

УДК 658.012.011.56

## НОВАЯ АЛГОРИТМИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ДЛЯ ТРАДИЦИОННОГО ПОДХОДА ЦИФРОВОГО РЕГУЛИРОВАНИЯ

Захарова О.В.

ФГБОУ ВПО «Государственный университет – учебно-научно-производственный комплекс», Орёл, e-mail: cvaig@mail.ru

Исследование известных моделей цифрового регулирования (с представлением интеграла в континуальной модели управления по формулам «прямоугольников» (модель «прямоугольников»), «трапеций» (модель «трапеций») и Симпсона (модель Симпсона)) показало, что для каждой модели существует свой класс задач формирования подходящих управляющих воздействий. Оценки показали, что комплексное использование известных моделей может охватить значительную группу задач регулирования. В настоящей работе предложена новая организация цифрового регулирования и разработана новая алгоритмическая модель вычисления управляющих воздействий в контуре регулирования по отклонению для цифрового пропорционально-интегрально-дифференциального регулятора (ПИД регулятора), основанная на совместном применении отмеченных моделей в зависимости от величины рассогласования. Введены критерии выбора моделей на каждом шаге дискретизации, чем обеспечилась подходящая динамика регулируемого параметра. Приведенные примеры эпюр изменения процессов регулирования показали эффективность применения предложенной алгоритмической модели и простоту формирования управляющих воздействий.

**Ключевые слова:** ПИД регулятор, цифровой регулятор, цифровая система управления, алгоритмическая модель

## NEW ALGORITHMIC MODEL FOR TRADITIONAL APPROACH OF DIGITAL CONTROL

Zakharova O.V.

State University – Education-Science-Production Complex, Orel, e-mail: cvaig@mail.ru

Research famous models of digital control (continuum control model with integrated replacement formula «rectangles» (model «rectangles»), continuum control model with integrated replacement formula «trapezes» (model «trapezes»), continuum control model with integrated replacement formula of Simpson (model Simpson)) shows that for each model there is a class of problems of formation of the respective control actions. Estimates have shown that the combined use of models can cover a large group of control tasks. The paper proposes a new organization of digital control and proposed a new model algorithmic control computation for the digital proportional-integral-derivative control (PID control). The new algorithmic model is based on application of known models depending on mistake size. Criteria of a choice of model on each step are entered and provide suitable dynamics of regulation. Examples of modeling of processes of control showed the effectiveness of the proposed algorithmic model.

**Keywords:** PID control, digital control, digital control system, algorithm model

Традиционный подход цифрового регулирования [5–7] выражается в замене непрерывной континуальной модели регулирования (рис. 1):

$$U(t) = k_{\Pi} \Delta x(t) + k_{\text{И}} \int_{\tau=0}^{\tau=t} \Delta x(\tau) d\tau + k_{\text{Д}} \frac{d\Delta x(t)}{dt}, \quad (1)$$

её дискретными аналогами на основе преобразования интеграла и производной [2, 4]:

1) по формуле «прямоугольников» (модель П):

$$K_0^{\text{np}} = k_{\Pi} + k_{\text{И}} T + \frac{k_{\text{Д}}}{T}; K_{-1}^{\text{np}} = -\left(k_{\Pi} + \frac{2k_{\text{Д}}}{T}\right); K_{-2}^{\text{np}} = \frac{k_{\text{Д}}}{T}; \quad (2)$$

$$U_{\text{np}}(nT) \Big|_{n=0} = k_{\Pi} x_0(0); \quad (3)$$

$$U_{\text{np}}(nT) \Big|_{n=1} = K_0^{\text{np}} \cdot \Delta x(T) - K_{-2}^{\text{np}} \cdot x_0(0); \quad (4)$$

$$U_{\text{np}}(nT) = U_{\text{np}}((n-1)T) + K_0^{\text{np}} \Delta x(nT) + K_{-1}^{\text{np}} \Delta x((n-1)T) + K_{-2}^{\text{np}} \Delta x((n-2)T) \quad \text{для } n \geq 2; \quad (5)$$

2) по формуле «трапеций» (модель Т):

$$K_0^{\text{tp}} = k_{\Pi} + \frac{k_{\text{И}}}{2} \cdot T + \frac{k_{\text{Д}}}{T}; K_{-1}^{\text{tp}} = -\left(k_{\Pi} + \frac{2k_{\text{Д}}}{T} - \frac{k_{\text{И}}}{2} \cdot T\right); K_{-2}^{\text{tp}} = \frac{k_{\text{Д}}}{T}; \quad (6)$$

$$U_{\text{тр}}(nT)|_{n=0} = k_{\text{П}}x_0(0); \quad (7)$$

$$U_{\text{тр}}(nT)|_{n=1} = K_0^{\text{тр}} \cdot \Delta x(T) + \left( k_{\text{И}} \frac{T}{2} - K_{-2}^{\text{тр}} \right) \cdot x_0(0); \quad (8)$$

$$U_{\text{тр}}(nT) = U_{\text{тр}}((n-1)T) + K_0^{\text{тр}}\Delta x(nT) + K_{-1}^{\text{тр}}\Delta x((n-1)T) + K_{-2}^{\text{тр}}\Delta x((n-2)T) \quad \text{для } n \geq 2. \quad (9)$$

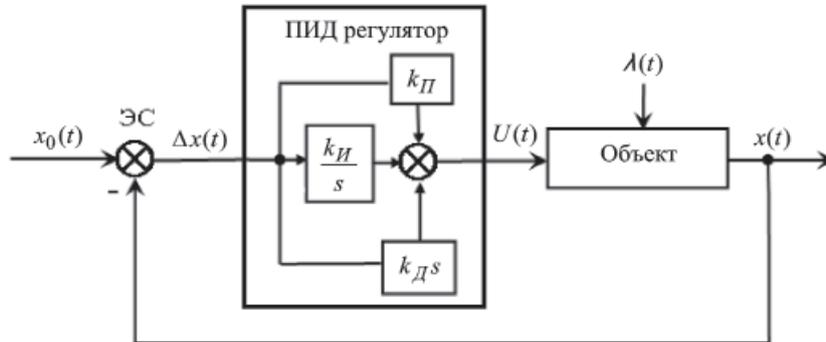


Рис. 1. Структура контура регулирования:

$x_0(t)$  – задающее воздействие;  $\Delta x(t)$  – рассогласование в текущий момент (отклонение, ошибка, невязка);  $k_{\text{П}}$ ,  $k_{\text{И}}$ ,  $k_{\text{Д}}$  – настроечные параметры регулятора;  $U(t)$  – управляющее воздействие;  $\lambda(t)$  – возмущающее воздействие на объект;  $x(t)$  – регулируемая величина; ЭС – элемент сравнения ( $\Delta x(t)$  пропорционален  $x_0(t) - x(t)$ );  $t = nT$  ( $n$  – момент времени;  $T$  – период опроса датчиков)

3) по формуле «Симпсона» (модель С):

$$K_0^{C-\text{неч}} = k_{\text{П}} + \frac{k_{\text{И}}}{2} \cdot T + \frac{k_{\text{Д}}}{T}; \quad K_{-1}^{C-\text{неч}} = -\left( k_{\text{П}} + \frac{2k_{\text{Д}}}{T} - \frac{k_{\text{И}}}{2} \cdot T \right); \quad K_{-2}^{C-\text{неч}} = \frac{k_{\text{Д}}}{T}; \quad (10)$$

$$K_0^{C-\text{четн}} = k_{\text{П}} + k_{\text{И}} \cdot \frac{T}{3} + k_{\text{Д}} \frac{1}{T}; \quad K_{-1}^{C-\text{четн}} = k_{\text{И}} \cdot \frac{5T}{6} - k_{\text{П}} - k_{\text{Д}} \frac{2}{T}; \quad K_{-2}^{C-\text{четн}} = k_{\text{Д}} \frac{1}{T} - k_{\text{И}} \frac{T}{6}; \quad (11)$$

$$U_C(nT)|_{n=0} = k_{\text{П}}x_0(0); \quad (12)$$

$$U_C(nT)|_{n=1} = K_0^{C-\text{неч}} \cdot \Delta x(T) + \left( k_{\text{И}} \frac{T}{2} - K_{-2}^{C-\text{неч}} \right) x_0(0); \quad (13)$$

$$U_C(nT)|_{n=2} = K_0^{C-\text{четн}} \cdot \Delta x(2T) + \left( k_{\text{И}} \frac{4T}{3} - k_{\text{Д}} \frac{1}{T} \right) \Delta x(T) + \left( k_{\text{И}} \frac{T}{3} \right) \Delta x(0); \quad (14)$$

$$U_C(nT) = U_C((n-1)T) + K_0^{C-\text{неч}} \Delta x(nT) + K_{-1}^{C-\text{неч}} \Delta x((n-1)T) + K_{-2}^{C-\text{неч}} \Delta x((n-2)T) \quad \text{для } n = 2k + 1, k = 1, 2, \dots; \quad (15)$$

$$U_C(nT) = U_C((n-1)T) + K_0^{C-\text{четн}} \Delta x(nT) + K_{-1}^{C-\text{четн}} \Delta x((n-1)T) + K_{-2}^{C-\text{четн}} \Delta x((n-2)T) \quad \text{для } n = 2k, k = 2, 3, \dots \quad (16)$$

Считалось, что при замене интеграла в континуальной модели (1) формулой Симпсона возникает более точная цифровая модель процесса регулирования, чем при замене интеграла формулой «трапеций» или «прямоугольников», а замена интеграла в (1) формулой «прямоугольников» приводит к менее точной цифровой модели процесса управления.

Однако исследование регуляторов и соответствующих процессов моделирования их функционирования при моделировании приводов постоянного тока как объектов управления показывает, что существует достаточно широкий класс значений настроечных параметров ( $k_{\text{П}}$ ,  $k_{\text{И}}$  и  $k_{\text{Д}}$ ), при которых модель П имеет существенно лучшие динамические показатели

в сравнении с моделями  $T$  и  $C$  (рис. 2), а модель  $T$  – в сравнении с моделью  $C$  (рис. 3). Таким образом, с целью улучшения качества цифрового регулирования очевидна

потребность создания и применения модели смешанного регулирования, основная идея которой заключается в поиске минимального рассогласования

$$\Delta x_{\min}((n+1)T) = \min(|\Delta x_{\text{пр}}((n+1)T)|, |\Delta x_{\text{тр}}((n+1)T)|, |\Delta x_{\text{с}}((n+1)T)|)$$

и выборе соответствующего минимальному отклонению  $\Delta x_{\min}((n+1)T)$  управляющего воздействия  $U_{\text{см}}(nT) = \{U_{\text{пр}}(nT), U_{\text{тр}}(nT), U_{\text{с}}(nT)\}$ .

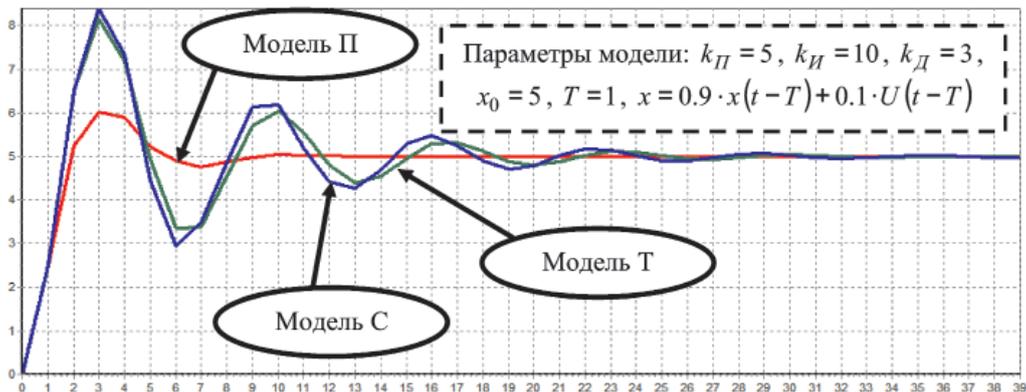


Рис. 2. Моделирование ПИД регулирования [3], показывающее лучшие динамические характеристики модели  $P$  в сравнении с моделями  $T$  и  $C$

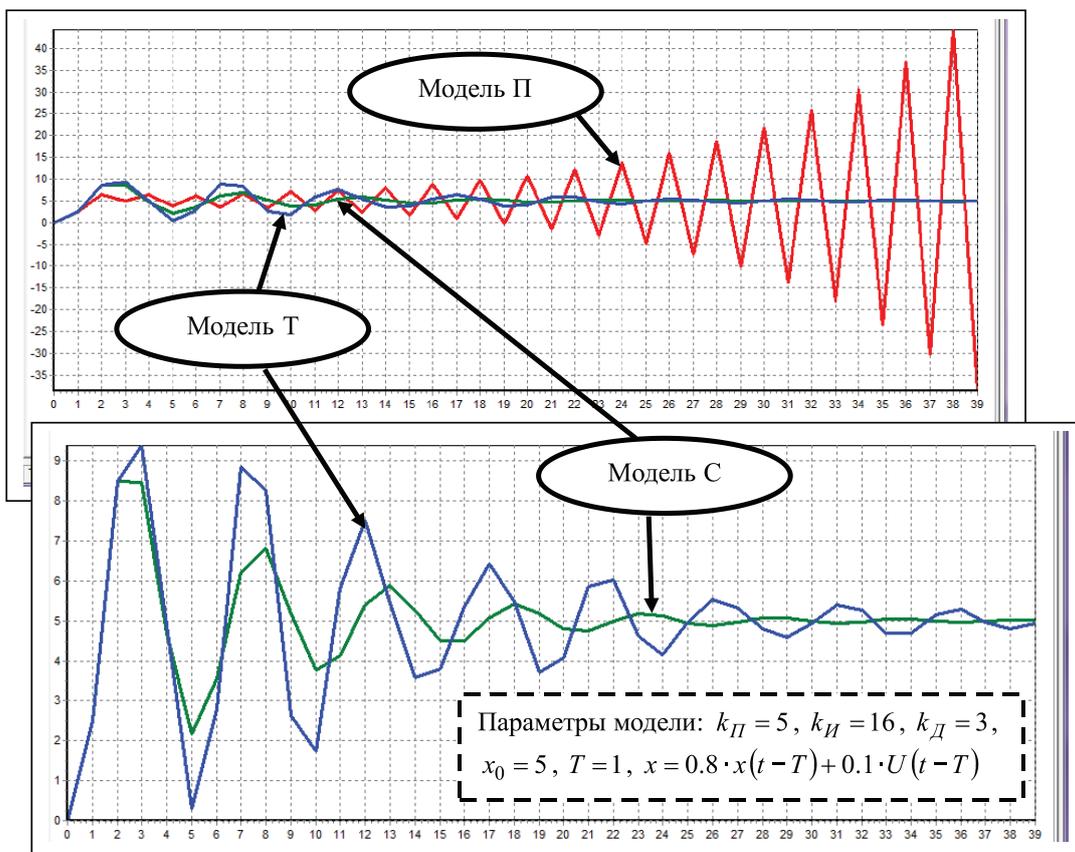


Рис. 3. Моделирование ПИД регулирования [3], показывающее лучшие динамические характеристики модели  $T$  в сравнении с моделями  $T$  и  $C$

**Модель смешанного ПИД регулирования (модель См):**

1. Определение критериев выбора моделей:

$$n = 1 \rightarrow |\Delta x_{\text{пр}}((n+1)T)| = |\Delta x_{\text{тр}}((n+1)T)| \rightarrow U_{\text{см}}(nT) = \{ \text{модель П или модель Т} \}; \quad (17)$$

$$\begin{aligned} n > 1 \rightarrow |\Delta x_{\text{пр}}((n+1)T)| &= |\Delta x_{\text{тр}}((n+1)T)| = |\Delta x_{\text{с}}((n+1)T)| \rightarrow \\ \rightarrow U_{\text{см}}(nT) &= \{ \text{модель П или модель Т или модель С} \}; \end{aligned} \quad (18)$$

$$\begin{aligned} n > 1 \rightarrow (|\Delta x_{\text{пр}}((n+1)T)| &= |\Delta x_{\text{тр}}((n+1)T)|) < |\Delta x_{\text{с}}((n+1)T)| \rightarrow \\ \rightarrow U_{\text{см}}(nT) &= \{ \text{модель П или модель Т} \}; \end{aligned} \quad (19)$$

$$\begin{aligned} n > 1 \rightarrow (|\Delta x_{\text{пр}}((n+1)T)| &= |\Delta x_{\text{с}}((n+1)T)|) < |\Delta x_{\text{тр}}((n+1)T)| \rightarrow \\ \rightarrow U_{\text{см}}(nT) &= \{ \text{модель П или модель С} \}; \end{aligned} \quad (20)$$

$$\begin{aligned} n > 1 \rightarrow (|\Delta x_{\text{пр}}((n+1)T)| &= |\Delta x_{\text{с}}((n+1)T)|) < |\Delta x_{\text{н}}((n+1)T)| \rightarrow \\ \rightarrow U_{\text{см}}(nT) &= \{ \text{модель Т или модель С} \}. \end{aligned} \quad (21)$$

2. Для момента времени  $t = 0$  ( $n = 0$ ):  $U_{\text{см}}(0) = k_{\text{П}}x_0(0)$ .

3. При  $t = T$  ( $n = 1$ ) вычисляются управляющие воздействия  $U_{\text{пр}}(T)$  и  $U_{\text{тр}}(T)$  по соответствующим формулам, реакция объекта управления  $x_{\text{пр}}(2T)$  и  $x_{\text{тр}}(2T)$ , рассогласование  $|\Delta x_{\text{пр}}(2T)|$  и  $|\Delta x_{\text{тр}}(2T)|$ , выбирается модель регулирования (модель П или модель Т), соответствующая минимальному абсолютному значению ошибки:

$$\begin{aligned} U_{\text{пр}}(T, \Delta x_{\text{см}}(T)) \quad \Phi=(4) &\Rightarrow x_{\text{пр}}(2T, U_{\text{пр}}(T), x_{\text{см}}(T)) \Rightarrow \Delta x_{\text{пр}}(2T) = x_0 - x_{\text{пр}}(2T) \\ U_{\text{тр}}(T, \Delta x_{\text{см}}(T)) \quad \Phi=(8) &\Rightarrow x_{\text{тр}}(2T, U_{\text{тр}}(T), x_{\text{см}}(T)) \Rightarrow \Delta x_{\text{тр}}(2T) = x_0 - x_{\text{тр}}(2T) \Rightarrow \\ |\Delta x_{\text{пр}}(2T)| < |\Delta x_{\text{тр}}(2T)| &\rightarrow U_{\text{см}}(T) = U_{\text{пр}}(T); \\ \Rightarrow |\Delta x_{\text{пр}}(2T)| > |\Delta x_{\text{тр}}(2T)| &\rightarrow U_{\text{см}}(T) = U_{\text{тр}}(T); \\ |\Delta x_{\text{пр}}(2T)| = |\Delta x_{\text{тр}}(2T)| &\rightarrow U_{\text{см}}(T) = \Phi.(17) = \begin{cases} \text{модель П} \rightarrow U_{\text{пр}}(T), \\ \text{модель Т} \rightarrow U_{\text{тр}}(T), \end{cases} \end{aligned}$$

где  $\Phi.(*)$  – вычисление в соответствии с формулой (\*).

4. Для момента времени  $t = 2T$  ( $n = 2$ ) вычисляются возможные управляющие воздействия  $U_{\text{пр}}(2T)$ ,  $U_{\text{тр}}(2T)$  и  $U_{\text{с}}(2T)$  по соответствующим формулам, реакция объекта

управления  $x_{\text{пр}}(3T)$ ,  $x_{\text{тр}}(3T)$  и  $x_{\text{с}}(3T)$ , рассогласование  $|\Delta x_{\text{пр}}(3T)|$ ,  $|\Delta x_{\text{тр}}(3T)|$  и  $|\Delta x_{\text{с}}(3T)|$ , выбирается модель ПИД регулирования (модель П, модель Т или модель С), соответствующая минимальному абсолютному значению невязки:

$$\begin{aligned}
& U_{\text{np}}(2T, U_{\text{cm}}(T), \Delta x_{\text{cm}}(2T), \Delta x_{\text{cm}}(T), \Delta x_{\text{cm}}(0)) = \Phi.(5) \Rightarrow \\
& U_{\text{tp}}(2T, U_{\text{cm}}(T), \Delta x_{\text{cm}}(2T), \Delta x_{\text{cm}}(T), \Delta x_{\text{cm}}(0)) = \Phi.(9) \Rightarrow \\
& U_{\text{c}}(2T, \Delta x_{\text{cm}}(2T), \Delta x_{\text{cm}}(T), \Delta x_{\text{cm}}(0)) = \Phi.(14) \Rightarrow \\
& \Rightarrow x_{\text{np}}(3T, U_{\text{np}}(2T), x_{\text{cm}}(2T)) \Rightarrow \Delta x_{\text{np}}(3T) = x_0 - x_{\text{np}}(3T) \\
& \Rightarrow x_{\text{tp}}(3T, U_{\text{tp}}(2T), x_{\text{cm}}(2T)) \Rightarrow \Delta x_{\text{tp}}(3T) = x_{0\text{tp}} - x(3T) \Rightarrow \\
& \Rightarrow x_{\text{c}}(3T, U_{\text{c}}(2T), x_{\text{cm}}(2T)) \Rightarrow \Delta x_{\text{c}}(3T) = x_0 - x_{\text{c}}(3T) \\
& |\Delta x_{\text{np}}(3T)| < |\Delta x_{\text{tp}}(3T)| < |\Delta x_{\text{c}}(3T)| \rightarrow U_{\text{cm}}(2T) = U_{\text{np}}(2T); \\
& |\Delta x_{\text{tp}}(3T)| < |\Delta x_{\text{np}}(3T)| < |\Delta x_{\text{c}}(3T)| \rightarrow U_{\text{cm}}(2T) = U_{\text{tp}}(2T); \\
& |\Delta x_{\text{c}}(3T)| < |\Delta x_{\text{np}}(3T)| < |\Delta x_{\text{tp}}(3T)| \rightarrow U_{\text{cm}}(2T) = U_{\text{c}}(2T); \\
& (|\Delta x_{\text{np}}(3T)| = |\Delta x_{\text{tp}}(3T)|) < |\Delta x_{\text{c}}(3T)| \rightarrow U_{\text{cm}}(2T) = \Phi.(18) = \begin{cases} \text{модель } \Pi \rightarrow U_{\text{np}}(2T); \\ \text{модель } T \rightarrow U_{\text{tp}}(2T); \end{cases} \\
\Rightarrow & (|\Delta x_{\text{np}}(3T)| = |\Delta x_{\text{c}}(3T)|) < |\Delta x_{\text{tp}}(3T)| \rightarrow U_{\text{cm}}(2T) = \Phi.(19) = \begin{cases} \text{модель } \Pi \rightarrow U_{\text{np}}(2T); \\ \text{модель } C \rightarrow U_{\text{c}}(2T); \end{cases} \\
& (|\Delta x_{\text{tp}}(3T)| = |\Delta x_{\text{c}}(3T)|) < |\Delta x_{\text{np}}(3T)| \rightarrow U_{\text{cm}}(2T) = \Phi.(20) = \begin{cases} \text{модель } T \rightarrow U_{\text{tp}}(2T); \\ \text{модель } C \rightarrow U_{\text{c}}(2T); \end{cases} \\
& |\Delta x_{\text{np}}(3T)| = |\Delta x_{\text{tp}}(3T)| = |\Delta x_{\text{c}}(3T)| \rightarrow U_{\text{cm}}(2T) = \Phi.(21) = \begin{cases} \text{модель } \Pi \rightarrow U_{\text{np}}(2T); \\ \text{модель } T \rightarrow U_{\text{tp}}(2T); \\ \text{модель } C \rightarrow U_{\text{c}}(2T). \end{cases}
\end{aligned}$$

5. Для  $t = nT$  ( $n = 2k + 1, k = 1, 2, \dots$ ) вычисляются  $U_{\text{np}}(nT), U_{\text{tp}}(nT)$  и  $U_{\text{c}}(nT)$  и, по соответствующим формулам, реакция объекта управления  $x_{\text{np}}((n+1)T), x_{\text{tp}}((n+1)T)$  и  $x_{\text{c}}((n+1)T)$ , рассогласование  $|\Delta x_{\text{np}}((n+1)T)|, |\Delta x_{\text{tp}}((n+1)T)|$  и  $|\Delta x_{\text{c}}((n+1)T)|$  и выбирается модель, соответствующая минимальному абсолютному значению рассогласования:

$$\begin{aligned}
& U_{\text{np}}(nT, U_{\text{cm}}((n-1)T), \Delta x_{\text{cm}}(nT), \Delta x_{\text{cm}}((n-1)T), \Delta x_{\text{cm}}((n-2)T)) = \Phi.(5) \Rightarrow \\
& U_{\text{tp}}(nT, U_{\text{cm}}((n-1)T), \Delta x_{\text{cm}}(nT), \Delta x_{\text{cm}}((n-1)T), \Delta x_{\text{cm}}((n-2)T)) = \Phi.(9) \Rightarrow \\
& U_{\text{c}}(nT, U_{\text{cm}}((n-1)T), \Delta x_{\text{cm}}(nT), \Delta x_{\text{cm}}((n-1)T), \Delta x_{\text{cm}}((n-2)T)) = \Phi.(15) \Rightarrow \\
& \Rightarrow x_{\text{np}}((n+1)T, U_{\text{np}}(nT), x_{\text{cm}}(nT)) \Rightarrow \Delta x_{\text{np}}((n+1)T) = x_0 - x_{\text{np}}((n+1)T) \\
& \Rightarrow x_{\text{tp}}((n+1)T, U_{\text{tp}}(nT), x_{\text{cm}}(nT)) \Rightarrow \Delta x_{\text{tp}}((n+1)T) = x_0 - x_{\text{tp}}((n+1)T) \Rightarrow \\
& \Rightarrow x_{\text{c}}((n+1)T, U_{\text{c}}(nT), x_{\text{cm}}(nT)) \Rightarrow \Delta x_{\text{c}}((n+1)T) = x_0 - x_{\text{c}}((n+1)T) \\
& |\Delta x_{\text{np}}((n+1)T)| < |\Delta x_{\text{tp}}((n+1)T)| < |\Delta x_{\text{c}}((n+1)T)| \rightarrow U_{\text{cm}}(nT) = U_{\text{np}}(nT); \\
& |\Delta x_{\text{tp}}((n+1)T)| < |\Delta x_{\text{np}}((n+1)T)| < |\Delta x_{\text{c}}((n+1)T)| \rightarrow U_{\text{cm}}(nT) = U_{\text{tp}}(nT); \\
& |\Delta x_{\text{c}}((n+1)T)| < |\Delta x_{\text{np}}((n+1)T)| < |\Delta x_{\text{tp}}((n+1)T)| \rightarrow U_{\text{cm}}(nT) = U_{\text{c}}(nT); \\
& (|\Delta x_{\text{np}}((n+1)T)| = |\Delta x_{\text{tp}}((n+1)T)|) < |\Delta x_{\text{c}}((n+1)T)| \rightarrow U_{\text{cm}}(nT) = \Phi.(18) = \begin{cases} \text{модель } \Pi \rightarrow U_{\text{np}}(nT); \\ \text{модель } T \rightarrow U_{\text{tp}}(nT); \end{cases} \\
\Rightarrow & (|\Delta x_{\text{np}}((n+1)T)| = |\Delta x_{\text{c}}((n+1)T)|) < |\Delta x_{\text{tp}}((n+1)T)| \rightarrow U_{\text{cm}}(nT) = \Phi.(19) = \begin{cases} \text{модель } \Pi \rightarrow U_{\text{np}}(nT); \\ \text{модель } C \rightarrow U_{\text{c}}(nT); \end{cases} \\
& (|\Delta x_{\text{tp}}((n+1)T)| = |\Delta x_{\text{c}}((n+1)T)|) < |\Delta x_{\text{np}}((n+1)T)| \rightarrow U_{\text{cm}}(nT) = \Phi.(20) = \begin{cases} \text{модель } T \rightarrow U_{\text{tp}}(nT); \\ \text{модель } C \rightarrow U_{\text{c}}(nT); \end{cases} \\
& |\Delta x_{\text{np}}((n+1)T)| = |\Delta x_{\text{tp}}((n+1)T)| = |\Delta x_{\text{c}}((n+1)T)| \rightarrow U_{\text{cm}}(nT) = \Phi.(21) = \begin{cases} \text{модель } \Pi \rightarrow U_{\text{np}}(nT); \\ \text{модель } T \rightarrow U_{\text{tp}}(nT); \\ \text{модель } C \rightarrow U_{\text{c}}(nT). \end{cases}
\end{aligned}$$

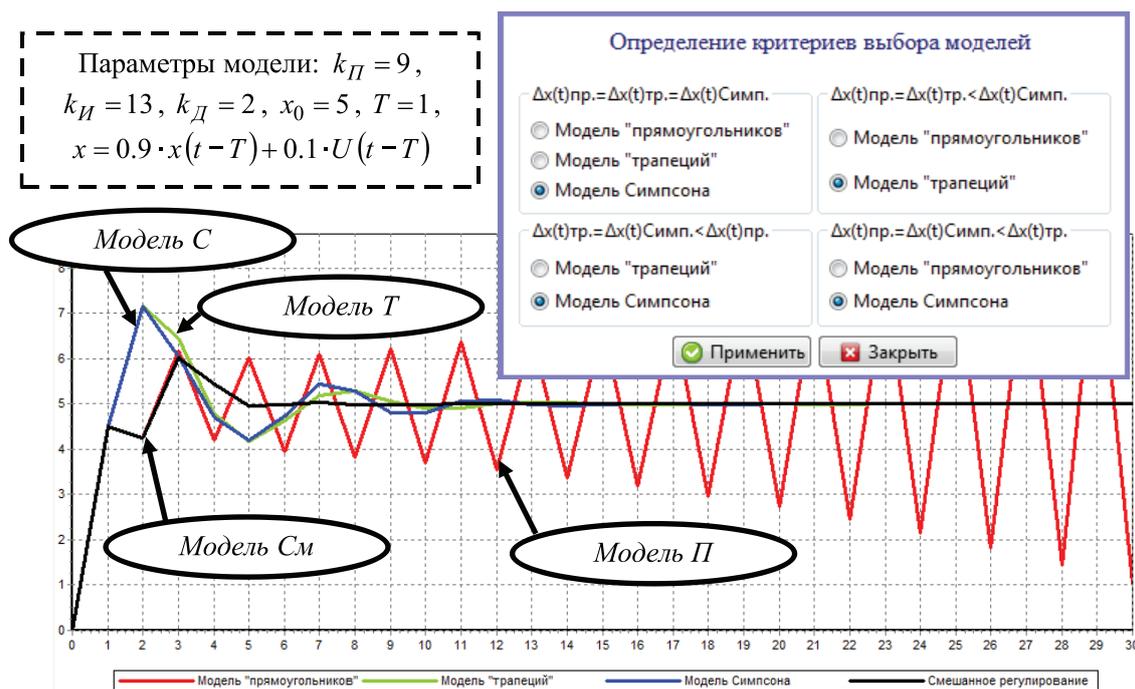


Рис. 4. Моделирование ПИД регулирования [1], показывающее лучшие динамические характеристики модели См в сравнении с моделями П, Т и С

6. Для момента времени  $t = nT$  ( $n = 2k$ ,  $k = 2, 3, \dots$ ) исполнение аналогично пункту 5 с отличием вычисления  $U_c(nT)$  в соответствии с формулой (16).

Результаты моделирования при

$$x(nT) = a \cdot x((n-1)T) + b \cdot U((n-1)T)$$

(привод постоянного тока) с использованием созданных программ [1, 3] (рис. 4) показали эффективность предложенной модели.

**Основные результаты:**

1) построена новая алгоритмическая модель на основе моделей «прямоугольников», «трапеций» и Симпсона, отличающаяся выбором наилучшего управляющего воздействия на каждом шаге;

2) в случае использования математических моделей приводов постоянного тока предложенный алгоритм дает лучшие показатели изменения рассогласования (невязки);

3) результаты исследования предложенного смешанного регулирования позволяют выбрать новый алгоритм в качестве основы создания реальных алгоритмов цифрового ПИД регулирования.

Можно надеяться, что внедрение новой алгоритмической модели приведет к лучшим динамическим характеристикам систем цифрового ПИД регулирования.

Исследование выполнено при поддержке «Госуниверситет-УНПК» по теме «Разработка программной системы поддержки процесса управления в предаварийных состояниях для восстановления нормальной работы», приказ № 7-н/26 от 23.10.2013 г.

**Список литературы**

1. Алиев Ю.О., Захарова О.В., Раков В.И. Программа реализации унифицированных алгоритмов наилучшего цифрового регулирования // Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2015616512. 2015.
2. Захарова О.В. Формула ПИД-регулятора для АЛУ непосредственного формирования // Информационные системы и технологии. – 2012. – № 2 (70). – С. 11–25.
3. Захарова О.В., Ястребков А.Е., Раков В.И. Программа оперативной оценки динамики ПИД регулирования // Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2014615387. 2014.
4. Раков В.И., Захарова О.В. Моделирование цифрового регулятора с превентивной оценкой погрешности на каждом шаге дискретизации. Часть 1: Дискретные модели // Промышленные АСУ и контроллеры. – 2014. – № 5. – С. 53–65.
5. Ang K.H., Chong G., Li Y. PID control system analysis, design, and technology // IEEE Transactions on Control Systems Technology. – 2005. – Vol. 13. – № 4. – P. 559–576.
6. Åström K.J. Hägglund T. PID Controllers: Theory, Design and Tuning. ISA (The Instrumentation, Systems, and Automation Society), 1995. – 408 p.
7. Åström K.J. Hägglund T. Advanced PID Control. NC: ISA (The Instrumentation, Systems, and Automation Society), 2005. – 460 p.

8. O'Dwyer, A. Handbook of PI and PID Controller Tuning Rules. – London: Imperial College Press, 2009. – 3rd ed. – 624 p.

### References

1. Aliev Yu.O., Zakharova O.V., Rakov V.I. Programma realizacii unificirovannikh algoritmov nailuchshego cifrovogo regulirovaniya [The software system for modeling the optimal digital control algorithms]. Svidetel'stvo o gosudarstvennoy registracii programmi dlya EVM no. 2015616512 [Certificate of state registration of the computer no. 2015616512]. 2015.

2. Zakharova O.V. Formula PID-regulyatora dlya ALU neposredstvennogo formirovaniya [Formula PID for ALU immediate formation]. Informatsionnye sistemy i tekhnologii [Information Systems and Technology]. 2012, no. 2, pp. 11–25.

3. Zakharova O.V., Yastrebkov A.E., Rakov V.I. Programma operativnoy ocenki dinamiki PID regulirovaniya [Programma operativnoy ocenki dinamiki PID regulirovaniya]. Svidetel'stvo o gosudarstvennoy registracii programmi dlya EVM no. 2014615387 [Certificate of state registration of the computer no. 2014615387]. 2014.

4. Rakov V.I., Zakharova O.V. Modelirovanie tsifrovogo regul'yatora s preventivnoy otsenkoy pogreshnosti na kazhdom shage diskretizatsii. Chast 1: Diskretnye mod-

eli [Simulation of digital controller with preventive error estimate at each sampling step. Part 1: Discrete models]. Promyshlennyye ASU i kontrolyery [Industrial ACS and controllers]. 2014, no. 5, pp. 53–65.

5. Ang K.H., Chong G., Li Y. PID control system analysis, design, and technology // IEEE Transactions on Control Systems Technology. 2005. Vol. 13. no. 4. pp. 559–576.

6. Åström K.J. Hägglund T. PID Controllers: Theory, Design and Tuning. ISA (The Instrumentation, Systems, and Automation Society), 1995. 408 p.

7. Astrom K.J. Hagglund T. Advanced PID Control. ISA (The Instrumentation, Systems, and Automation Society), 2005. 460 p.

8. ODwyer, A. Handbook of PI and PID Controller Tuning Rules. – London: Imperial College Press, 2009. 3rd ed. 624 p.

### Рецензенты:

Раков В.И., д.т.н., профессор кафедры «Информационные системы», ФГБОУ ВПО «Государственный университет – УНПК», г. Орёл;

Коськин А.В., д.т.н., профессор, проректор по информатизации и спецпроектам, ФГБОУ ВПО «Государственный университет – УНПК», г. Орёл.