_3^*(t)$ и $x_5^*(t)$ в желаемом установившемся режиме:

$$\begin{aligned} V_{ПЕР}(t) &= R_1(x_1^*(t) - x_1(t)) + R_2(x_2^*(t) - x_2(t)) + R_3(x_3^*(t) - x_3(t)) + R_4(x_5^*(t) - x_5(t)) = \\ &= R_1(0,2y^*(t) - x_1(t)) + R_2(-x_2(t)) + R_3(-x_3(t)) + R_4(0,2y^*(t) - x_4(t) - x_5(t)). \end{aligned}$$

где R_1, R_2, R_3, R_4 – параметры настройки регулятора состояния.

Тогда текущее значение сигнала управления $V(t)$, формируемого регулятором состояния, можно вычислить по формуле:

$$\begin{aligned} V(t) = V^*(t) + V_{ПЕР}(t) &= 0,2y^*(t) - x_4(t) + R_1(0,2y^*(t) - x_1(t)) + R_2(-x_2(t)) + \\ &+ R_3(-x_3(t)) + R_4(0,2y^*(t) - x_4(t) - x_5(t)). \end{aligned}$$

Моделирование переходных процессов САУ с регулятором состояния и альтернативной САУ на основе ПИД-регулятора

Коэффициенты R_1, R_2, R_3, R_4 определялись в результате многократного моделирования переходных процессов в MATLAB SIMULINK [11] в режиме отработки ступенчатого задания $y^*=100, f(t)=0$. Получены следующие значения: $R_1 = 20; R_2 = 65; R_3 = 20; R_4 = 6$. Для сравнения качества работы регулятора состояния и альтернативного ПИД-регулятора параметры последнего настраивались в таком же режиме. При этом получена следующая передаточная функция регулятора:

$$W_{ПИД}(S) = 0,3344 + \frac{0,0229}{S} + \frac{1,0787S}{0,3S + 1}.$$

В настраиваемом режиме показатели качества переходных процессов практически совпадают: время переходного процесса t_p равно 15 минутам, перерегулирование σ равно нулю.

Для сравнения свойств САУ проведено исследование работы систем в различных режимах, представленных в табл. 1.

Таблица 1

Используемые режимы работы

Table 1

<i>Operating modes used</i>		
Режим работы	Задание y^*	Возмущение $f(t)$
1	100	0
2	0	10
3	100	с момента $t = 25$ мин. $f(t) = 0,5(t-25)$
4	0	$10\sin(0,05t)$

На рисунке 3 представлены графики переходных процессов в различных режимах. Во всех режимах работа САУ начинается из нулевых начальных условий. Настройка параметров альтернативных регуляторов выполнялась в режиме 1 отработки ступенчатого изменения задания $y^*=100$. При этом желаемый переходный процесс – монотонный выход на задание за минимальное время.

В режиме 2 представлена отработка ступенчатого возмущающего воздействия $f(t) = 10$ при неизменном задании $y^* = 0$.

В режиме 3 САУ обрабатывали выход на задание $y^*=100$. При этом с момента $t = 25$ мин. на вход объекта действует линейно нарастающее возмущение $f(t) = 0,5(t-25)$.

В режиме 4 представлена отработка альтернативными САУ гармонического возмущающего воздействия $f(t) = 10\sin(0,05t)$ при неизменном задании $y^* = 0$.

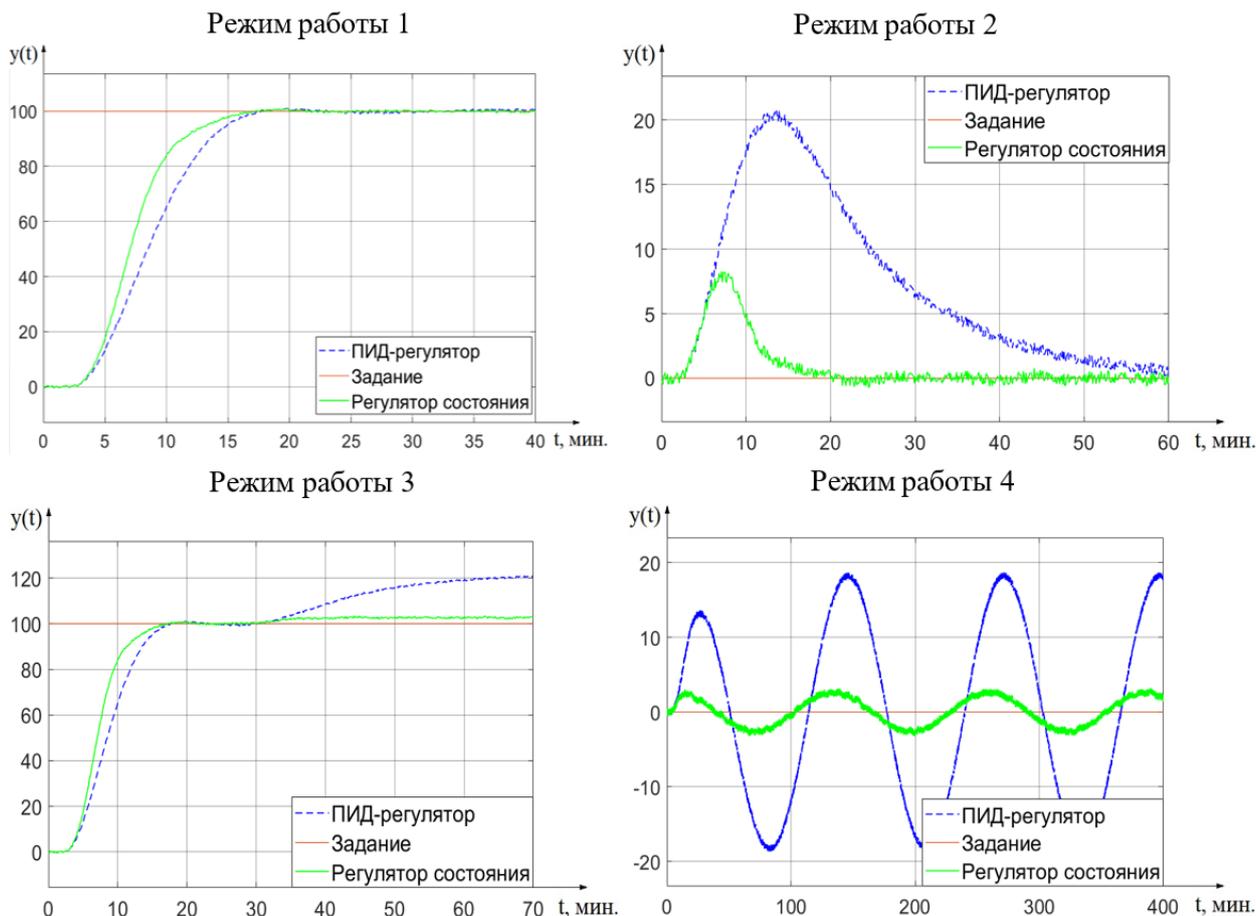


Рис. 3. Графики переходных процессов
Fig. 3. Graphs of transients

В табл. 2 приведено сравнение качества работы систем управления с ПИД-регулятором и регулятором состояния (РС).

Таблица 2

Сравнение качества работы систем управления

Table 2

Comparison of the quality of control systems

Режим работы	Время переходного процесса, мин.		Перерегулирование, %		Статическая ошибка, ед.		Максимальное отклонение выхода объекта от задания, ед.		Амплитуда колебаний выхода, ед.	
	ПИД	РС	ПИД	РС	ПИД	РС	ПИД	РС	ПИД	РС
1	15	15	0	0	0	0	-	-	-	-
2	60	18	-	-	0	0	21	8	-	-
3	35	10	0	0	21	3	-	-	-	-
4	-	-	-	-	-	-	-	-	18,5	3

Заключение

Результаты работы САУ с регулятором состояния и ПИД-регулятором в различных режимах, представленные на рис. 3 и в табл. 2 позволяют сделать следующие выводы:

– в режиме отработки ступенчатого изменения уставки $y^*(t)$ при отсутствии возмущения $f(t)$, в котором выполнялись настройки параметров регуляторов каждой из рассматриваемых САУ, инженерные показатели качества регулирования практически совпадают;

– в режимах, требующих подавления различных вариантов не измеряемых возмущающих воздействий $f(t)$, разработанная САУ с регулятором состояния обеспечивала гораздо более высокие показатели качества регулирования.

Список источников:

1. Ang K.H., Chong G., Li Y. PID control system analysis, design, and technology // IEEE Transactions on Control Systems Technology. 2005 V. 13. №4. pp. 559-576.

2. Ковриго Ю.М., Баган Т.Г., Бунке А.С. Обеспечение робастного управления в системах регулирования инерционных теплоэнергетических объектов // Теплоэнергетика. – 2014. – №. 3. – С. 9-14.

3. Анисимов А.А., Тарарыкин С.В., Аполлонский В.В. Параметрическая оптимизация электромеханических систем с регуляторами и наблюдателями состояния // Вестник Ивановского государственного энергетического университета. – 2016. – №. 2. – С. 21-26.

4. Поleshchenko Д.А., Borovinskikh М.Д. Повышение эффективности работы шаровой мельницы путем совместного использования наблюдателя состояний и экстремального регулятора // Инженерный вестник Дона. – 2022. – № 11. – С. 55-72.

5. Анисимов А.А., Тарарыкин С.В. Синтез робастных систем управления мехатронными объектами с цифровыми регуляторами и наблюдателями состояния // Вестник Ивановского государственного энергетического университета. – 2020. – №. 6. – С. 39-47.

6. Пшихопов В.Х., Медведев М.Ю. Алгоритмическое обеспечение робастных асимптотических наблюдателей производных // Инженерный вестник Дона. – 2011. – Т. 16. – № 6. – С. 169-175.

7. Еременко И.Ф., Кривонос В.А. Система управления с наблюдателем координат состояния и неопределенного возмущения // Приборы и системы. Управление, контроль, диагностика. – 2005. – №. 7. – С. 10-13.

8. Тхан В.З., Дементьев Ю.Н., Гончаров В.И. Повышение точности расчета систем автоматического управления с запаздыванием // Программные продукты и системы. – 2018. – Т. 31. – №. 3. – С. 521-526.

9. Xueyan L., Zheng Y. Comparison of time delay processing methods in control system // 4th international conference on computer science and network technology. 2015. V. 1. pp. 1502-1505.

References:

1. Ang K.H., Chong G., Li Y. PID Control System Analysis, Design, and Technology. IEEE Transactions on Control Systems Technology. 2005;13(4):559-576.

2. Kovrigo Yu.M., Bagan T.G., Bunke A.S. Securing Robust Control in Systems for Closed-Loop Control of Inertial Thermal Power Facilities. Thermal Engineering. 2014;3:9-14.

3. Anisimov A.A., Tararykin S.V., Apollonsky V.V. Parametric Optimization of Regulators and State Observers in Electromechanical Systems. Bulletin of Ivanovo State Power Engineering University. 2016;2:21-26.

4. Poleshchenko D.A., Borovinskikh M.D. Increasing the Efficiency of a Ball Mill by Jointly Using a State Observer and an Extreme Controller. Engineering Journal of Don. 2022;11:55-72.

5. Anisimov A.A., Tararykin S.V. Synthesizing Robust Control Systems for Mechatronic Objects With Digital State Controllers and Observers. Bulletin of Ivanovo State Power Engineering University. 2020;6:39-47.

6. Pshikhopov V.Kh., Medvedev M.Yu. Algorithmic Support of Robust Asymptotic Observers of Derivatives. Engineering Journal of Don. 2011;16(6):169-175.

7. Eremenko I.F., Krivonosov V.A. Control System With the Observer of Condition Coordinates and Uncertain Disturbances. Instruments and Systems. Monitoring, Control, and Diagnostics. 2005;7:10-13.

8. Than V.Z., Demytyev Yu.N., Goncharov V.I. Increasing the Accuracy of Calculations of Automatic Control Systems With a Delay. Software and Systems. 2018;31(3):521-526.

9. Xueyan L, Zheng Y. Comparison of Time Delay Processing Methods in Control System. In: Proceedings of the 4th International Conference on Computer Science and Network Technology: 2015; vol. 1 p. 1502-1505.

10. Куок Д.В., Бобцов А.А. Адаптивный наблюдатель переменных состояния линейных нестационарных систем с параметрами, заданными не точно // Автоматика и телемеханика. – 2020. – №. 12. – С. 100-110.

11. Попадин А.Н. Автоматизированная настройка ПИД-регулятора для управления следящим приводом с использованием программного пакета MATLAB SIMULINK // Морской вестник. – 2019. – №. 3. – С. 93-96.

10. Quoc D.V., Bobtsov A.A. An Adaptive State Observer for Linear Time-Varying Systems With Inaccurate Parameters. Automation and Telemechanics. 2020;12:100-110.

11. Popadin A.N. Automated Tuning of a PID Controller for Monitoring a Servo Drive Using the MATLAB /Simulink Software Package. Morskoj Vestnik. 2019;3:93-96

Информация об авторах:

Кривонос Владимир Алексеевич

кандидат технических наук, доцент Старооскольского технологического института им. А.А. Угарова (филиал) Национального исследовательского технологического университета «МИСИС», <http://orcid.org/0009-0002-9615-2561>

Корнев Артем Викторович

студент магистратуры Старооскольского технологического института им. А.А. Угарова (филиал) Национального исследовательского технологического университета «МИСИС», <http://orcid.org/0000-0001-7252-7272>

Information about the authors:

Krivosov Vladimir Alekseevich

Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of Sary Oskol Technological Institute named after A.A. Ugarov (branch) of MISiS University of Science and Technology, <http://orcid.org/0009-0002-9615-2561>

Korenev Artem Viktorovich

Master's student at Sary Oskol Technological Institute named after A.A. Ugarov (branch) of MISiS University of Science and Technology, <http://orcid.org/0000-0001-7252-7272>

**Вклад авторов: все авторы сделали эквивалентный вклад в подготовку публикации.
Contribution of the authors: the authors contributed equally to this article.**

**Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.
The authors declare no conflicts of interests.**

Статья поступила в редакцию 07.12.2023; одобрена после рецензирования 17.01.2024; принята к публикации 14.02.2024.

The article was submitted 07.12.2023; approved after reviewing 17.01.2024; accepted for publication 14.02.2024.

Рецензент – Малаханов А.А., кандидат технических наук, доцент, Брянский государственный технический университет.

Reviewer – Malakhanov A.A., Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Bryansk State Technical University.