# ПРИБОРЫ И СИСТЕМЫ АВТОМАТИЧЕСКОГО УПРАВЛЕНИЯ

УДК 62-50
DOI: 10.17586/0021-3454-2020-63-9-786-793

## РАСЧЕТ ЦИФРОВОЙ СЛЕДЯЩЕЙ СИСТЕМЫ С КОНЕЧНЫМ ВРЕМЕНЕМ ЗАТУХАНИЯ СВОБОДНОГО ПРОЦЕССА. Ч. I. МИНИМАЛЬНОЕ ВРЕМЯ ПЕРЕХОДНОГО ПРОЦЕССА

А. М. Коновалов, А. И. Коршунов

*Военно-морской политехнический институт ВУНЦ ВМФ „Военно-морская академия им. Н. Г. Кузнецова“, 198514, Санкт-Петербург, Россия*
*E-mail: a.i.korshunov@mail.ru*

Предложен метод расчета цифровой следящей системы (ЦСС) с минимальным временем затухания свободного процесса и скоростной ошибкой, не превосходящей допустимую. Установлено, что при достаточно малом периоде дискретизации скоростная ошибка ЦСС пропорциональна скорости слежения и периоду дискретизации, а коэффициент пропорциональности зависит от порядка непрерывной части системы. Получены значения коэффициента пропорциональности для 2-, 3-, 4- и 5-го порядков непрерывной части, увеличивающиеся с ростом порядка. Приведен пример расчета ЦСС. Проведено численное моделирование рассчитанной ЦСС в системе MatLab при отработке линейно возрастающего и скачкообразного задающего воздействия для минимального времени затухания свободного процесса. Результаты моделирования совпали с данными расчетов.

***Ключевые слова:*** *цифровая следящая система, затухание свободного процесса, конечное время, допустимая скоростная ошибка*

**Введение.** В работе [1] показана возможность с помощью линейного дискретного корректирующего устройства получить в линеаризованной модели ЦСС, представленной на рис. 1, конечное время полного затухания свободного процесса. Это время не превышает целого числа периодов дискретизации, равного порядку непрерывной части (НЧ) ЦСС.

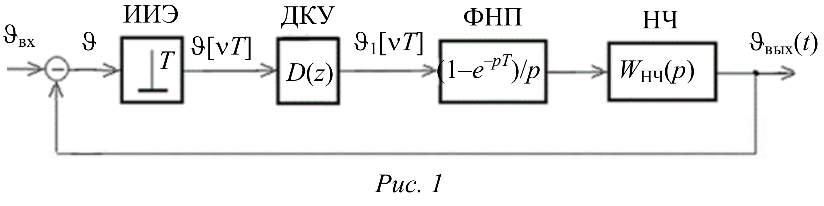


*Рис. 1*

Кроме того, в [1] предложена методика выбора простейшей передаточной функции дискретного корректирующего устройства (ДКУ).

В настоящей статье рассмотрена методика расчета ЦСС с конечным временем затухания свободного процесса при заданном требовании к ее точности:

$$\theta_к \le \theta_{кдоп} \text{ для } \Omega \le \Omega_{доп}, \tag{1}$$

где $\theta_{кдоп}$ — допустимая скоростная ошибка ЦСС, $\Omega_{доп}$ — допустимая скорость слежения при передаточной функции непрерывной части

$$W_{\text{НЧ}}(p)=\frac{K}{p(T_1 p+1)...(T_{n-1}p+1)}, \qquad n\le 5, \tag{2}$$

где $K$ — коэффициент преобразования, $T_1,\dots,T_{n-1}$ — постоянные времени НЧ.

**Обеспечение заданной точности.** Передаточная функция замкнутой ЦСС с конечным временем затухания переходного процесса должна иметь вид [1—3]:

$$\Phi(z)=\frac{g_{n-1}z^{n-1}+...+g_1 z+g_0}{z^n}. \tag{3}$$

Согласно формуле (3) находим передаточную функцию разомкнутой ЦСС

$$W_{\text{ЦСС}}(z)=D(z)W_{\text{НЧ}}(z)=\frac{\Phi_{\text{ЦСС}}(z)}{1-\Phi_{\text{ЦСС}}(z)}=\frac{g_{n-1}z^{n-1}+...+g_1 z+g_0}{z^n-g_{n-1}z^{n-1}-...-g_1 z-g_0}, \tag{4}$$

где $D(z)$ — передаточная функция дискретного корректирующего устройства,

$$W_{\text{НЧ}}(z)=\frac{z-1}{z}Z\left\{\frac{W_{\text{НЧ}}(p)}{p}\right\}=K\frac{R_{n-1}(z)}{Q_n(z)}=\frac{\beta_{n-1}z^{n-1}+...+\beta_1 z+\beta_0}{(z-1)(z-d_1)...(z-d_{n-1})} \tag{5}$$

— дискретная передаточная функция НЧ, $Z\{\dots\}$ — символ $Z$-преобразования, $d_i=\exp(-T/T_i)$, $i=1, 2, \dots, n-1$; $T$ — период дискретизации (шаг квантования по времени), $\beta_i$ — коэффициенты числителя $W_{\text{НЧ}}(z)$. Найти $\beta_i$ возможно путем разложения $W_{\text{НЧ}}(p)/p$ на простейшие дроби, $Z$-преобразования простейших дробей и их суммирования. В результате трудоемких операций получаются весьма громоздкие и неудобные выражения для расчета коэффициентов $\beta_i$, тогда как коэффициенты знаменателя $W_{\text{НЧ}}(z)$ определяются весьма простыми выражениями.

Поскольку для удовлетворения требованиям „грубости“ ЦСС и сохранения ее первого порядка астатизма необходим единичный полюс передаточной функции $W_{\text{ЦСС}}(z)$ [1], должно выполняться условие:

$$z^n-g_{n-1}z^{n-1}-...-g_1 z-g_0\Big|_{z=1}=0 \text{ или } \quad g_{n-1}+...+g_1 z+g_0=1. \tag{6}$$

В этом случае $W_{\text{ЦСС}}(z)$ и $\theta_{\text{к}}$ можно представить в виде

$$W_{\text{ЦСС}}(z)=\frac{1}{z-1}W_{\text{ЦСС}1}(z), \quad \theta_{\text{к}}=\frac{\Omega T}{W_{\text{ЦСС}1}(1)}, \tag{7}$$

где $W_{\text{ЦСС}1}(z)=\dfrac{g_{n-1}z^{n-1}+...+g_1 z+g_0}{S_{n-1}(z)}$, $\quad S_{n-1}(z)=\dfrac{z^n-g_{n-1}z^{n-1}-...-g_1 z-g_0}{z-1}$.

Скоростная ошибка линеаризованной модели ЦСС определяется выражением (7) [4, 5], где

$$W_{\text{ЦСС}1}(1)=\lim_{z\to 1}W_{\text{ЦСС}1}(z)=\frac{g_{n-1}+...+g_1+g_0}{\lim\limits_{z\to 1}S_{n-1}(z)}. \tag{8}$$

Поскольку функция $S_{n-1}(z)$ в точке $z = 1$ имеет неопределенность типа „0/0“, то для ее раскрытия можно воспользоваться правилом Лопиталя

$$\lim_{z\to 1}S_{n-1}(z)=\frac{n-(n-1)g_{n-1}-...-2g_2-g_1}{1}=g_{n-1}+2g_{n-2}+...+(n-1)g_1+ng_0. \tag{9}$$

При выводе формулы (9) использовано условие (6).

Поскольку для обеспечения требования „грубости“ ЦСС и простоты дискретного корректирующего устройства в работе [1] рекомендовано выбрать числитель $W_{\text{ЦСС}}(z)$ пропорциональным или равным числителю дискретной передаточной функции НЧ $W_{\text{НЧ}}(z)$, т.е. $R_{n-1}(z)$, то

$$W_{\text{ЦСС}1}(1)=\frac{\beta_{n-1}+\beta_{n-2}+\ldots+\beta_1 z+\beta_0}{\beta_{n-1}+2\beta_{n-2}+\ldots+(n-1)\beta_1+n\beta_0}. \tag{10}$$

С учетом пропорциональности коэффициентов $\beta_i$ коэффициенту преобразования НЧ $K$ из формулы (10) следует независимость $W_{\text{ЦСС}1}(1)$, а значит и скоростной ошибки ЦСС (8), от величины $K$. Заметим, что компенсация нулями передаточной функции цифрового корректирующего устройства $D(z)$ полюсов дискретной передаточной НЧ $W_{\text{НЧ}}(z)$ возможна вследствие расположения последних в области устойчивости ($d_i$<1).

Очевидна необходимость в простом способе вычисления коэффициентов $\beta_i$, $i=0,1,\ldots,n-1$. Таковым может служить способ, основанный на вычислении начальных значений переходной характеристики НЧ (реакции на единичный скачок $1(t)$: $h[kT]$, $k=1,\ 2,\ 3,\ldots$). Для этого можно воспользоваться стандартными программными средствами решения дифференциальных уравнений вида

$$a_n\frac{d^n h}{dt^n}+a_{n-1}\frac{d^{n-1}h}{dt^{n-1}}+\ldots+a_2\frac{d^2h}{dt^2}+a_1\frac{dh}{dt}=K\cdot 1(t), \tag{11}$$

положив для простоты $K$=1 с$^{-1}$, при нулевых начальных условиях. Коэффициенты $a_i$, $i=1,\ 2,\ 3,\ldots$ получаются в результате раскрытия скобок знаменателя $W_{\text{НЧ}}(p)$.

$$p(T_1p+1)\ldots(T_{n-1}p+1)=a_np^n+a_{n-1}p^{n-1}+\ldots a_2p^2+p, \tag{12}$$

где $a_n=T_1T_2\ldots T_{n-1}$.

Эти же значения $h\left[kT\right]$ при известной $W_{\text{НЧ}}(p)$ (5) можно определить, разложив произведение $W_{\text{НЧ}}(z)\dfrac{z}{z-1}$ в ряд Лорана

$$W_{\text{НЧ}}(z)\frac{z}{z-1}=\frac{\beta_{n-1}z^n+\ldots+\beta_1z^2+\beta_0z}{z^{n+1}+\alpha_nz^n+\ldots+\alpha_1z^2+\alpha_0z}=h[T]z^{-1}+h[2T]z^{-2}+h[3T]z^{-3}+\ldots, \tag{13}$$

где коэффициенты $\alpha_i$, $i=1,2,3,\ldots,n$ получаются путем раскрытия скобок в произведении

$$(z-1)^2(z-d_1)\ldots(z-d_{n-1})=z^{n+1}+\alpha_nz^n+\ldots+\alpha_2z^2+\alpha_1z+\alpha_0.$$

Коэффициенты разложения можно получить путем деления числителя дроби на ее знаменатель. Однако проще это сделать, решая разностное уравнение методом последовательных вычислений. Покажем это на примере НЧ третьего порядка. Ее разностное уравнение, согласно дискретной передаточной функции (5), имеет вид

$$\begin{aligned}&\theta_{\text{вых}}[kT]+\alpha_2\theta_{\text{вых}}[(k-1)T]+\alpha_1\theta_{\text{вых}}[(k-2)T]+\alpha_0\theta_{\text{вых}}[(k-3)T]=\\&=K\{\beta_2\theta_1[(k-1)T]+\beta_1\theta_1[(k-2)T]+\beta_0\theta_1[(k-3)T]\},\end{aligned} \tag{14}$$

где $\alpha_2=-(1+d_1+d_2)$, $\alpha_1=d_1+d_2+d_1d_2$, $\alpha_0=d_1d_2$, $\theta_1=1[kT]$, $\theta_{\text{вых}}[-T]=\theta_{\text{вых}}[-2T]=$ $=\theta_{\text{вых}}[-3T]=0$, $\theta_{\text{вых}}[kT]=h[kT]$ — переходная характеристика.

Приняв $K$ = 1 с$^{-1}$, можно вычислить необходимые для определения коэффициентов $\beta_2$, $\beta_1$, $\beta_0$ значения $h\left[kT\right]$ по формуле

$$\begin{aligned}&h[kT]=-(\alpha_2h[(k-1)T]+\alpha_1h[(k-2)T]+\alpha_0h[(k-3)T])+\\&+\beta_2\cdot 1[(k-1)T]+\beta_1\cdot 1[(k-2)T]+\beta_0\cdot 1[(k-3)T]\}.\end{aligned} \tag{15}$$

Решив разностное уравнение с учетом нулевых начальных условий, т.е. $h[kT]=0$ при $k$<0, получим

$$\begin{cases}h[0]=0,\ \ h[T]=\beta_2,\ \ h[2T]=\beta_2+\beta_1-\alpha_2h[T],\\ h[3T]=\beta_2+\beta_1+\beta_0-\alpha_2h[2T]-\alpha_1h[T].\end{cases} \tag{16}$$

Из системы уравнений (16) непосредственно получаем

$$\begin{cases} \beta_2 = h[T],\ \ \beta_1 = -\beta_2 + h[2T] - \alpha_2 h[T], \\ \beta_0 = -\beta_2 - \beta_1 + h[3T] + \alpha_2 h[2T] + \alpha_1 h[T]. \end{cases} \quad (17)$$

Аналогично получены выражения для $n$=4 и 5:

$$\begin{cases} \beta_3 = h[T],\ \ \beta_2 = -\beta_3 + \alpha_3 h[T], \\ \beta_1 = -\beta_3 - \beta_2 + \alpha_3 h[2T] + \alpha_2 h[T], \\ \beta_0 = -\beta_3 - \beta_2 - \beta_1 + \alpha_3 h[3T] + \alpha_2 h[2T] + \alpha_1 h[T]; \end{cases} \quad (18)$$

$$\begin{cases} \beta_4 = h[T],\ \ \beta_3 = -\beta_4 + \alpha_4 h[T],\ \ \beta_2 = -\beta_4 - \beta_3 + \alpha_4 h[2T] + \alpha_3 h[T], \\ \beta_1 = -\beta_4 - \beta_3 - \beta_2 + +\alpha_4 h[3T] + \alpha_3 h[2T] + \alpha_2 h[T], \\ \beta_0 = -\beta_4 - \beta_3 - \beta_2 - \beta_1 + \alpha_4 h[4T] + \alpha_3 h[3T] + \alpha_2 h[2T] + \alpha_1 h[T]. \end{cases} \quad (19)$$

При малом, по сравнению с постоянными времени, периоде дискретности $T$ значения переходной характеристики имеют относительно $T$ порядок малости, равный порядку знаменателя передаточной функции НЧ (2). Это позволяет определить приближенное значение $W_{\text{ЦСС}1}(1)$, не зависящее от величины $K$. Проверить, достаточно ли мало $T$, можно путем численного моделирования.

С учетом нулевых начальных условий из уравнения (11) получаем

$$\frac{d^n h}{dt^n}(+0) = \frac{K}{a_n} = \frac{K}{T_1 T_2 \ldots T_{n-1}},\ \ K = 1\ \text{с}^{-1}. \quad (20)$$

Используя формулу (20), получим

$$h[iT] = \frac{K}{a_n} \cdot \frac{(iT)^n}{n!},\quad i = 1, 2, \ldots, K = 1\ \text{с}^{-1}. \quad (21)$$

В качестве примера определим приближенное значение $W_{\text{ЦСС}1}(1)$ для $n$ =3

$$W_{\text{ЦСС}1}(1) = \frac{\beta_2 + \beta_1 + \beta_0}{\beta_2 + 2\beta_1 + 3\beta_0}. \quad (22)$$

Для получения первых ненулевых членов разложения коэффициентов $\beta_i, i = 2, 1, 0$, в ряд по степеням периода дискретности $T$ в формуле (17) необходимо подставлять также первые члены разложения коэффициентов $\alpha_i, i = 2, 1, 0.$ Предельные значения $\lim_{T \to 0} \alpha_i, i = 2, 1, 0$ представляют собой коэффициенты полинома $(z\text{–}1)^3$, т.е. $\alpha_2 = -3, \alpha_1 = 3, \alpha_0 = -1.$

В результате простых вычислений получаем

$$\beta_2 = \frac{KT^3}{3! T_1 T_2},\ \ \beta_2 = \frac{4KT^3}{3! T_1 T_2},\ \ \beta_2 = \frac{KT^3}{3! T_1 T_2},\ \ K = 1\ \text{с}^{-1},\ \ W_{\text{ЦСС}1}(1) = \frac{1}{2}.$$

Аналогично получены значения $W_{\text{ЦСС}1}(1)$ для $n$=2, 4, 5, равные соответственно 2/3, 2/5, 1/3.

Таким образом, можно по требованию (1)

$$\theta_{\text{к}} = \frac{\Omega_{\text{доп}} T}{W_{\text{ЦСС}1}(1)} \le \theta_{\text{кдоп}} \quad (23)$$

выбрать период дискретизации $T$

$$T \le \frac{W_{\text{ЦСС}1}(1)}{\Omega_{\text{доп}}} \theta_{\text{кдоп}}. \quad (24)$$

Значение $T$, определенное при использовании приближенного значения $W_{\text{ЦСС}1}(1)$, следует уточнить. Вычислив точные значения $\beta_i$ $W_{\text{ЦСС}1}(1)$ при выбранном по условию (24) значении $T$, следует проверить выполнение условия (23) и при необходимости уточнить значение $T$ методом подбора.

**Пример**. Рассчитаем ЦСС 3-го порядка при требовании по точности $\theta_{\text{к}} \le \theta_{\text{кдоп}} = 0{,}15° = 9'$ при $\Omega \le \Omega_{\text{доп}} = 30$ °/с.

Согласно формуле (25), $T \le \dfrac{0{,}15 \cdot 0{,}5}{30} = 2{,}5 \cdot 10^{-3}$ с. Положим, как и в примере из работы [1], $T_1$=0,1, $T_2$=0,02 с. Для принятого значения $T$ по точным аналитическим выражениям [5] определяем при $K$=1 с$^{-1}$:

$$\beta_2 = 1{,}2545 \cdot 10^{-6},\ \ \beta_1 = 4{,}8346 \cdot 10^{-6},\ \ \beta_0 = 1{,}1638 \cdot 10^{-6},\ \ W_{\text{ЦСС}1}(1) = 0{,}50633.$$

Таким образом, максимальная ошибка слежения при $\Omega_{\text{доп}} = 30$ °/с:

$$\theta_{\text{K}} = \frac{\Omega T}{W_{\text{ЦСС}1}(1)} = \frac{30 \cdot 0{,}0025}{0{,}50633} = 0{,}14812^{\circ} < \ \theta_{\text{кдоп}} = 0{,}15^{\circ}.$$

Следовательно, изменять значение $T$=2,5·10$^{-3}$ с не требуется. В случае $\theta_{\text{к}} > \theta_{\text{кдоп}}$ необходимо уменьшить значение $T$. Подбор нужного значения $T$ с использованием предложенного нами алгоритма вычисления коэффициентов числителя и знаменателя при наличии соответствующей компьютерной программы $W_{\text{НЧ}}(z)$ (5) трудностей не вызывает.

Рассчитав по методике, предложенной в [1], передаточную функцию дискретного фильтра $D(z)$, получаем

$$D(z) = \frac{z^2 + \alpha_1 z + \alpha_0}{K(q_2 z^2 + q_1 z + q_0)},$$

где $\alpha_1 = -d_1 - d_2 = -1{,}8578$, $\alpha_0 = d_1 d_2 = 0{,}86071$, $q_2 = \beta_2 + \beta_1 + \beta_0 = 7{,}2529 \cdot 10^{-6}$, $q_1 = \beta_1 + \beta_0 = 5{,}9984 \cdot 10^{-6}$, $q_0 = \beta_0 = 1{,}1684 \cdot 10^{-6}$.

На рис. 2 представлена численная модель линеаризованной ЦСС, построенная в системе MatLab 6.5 Simulink 5 и позволяющая исследовать ЦСС при линейно возрастающем воздействии и при скачке задающего воздействия.

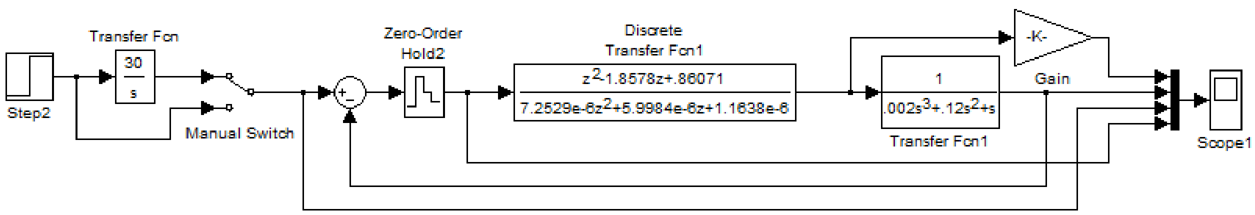


*Рис. 2*

Результаты моделирования процесса отработки линейно возрастающего воздействия с $\Omega$=30 °/с представлены на рис. 3, из которого видно, что расчетное значение скоростной ошибки устанавливается за три периода дискретности. Определенное в результате моделирования значение скоростной ошибки $\theta_{\text{к}} = 0{,}14812^{\circ}$ совпало с расчетным.

Результаты моделирования процесса отработки единичного скачка задающего воздействия представлены на рис. 4. Как и в предыдущем случае, свободный процесс в системе заканчивается за три периода дискретности.

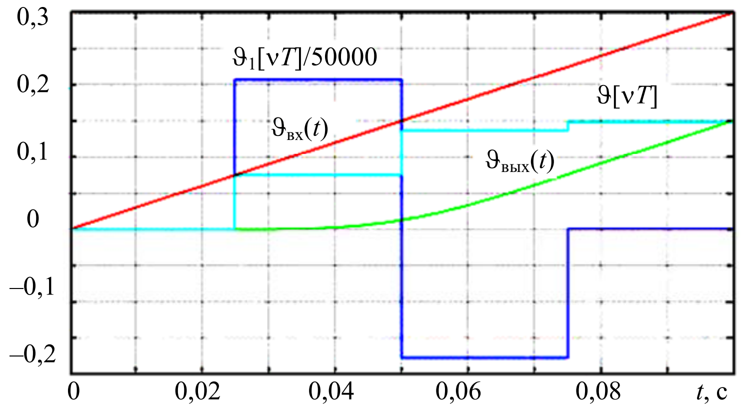


*Рис. 3*

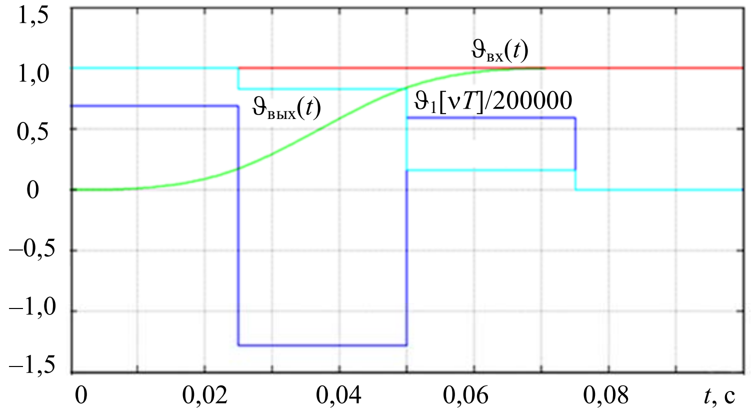


*Рис. 4*

При высокой частоте дискретизации $1/T$ время затухания свободного процесса в линейной зоне оказывается очень малым, например, в рассмотренном примере $nT = 3 \cdot 2{,}5 \cdot 10^{-3} = 7{,}5$ мс, что во многих случаях много меньше требуемого. Малое время затухания свободного процесса требует больших управляющих воздействий, что сужает линейную зону системы.

Увеличение времени полного затухания свободного процесса в пределах допустимого требует меньших управляющих воздействий и расширяет линейную зону системы.

**Выводы**

1. Предложенный метод позволяет рассчитать ЦСС с минимальным временем затухания свободного процесса и ограниченной скоростной ошибкой, удовлетворяющей требованию к динамической точности ЦСС.

2. При достаточно малом периоде дискретизации скоростная ошибка ЦСС пропорциональна скорости слежения и периоду дискретизации, с коэффициентом пропорциональности, зависящим от порядка непрерывной части системы.

3. Значения коэффициента пропорциональности получены для 2-, 3-, 4- и 5-го порядков непрерывной части ЦСС. С увеличением порядка коэффициенты возрастают.

4. Численное моделирование рассчитанной ЦСС при отработке линейно возрастающего и скачкообразного воздействий подтверждает правильность предложенного метода расчета.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Коршунов А. И.* Цифровая следящая система с конечным временем затухания свободного процесса // Изв. вузов. Приборостроение. 2019. Т. 62, № 12. С. 1078—1086.

2. *Изерман Р.* Цифровые системы управления. М.: Мир, 1984. 541 с.

3. *Джури Э.* Импульсные системы автоматического регулирования. М.: Физматгиз, 1963. 567 с.
4. *Шипилло В. П.* Операторно-рекуррентный метод расчета электрических цепей и систем. М.: Энергоатомиздат, 1991. 311 с.
5. *Коршунов А. И.* Основы теории управления. Руководство к курсовому проектированию. Петродворец: ВМУРЭ им. А. С. Попова, 1998. 136 с.



***Сведения об авторах***

***Артем Михайлович Коновалов*** — курсант; Военно-морской политехнический институт ВУНЦ ВМФ „Военно-морская академия им. Н. Г. Кузнецова", факультет систем автоматизации управления

***Анатолий Иванович Коршунов*** — д-р техн. наук, профессор; Военно-морской политехнический институт ВУНЦ ВМФ „Военно-морская академия им. Н. Г. Кузнецова", кафедра радиоэлектроники; E-mail: a.i.korshunov@mail.ru



Поступила в редакцию
28.12.2019 г.

**Ссылка для цитирования:** *Коновалов А. М., Коршунов А. И.* Расчет цифровой следящей системы с конечным временем затухания свободного процесса. Ч. I. Минимальное время переходного процесса // Изв. вузов. Приборостроение. 2020. Т. 63, № 9. С. 786—793.


## CALCULATION OF A DIGITAL TRACKING SYSTEM WITH A FINITE DECAY TIME OF A FREE PROCESS. PART I. MINIMUM TRANSIENT TIME


**A. M. Konovalov, A. I. Korshunov**

*Naval Polytechnic Institute of Military educational and scientific center of the Navy "Naval Academy named after Admiral of the Fleet of the Soviet Union N.G. Kuznetsov", 198514, St. Petersburg, Russia*
*E-mail: a.i.korshunov@mail.ru*



A method is proposed for calculating a digital tracking system (DTS) with a minimum decay time of a free process and a rate error that does not exceed a preassigned value. It was found that with a sufficiently small sampling period, the speed error of the DTS is proportional to the tracking speed and the sampling period, and the proportionality coefficient depends on the order of the continuous part of the system. The values of the proportionality coefficient for the 2-, 3-, 4- and 5th orders of the continuous part, increasing with increasing order, are obtained. An example of calculating the DTS is presented. Numerical simulation of the DTS operation in the MatLab system is carried out for a linearly increasing and stepwise reference action for the minimum decay time of the free process. Results of the simulation are reported to coincide with the calculated data.



**Keywords:** digital tracking system, free process decay, finite time, permissible speed error


### REFERENCES


1. Korshunov A.I. *Journal of Instrument Engineering*, 2019, no. 12(62), pp. 1078–1086. (in Russ.)
2. Isermann R. *Digital control systems*, Berlin etc., 1981.
3. Jury E.J. *Sampled-data control systems*, NY, Wiley, London, Chapmen and Hall, 1958.
4. Shipillo V.P. *Operatorno-rekurrentnyy metod rascheta elektricheskikh tsepeyi sistem* (Operator-Recurrence Method for Calculating Electrical Circuits and Systems), Moscow, 1991, 311 p. (in Russ.)
5. Korshunov A.I. *Osnovy teorii upravleniya. Osnovy teoriii system avtomaticheskogo upravleniya* (Bases of the Theory of Management. Bases of the Theory and Systems of Automatic Control), Petrodvorets, 2017, pp. 136. (in Russ.)



***Data on authors***

***Artyom M. Konovalov*** — Military Student; Naval Polytechnic Institute of Military educational and scientific center of the Navy "Naval Academy named after Admiral of the Fleet of the Soviet Union N.G. Kuznetsov", Faculty of Control Systems Automation

***Anatoly E. Korshunov*** — Dr. Sci., Professor, Naval Polytechnic Institute of Military educational and scientific center of the Navy "Naval Academy named after Admiral of the Fleet of the Soviet Union N.G. Kuznetsov", Department of Radio Electronics; E-mail: a.i.korshunov@mail.ru

**For citation**: Konovalov A. M., Korshunov A. I. Calculation of a digital tracking system with a finite decay time of a free process. Part I. Minimum transient time. *Journal of Instrument Engineering*. 2020. Vol. 63, N 9. P. 786—793 (in Russian).

DOI: 10.17586/0021-3454-2020-63-9-786-793