

Научная статья

УДК 621.391

<https://doi.org/10.37493/2307-910X.2025.1.3>



Анализ импульсных систем автоматического управления

Юрий Валерьевич Ильюшин^{1*}, Александр Витальевич Мартиросян²

^{1,2} Санкт-Петербургский горный университет императрицы Екатерины II, г. Санкт-Петербург, Россия

¹ ilyushin_yuv@pers.spmi.ru; <https://orcid.org/0000-0002-9175-8751>

² martalex11@mail.ru; <https://orcid.org/0000-0002-1455-0930>

* Автор, ответственный за переписку: Юрий Валерьевич Ильюшин, ilyushin_yuv@pers.spmi.ru

Аннотация. В современных условиях развития информационных технологий остро встает вопрос анализа и синтеза импульсных систем автоматического управления. В данной статье рассматривается вопрос анализа импульсной системы автоматического управления. Проверки разработанной системы на устойчивость, согласно различным критериям устойчивости. Показываются положительные и отрицательные стороны таких систем. Делается вывод о необходимости дальнейших исследований по анализу и синтезу импульсных распределенных систем автоматического управления.

Ключевые слова: системный анализ, управление, наведение, синтез

Для цитирования: Ильюшин Ю. В., Мартиросян А. В. Анализ импульсных систем автоматического управления // Современная наука и инновации. 2025. № 1. С. 41-50. <https://doi.org/10.37493/2307-910X.2025.1.3>

Research article

Analysis of pulse automatic control systems

Yuri V. Ilyushin^{1*}, Alexander V. Martirosyan²

^{1,2} Saint Petersburg Mining University of Empress Catherine II, Saint Petersburg, Russia

¹ ilyushin_yuv@pers.spmi.ru; <https://orcid.org/0000-0002-9175-8751>

² martalex11@mail.ru; <https://orcid.org/0000-0002-1455-0930>

* Corresponding author: Yuri V. Ilyushin, ilyushin_yuv@pers.spmi.ru

Abstract. The modern conditions for the development of information technologies are sharply raising the issue of analyzing and synthesizing pulsed automatic control systems. This article deals with the analysis of a linear impulse automatic control system. Verification of the developed system for stability, according to various criteria of stability. Positive and negative aspects of such systems are shown. The conclusion is made about the need for further research on the analysis and synthesis of pulsed distributed automatic control systems.

Keywords: systems analysis, management, guidance, synthesis

For citation: Ilyushin YuV, Martirosyan AV. Analysis of pulse automatic control systems. Modern Science and Innovations. 2025;(1):41-50. (In Russ.). <https://doi.org/10.37493/2307-910X.2025.1.3>

© Ильюшин Ю. В., Мартиросян А. В., 2025

Введение. Современный газовый промысел представляет собой совокупность добычи, хранения и переработки углеводородов различного состава. В зависимости от скорости добычи, существенно возрастает нагрузка на транспортную систему. Для увеличения пропускной способности транспортной системы используют трубы различного диаметра. Согласно ГОСТ 633-80 «Трубы насосно-компрессорные» в газонефтедобыче используют трубы толщиной стенки от 3,5 до 9 мм. В процессе производства которых, для поддержания температурного поля, используются карбидокремниевые нагревательные элементы с релейным(импульсным) принципом управления. Формируемое ими температурное поле однородно по своей структуре. Однако с развитием цифровой электроники управление данными нагревателями переходит на новый уровень. Уровень цифрового управления. Что зачастую сказывается на устойчивости протекания температурных процессов.

Материалы и методы исследований. Постановка задачи и ее решение. Рассмотрим импульсную нелинейную систему автоматического управления, формируемую входным сигналом, представленным на рис. 1.

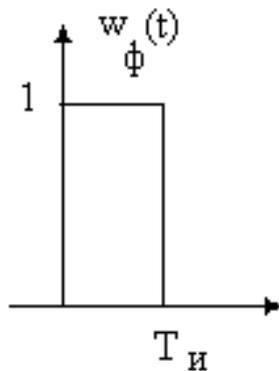


Рисунок 1. – графическое входного управляющего сигнала

Структурная схема импульсной системы автоматического управления (САУ) поддержания температурного поля, представляется следующим образом:

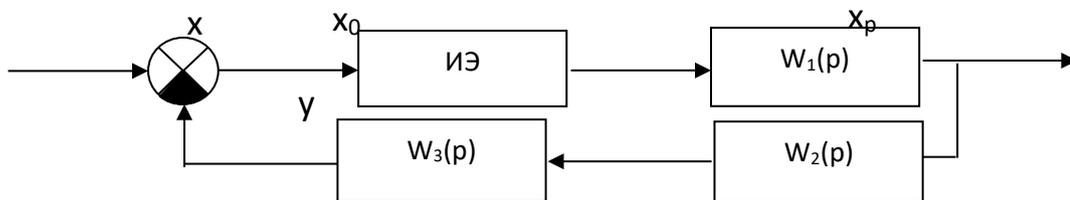


Рисунок 2 – Структурная схема импульсной САУ / Figure 2 – Structural diagram of the pulse control system

Пусть передаточные характеристики линейных звеньев выглядят следующим образом:

$$W_1 = \frac{0,2}{1+0,8 \cdot p} ;$$

$$W_2 = \frac{2}{p} ;$$

$$W_3 = \frac{4}{1+1,5 \cdot p} .$$

Тогда преобразуем приведем исходную САУ к общему виду. Полученная схема примет следующий вид:

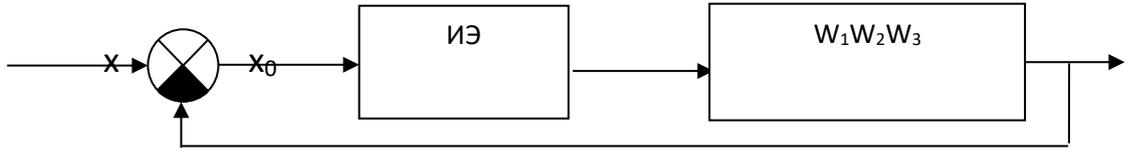


Рисунок 3 – Структурная схема преобразованной импульсной САУ / Figure 3 – Structural diagram of the converted pulse control system

А результирующая передаточная функция будет являться произведением всех составляющих исходной системы. Таким образом получим:

$$W_H(p) = \frac{0,2}{1+0,8 \cdot p} \cdot \frac{2}{p} \cdot \frac{4}{1+1,5 \cdot p} = 1,6 \cdot \left(\frac{0,914}{1+0,8p} + \frac{1}{p} - \frac{3,214}{1+1,5p} \right).$$

Найдём дискретную передаточную функцию $W_p(p)$. Пусть передаточная функция формирующего фильтра:

$$W_\phi(p) = \frac{1 - e^{-pT_u}}{p}.$$

Где: T_u – период квантования. Тогда передаточная функция приведенной непрерывной части:

$$\begin{aligned} W_{\text{ПН}}(p) &= W_\phi(p) \cdot W_H(p) = 1,6 \cdot (1 - e^{-pT_u}) \cdot \left[\frac{0,914}{(1+0,8p)p} + \frac{1}{p^2} - \frac{3,214}{(1+1,5p)p} \right] = \\ &= 1,6 \cdot (1 - e^{-pT_u}) \cdot \left[\frac{0,914}{p} - \frac{0,7312}{(1+0,8p)} + \frac{1}{p^2} - \frac{4,821}{(1+1,5p)} - \frac{3,214}{p} \right] = \\ &= 1,6 \cdot (1 - e^{-pT_u}) \cdot \left[\frac{1}{p^2} - \frac{0,7312}{(1+0,8p)} + \frac{4,821}{(1+1,5p)} - \frac{2,3}{p} \right] = 1,6 \cdot (1 - e^{-pT_u}) \cdot \left[\frac{1}{p^2} - \frac{0,914}{1,25+p} + \frac{3,214}{0,667+p} - \frac{2,3}{p} \right]. \end{aligned}$$

Для полученной передаточной функции применим дискретное преобразование Лапласа. Тогда передаточная функция разомкнутой импульсной системы примет следующий вид:

$$W_p(p) = 1,6 \cdot \left(\frac{e^{pT_u} - 1}{e^{pT_u}} \right) \cdot \left[\frac{T_u \cdot e^{pT_u}}{(e^{pT_u} - 1)^2} - \frac{0,7312 \cdot e^{pT_u}}{e^{pT_u} - e^{-0,8pT_u}} + \frac{4,821 \cdot e^{pT_u}}{e^{pT_u} - e^{-1,5pT_u}} - \frac{2,3 \cdot e^{pT_u}}{e^{pT_u} - 1} \right].$$

Откуда:

$$W_p(p) = 1,6 \cdot \left[\frac{T_u}{e^{pT_u} - 1} - \frac{0,914 \cdot (e^{pT_u} - 1)}{e^{pT_u} - e^{-1,25T_u}} + \frac{3,214 \cdot (e^{pT_u} - 1)}{e^{pT_u} - e^{-0,667T_u}} - 2,3 \right].$$

Тогда $W_p^*(p)$ в можно представить в следующем виде:

$$W_p(p) = K \cdot \frac{b_2 \cdot e^{2pT_u} + b_1 e^{pT_u} + b_0}{a_3 e^{3pT_u} + a_2 e^{2pT_u} + a_1 e^{pT_u} + a_0}.$$

Где:

$$K=1,6;$$

$$b_2 = T_u - 0,914e^{-1,25T_u} + 3,214e^{-0,667T_u} - 2,3 = -1,215 \cdot 10^{-5};$$

$$b_1 = 6,428e^{-1,25T_u} + 4,128e^{-0,667T_u} - 2,3e^{-1,917T_u} - 2,3e^{-1,25T_u} - T_u(e^{-1,25T_u} + e^{-0,667T_u}) + 2,3 = 2,507 \cdot 10^{-5};$$

$$b_0 = 0,914e^{-0,667T_u} - 3,214e^{-1,25T_u} + 2,3e^{-1,25T_u} \cdot e^{-0,667T_u} + T_u e^{-1,917T_u} = -1,209 \cdot 10^{-5};$$

$$a_3 = 1;$$

$$a_2 = -e^{-1,25T_u} - e^{-0,667T_u} - 1 = -2,981;$$

$$a_1 = e^{-1,25T_u} + e^{-0,667T_u} + e^{-1,917T_u} = 2,962;$$

$$a_0 = -e^{-1,917T_u} = 0,981;$$

Выполним построение амплитудно-фазовой характеристики (АФХ) импульсной непрерывной разомкнутой системы двумя способами: точным и приближенным – по формуле:

$$W_p^*(j\omega) = \frac{\omega_0}{2 \cdot \pi} \cdot \sum_{l=-\infty}^{\infty} W_{nn}(j\omega - j\omega_0 l) + \frac{w_{nn}(0)}{2}.$$

Где $w_{nn}(0) = 0$.

Тогда положим:

$$\omega_0 = \frac{2 \cdot \pi}{T_u};$$

$$w_{np}(w) = \frac{w_0}{2 \cdot \pi} \cdot \left[w_{np1}(w) + w_{np2}(w) + w_{np3}(w) - \frac{w_{np0}}{2} \right];$$

где:

$$w_{np1}(w) = 1,6 \cdot (1 - e^{-i \cdot w T_u}) \cdot \left[\frac{1}{(i \cdot w)^2} - \frac{0,7312}{1 + 0,8 \cdot i \cdot w} + \frac{4,821}{1 + 1,5 \cdot i \cdot w} - \frac{2,3}{i \cdot w} \right];$$

$$w_{np2}(w) = 1.6 \cdot (1 - e^{-i(w-w_0)T_u}) \cdot \left[\frac{1}{i \cdot (w-w_0)^2} - \frac{0.7312}{1+0.8 \cdot i \cdot (w-w_0)} + \frac{4.821}{1+1.5 \cdot i \cdot (w-w_0)} - \frac{2.3}{i \cdot (w-w_0)} \right];$$

$$w_{np3}(w) = 1.6 \cdot (1 - e^{-i(w-2w_0)T_u}) \cdot \left[\frac{1}{i \cdot (w-2w_0)^2} - \frac{0.7312}{1+0.8 \cdot i \cdot (w-2w_0)} + \frac{4.821}{1+1.5 \cdot i \cdot (w-2w_0)} - \frac{2.3}{i \cdot (w-2w_0)} \right];$$

Построенные АФХ представлены на рис. 4.

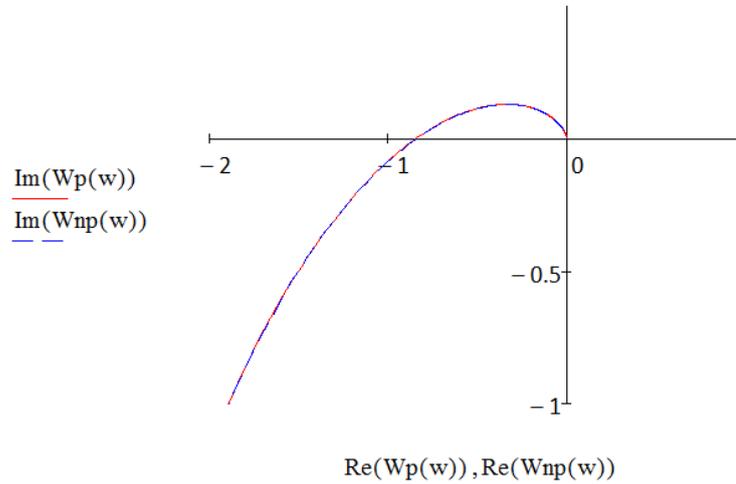


Рисунок 4 – АФХ для $W_p^*(j\omega)$ и $W_{np}(j\omega)$ / Figure 4 – Amplitude-phase characteristic for $W_p^*(j\omega)$ and $W_{np}(j\omega)$

Как видно из рисунка, годографы импульсной разомкнутой системы, построенные точным и приближенным методом, практически совпадают. Численные значения годографов импульсной разомкнутой системы, построенные точным и приближенным методами представлены в табл. 1.

Таблица 1 – Численные значения годографов, построенных разными методами / Table 1 – Numerical values of hodographs constructed by different methods

	Точный метод	Приближенный метод
n = 1	-1.621e-5+4.679e-4i	-1.554e-5+3.588e-4i
n = 2	1.121e-5+1.055e-4i	4.92e-6+5.102e-5i
n = 3	1.113e-5+5.39e-5i	3.541e-6+1.792e-5i
n = 4	1.072e-5+3.576e-5i	2.667e-6+9.142e-6i
n = 5	1.046e-5+2.658e-5i	2.189e-6+5.665e-6i
n = 6	1.03e-5+2.095e-5i	1.904e-6+3.927e-6i
n = 7	1.02e-5+1.71e-5i	1.72e-6+2.915e-6i
n = 8	1.013e-5+1.424e-5i	1.593e-6+2.26e-6i
n = 9	1.009e-5+1.201e-5i	1.5e-6+1.801e-6i
n = 10	1.005e-5+1.02e-5i	1.429e-6+1.46e-6i

n = 11	1.003e-5+8.671e-6i	1.374e-6+1.195e-6i
n = 12	1.001e-5+7.352e-6i	1.329e-6+9.815e-7i
n = 13	9.995e-6+6.185e-6i	1.293e-6+8.041e-7i
n = 14	9.984e-6+5.133e-6i	1.263e-6+6.527e-7i
n = 15	9.976e-6+4.167e-6i	1.24e-6+5.203e-7i
n = 16	9.969e-6+3.265e-6i	1.222e-6+4.019e-7i
n = 17	9.965e-6+2.41e-6i	1.209e-6+2.936e-7i
n = 18	9.962e-6+1.589e-6i	1.2e-6+1.922e-7i
n = 19	9.96e-6+7.895e-7i	1.196e-6+9.509e-8i
n = 20	9.959e-6	1.196e-6-1.228e-10i

Для оценки устойчивости замкнутой импульсной системы и ее предельного коэффициента усиления произведем расчет по двух критериям.

По критерию Найквиста.

Для обеспечения устойчивости импульсной системы необходимо чтобы годограф разомкнутой импульсной системы не охватывает точку $(-1; j0)$.

Значение предельного коэффициента усиления разомкнутой импульсной системы найдем из пропорции:

$$K = 0,84;$$

$$K_{пред} = 1.$$

Откуда:

$$K_{пред} = \frac{1}{0,84} = 1,19.$$

По критерию Гурвица.

Найдем передаточную функцию замкнутой ИСАУ, выделив коэффициент усиления K :

$$W_3^*(p) = \frac{W_p^*(p)}{1 + W_p^*(p)} = K \cdot \frac{b_2 \cdot e^{2pT_u} + b_1 \cdot e^{pT_u} + b_0}{a_3 \cdot e^{3pT_u} + (a_2 + Kb_2) \cdot e^{2pT_u} + (a_1 + Kb_1) \cdot e^{pT_u} + (a_0 + Kb_0)}.$$

Введем обозначение $z = e^{pT_u}$ и запишем характеристическое уравнение:

$$A' = a_3 \cdot e^{3pT_u} + (a_2 + Kb_2) \cdot e^{2pT_u} + (a_1 + Kb_1) \cdot e^{pT_u} + (a_0 + Kb_0).$$

Произведем подстановку:

$$z = \frac{1 + v}{1 - v};$$

$$A' = A_3 \cdot v^3 + A_2 \cdot v^2 + A_1 \cdot v + A_0;$$

где

$$A_3 = a_1 - a_0 - a_2 + a_3 - K \cdot b_0 + K \cdot b_1 - K \cdot b_2 > 0;$$

$$A_3 = 7,924 > 0;$$

$$A_2 = 3 \cdot a_0 - a_1 - a_2 + 3 \cdot a_3 + 3 \cdot K \cdot b_0 - K \cdot b_1 - K \cdot b_2 > 0;$$

$$A_2 = 0,076 > 0;$$

$$A_1 = a_2 - a_1 - 3 \cdot a_0 + 3 \cdot a_3 - 3 \cdot K \cdot b_0 - K \cdot b_1 + K \cdot b_2 > 0;$$

$$A_1 = 1,636 \cdot 10^{-4} > 0;$$

$$A_0 = a_0 + a_1 + a_2 + a_3 + K \cdot b_0 + K \cdot b_1 + K > 0;$$

$$A_0 = 1,6 > 0;$$

Так как все коэффициенты A_i положительны, то замкнутая ИСАУ устойчива. Значение предельного коэффициента усиления:

$$K_{пред} = 1.9.$$

Построение переходного процесса $y(t)$ для замкнутой импульсной САУ.

Для построения переходного процесса замкнутой ИСАУ преобразуем передаточную:

$$W_3^*(p) = K \cdot \frac{b_2 \cdot e^{2pT_u} + b_1 \cdot e^{pT_u} + b_0}{a_3 \cdot e^{3pT_u} + (a_2 + Kb_2) \cdot e^{2pT_u} + (a_1 + Kb_1) \cdot e^{pT_u} + (a_0 + Kb_0)} = \frac{Y^*(p)}{X^*(p)};$$

Выполнив преобразования, получим:

$$K \cdot X^*(p) \cdot (b_2 \cdot e^{-pT_u} + b_1 \cdot e^{-2pT_u} + b_0 e^{-3pT_u}) = Y^*(p) \cdot (a_3 + (a_2 + Kb_2) \cdot e^{-pT_u} + (a_1 + Kb_1) e^{-2pT_u} + (a_0 + Kb_0) e^{-3pT_u}).$$

Перейдем от изображения к оригиналу, получая разностное уравнение:

$$Kb_2 \cdot x((l-1)T_u) + Kb_1 \cdot x((l-2)T_u) + Kb_0 \cdot x((l-3)T_u) = a_3 \cdot y(lT_u) + (a_2 + Kb_2) \cdot y((l-1)T_u) + (a_1 + Kb_1) \cdot y((l-2)T_u) + (a_0 + Kb_0) \cdot y((l-3)T_u);$$

$$y_i = -\frac{a_2 + Kb_2}{a_3} \cdot y_{i-1} - \frac{a_1 + Kb_1}{a_3} \cdot y_{i-2} - \frac{a_0 + Kb_0}{a_3} \cdot y_{i-3} + K \frac{b_2}{a_3} \cdot x_{i-1} +$$

$$+ K \frac{b_1}{a_3} \cdot x_{i-2} + K \frac{b_0}{a_3} \cdot x_{i-3}.$$

График переходного процесса, построенный на основе последнего соотношения, изображен на рис. 5.

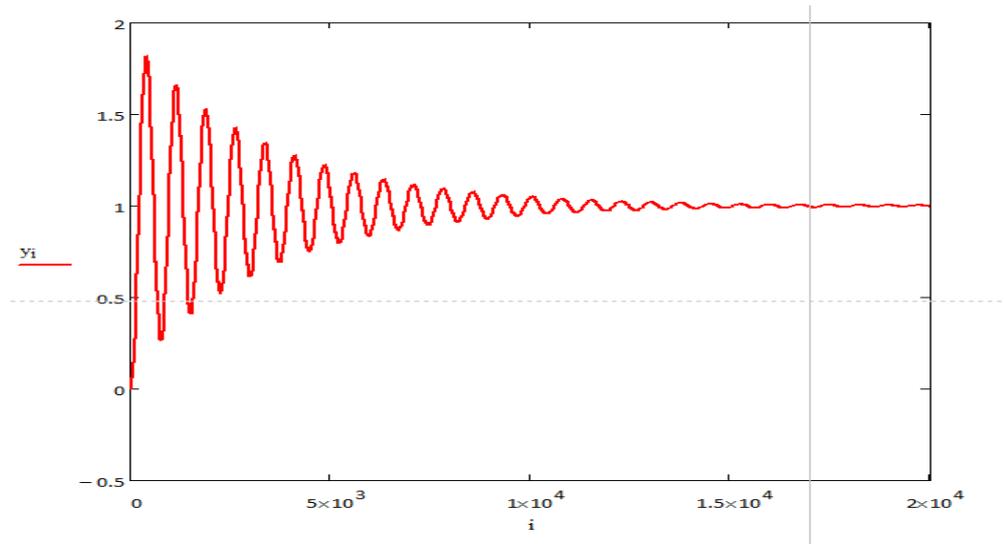


Рисунок 5 – Переходный процесс в замкнутой ИСАУ / Figure 5 – Transient process in a closed-loop ISAU

Численные значения переходного процесса в определенные моменты времени замкнутой ИСАУ представлены в табл. 2.

Таблица 2 – Численные значения переходного процесса в определенные моменты времени / Table 2 – Numerical values of the transient process at certain points in time

Номер шага	Момент времени	Значение переходного процесса
1	0,01	-0,00001945
3	0,03	-0,00005227
9	0,09	-0,00001211
10	0,1	0,00002729
50	0,5	0,021
80	0,8	0,078
90	0,9	0,106
130	1,3	0,267
150	1,5	0,374
250	2,5	1,065

Рассчитаем статическую и кинетическую ошибку замкнутой импульсной САУ. Расчет будем вести по следующим формулам:

$$x_0 = \lim_{p \rightarrow 0} (e^{p \cdot T_n} - 1) \cdot X_o^*(p);$$

$$X_o^*(p) = \frac{1}{1 + W_p^*(p)} \cdot X^*(p).$$

Статическая ошибка.

На входе системы $X(t)=1(t)$

$$X(p) = \frac{1}{p}; \quad X^*(p) = \frac{e^{p \cdot T_u}}{e^{p \cdot T_u} - 1};$$

$$x_{ocm} = \lim_{p \rightarrow 0} (e^{p \cdot T_u} - 1) X_o^*(p) = \lim_{p \rightarrow 0} (e^{p \cdot T_u} - 1) \frac{1}{1 + W_p^*(p)} \cdot \frac{e^{p \cdot T_u}}{e^{p \cdot T_u} - 1} =$$

$$= \lim_{p \rightarrow 0} \left(\frac{1}{1 + W_p^*(p)} e^{p \cdot T_u} \right);$$

$$x_{ocm} = \lim_{p \rightarrow 0} (e^{p \cdot T_u} - 1) \left(\frac{e^{p \cdot T_u}}{1 + K \frac{b_2 \cdot e^{2 \cdot p \cdot T_u} + b_1 \cdot e^{p \cdot T_u} + b_0}{a_3 e^{3 \cdot p \cdot T_u} + a_2 e^{2 \cdot p \cdot T_u} + a_1 \cdot e^{p \cdot T_u} + a_0}} \right) \frac{e^{p \cdot T_u}}{e^{p \cdot T_u} - 1} = 0.$$

Кинетическая ошибка.

На входе системы $X(t)=t \cdot 10(t)$

$$X(p) = \frac{1}{p^2}; \quad X^*(p) = \frac{T_u e^{p \cdot T_u}}{(e^{p \cdot T_u} - 1)^2};$$

$$x_{окин} = \lim_{p \rightarrow 0} (e^{p \cdot T_u} - 1) \cdot X_o^*(p) = \lim_{p \rightarrow 0} (e^{p \cdot T_u} - 1) \cdot \frac{1}{1 + W_p^*(p)} \cdot \frac{T_u e^{p \cdot T_u}}{(e^{p \cdot T_u} - 1)^2} =$$

$$= \lim_{p \rightarrow 0} \frac{T_u e^{p \cdot T_u}}{e^{p \cdot T_u} - 1} \cdot \frac{1}{1 + W_p^*(p)};$$

$$x_{окин} = \lim_{p \rightarrow 0} \frac{T_u e^{p \cdot T_u}}{e^{p \cdot T_u} - 1} \cdot \frac{1}{1 + K \frac{b_2 \cdot e^{2 \cdot p \cdot T_u} + b_1 \cdot e^{p \cdot T_u} + b_0}{a_3 e^{3 \cdot p \cdot T_u} + a_2 e^{2 \cdot p \cdot T_u} + a_1 \cdot e^{p \cdot T_u} + a_0}} = 0,757.$$

Результаты исследований и их обсуждение. Экспериментальные исследования, проведенные на основе полученных величин, показали разницу между аналитическим решением и экспериментальным в среднем на 10 % [2-4].

Заключение. Актуальность выполненного исследования определяется сложностью реализации нелинейных систем управления. Однако данные системы не зависят от распределённости по пространственной области, занимаемой объектом. Что крайне отрицательно сказывается на практическом использовании полученных результатов. В связи с этим необходимо, принципиально расширить класс управляющих воздействий, прежде всего за счёт возможности включения в их число пространственно-временных управлений, описываемых функциями нескольких переменных – времени и пространственных координат. Однако, это будет являться предметом дальнейшего исследования.

ЛИТЕРАТУРА

1. Беседин В. М., Ягодкина Т. В. Анализ линейных импульсных систем автоматического управления. Методические указания к самостоятельным занятиям по курсу «Основы теории автоматического управления». М.: Изд-во МЭИ, 2001, 48 с.
2. Ilyushin Y., Mokeev A. Technical Realization of the Task of Controlling the Temperature Field of a Tunnel Furnace of a Conveyor Type // International Journal of Applied Engineering Research. 2017. Vol. 12. P. 1500-1510.
3. Ilyushin Y. V., Novozhilov I. M. Analyzing of distributed control system with pulse control // Proceedings of 2017 20th IEEE International Conference on Soft Computing and Measurements, SCM 2017 pp. 296-298
4. Ilyushin Y. V., Novozhilov I. M. Analyzing of heating elements' location of distributed control objects // Proceedings of 2017 20th IEEE International Conference on Soft Computing and Measurements, SCM 2017. P. 138-141.

REFERENCES

1. Besedin VM, Yagodkina TV. Analysis of linear pulse automatic control systems. Methodical instructions for independent studies on the course "Fundamentals of the theory of automatic control". Moscow: Publishing house of MEI; 2001. 48 p. (In Russ.).
2. Ilyushin Y, Mokeev A. Technical realization of the task of controlling the temperature field of a tunnel furnace of a conveyor type. International Journal of Applied Engineering Research. 2017;12(8):1500-1510.
3. Ilyushin YV, Novozhilov IM. Analyzing of distributed control system with pulse control. In Proceedings of 2017 20th IEEE International Conference on Soft Computing and Measurements, SCM 2017. 2017;296-298.
4. Ilyushin YV, Novozhilov IM. Analyzing of heating elements' location of distributed control objects. In Proceedings of 2017 20th IEEE International Conference on Soft Computing and Measurements, SCM 2017. 2017;138-141.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Юрий Валерьевич Ильюшин – доктор технических наук, Санкт-Петербургский горный университет императрицы Екатерины II, ilyushin_yuv@pers.spmi.ru

Александр Витальевич Мартиросян – кандидат технических наук, СанктПетербургский горный университет, Martirosyan_AV@pers.spmi.ru

Вклад авторов: все авторы внесли равный вклад в подготовку публикации.

Конфликт интересов: авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Статья поступила в редакцию: 08.02.2025;
одобрена после рецензирования: 17.03.2025;
принята к публикации: 22.03.2025.

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Yuri V. Ilyushin – Dr. Sci. (Techn.), Saint Petersburg Mining University, ilyushin_yuv@pers.spmi.ru

Alexander V. Martirosyan – Cand. Sci. (Techn.), Saint Petersburg Mining University, Martirosyan_AV@pers.spmi.ru

Contribution of the authors: the authors contributed equally to this article.

Conflict of interest: the authors declare no conflicts of interests.

The article was submitted: 08.02.2025;
approved after reviewing: 17.03.2025;
accepted for publication: 22.03.2025.