УДК 62-50
DOI: 10.17586/0021-3454-2020-63-9-794-802

РАСЧЕТ ЦИФРОВОЙ СЛЕДЯЩЕЙ СИСТЕМЫ С КОНЕЧНЫМ ВРЕМЕНЕМ ЗАТУХАНИЯ СВОБОДНОГО ПРОЦЕССА. Ч. II. ВРЕМЯ ПЕРЕХОДНОГО ПРОЦЕССА, БОЛЬШЕЕ МИНИМАЛЬНОГО

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

Рассмотрены два способа выбора передаточной функции дискретного корректирующего фильтра (ДКУ). При более простом способе существенно уменьшается управляющее воздействие, но при этом увеличивается скоростная ошибка. Более сложный способ выбора ДКУ позволяет сохранить скоростную ошибку, как и для минимального времени затухания свободного процесса, но при менее существенном уменьшении управляющего воздействия и небольшом перерегулировании при отработке скачка. Приведен пример расчета ЦСС. Проведено численное моделирование рассчитанной ЦСС в системе MatLab при отработке линейно возрастающего и скачкообразного задающего воздействия. Результаты моделирования совпали с расчетными.

Ключевые слова: *цифровая следящая система, затухание свободного процесса, большее минимального конечное время*

Введение. В работе [1] предложен метод расчета линеаризованной модели ЦСС, позволяющий с помощью дискретного корректирующего устройства (ДКУ) получить в ней минимальное время полного затухания свободного процесса [2—5] при скоростной ошибке, не превышающей допустимое значение.

При высоких требованиях к точности ЦСС вследствие пропорциональности $\theta_{\text{к}}$ периоду дискретизации T следует выбирать малое значение T. Время затухания свободного процесса в линейной зоне оказывается при этом очень малым. В рассмотренном в [1] примере при $\theta_{\text{кдоп}} = 0{,}15°$, $\Omega_{\text{доп}} = 30$ °/с выбрано T=$2{,}5 \cdot 10^{-3}$ с, при n=3 время полного затухания свободного процесса $nT = 3 \cdot 2{,}5 \cdot 10^{-3} = 7{,}5$ мс. Это во многих случаях много меньше требуемого для электромеханических ЦСС. 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.

Увеличение времени полного затухания свободного процесса. Увеличим порядок желаемой передаточной функции замкнутой ЦСС до значения $m > n$, n — порядок исходной ЦСС без дискретной коррекции. Время полного затухания свободного процесса при этом составит m периодов дискретизации T.

Передаточная функция дискретного корректирующего устройства определяется выражением

$$D(z) = \frac{G_{m-1}(z)}{z^m - G_{m-1}(z)} \bigg/ W_{\text{НЧ}}(z), \qquad (1)$$

где $G_{m-1}(z) = g_{m-1}z^{m-1} + \cdots + g_1 z + g_0$, $G_{m-1}(z)\big|_{z=1} = 1$, $W_{\text{НЧ}}(z) = \dfrac{z-1}{z} Z\left\{\dfrac{W_{\text{НЧ}}(p)}{p}\right\} = K\dfrac{R_{n-1}(z)}{Q_n(z)} =$ $= \dfrac{\beta_{n-1}z^{n-1} + \ldots + \beta_1 z + \beta_0}{(z-1)(z-d_1)\ldots(z-d_{n-1})}$ — дискретная передаточная функция НЧ, $Z\{\ldots\}$ — символ Z-преобразования, $d_i = \exp(-T/T_i)$.

Из соображений грубости системы и простоты $D(z)$ примем

$$G_{m-1}(z) = KR_{n-1}(z)F_{m-n}(z), \qquad KR_{n-1}(z) = \sum_{i=0}^{n-1}\beta_i z^i, \tag{2}$$

где

$$F_{m-n}(z) = \sum_{i=0}^{m-n} f_i z^i, \qquad F_{m-n}(1) = \sum_{i=0}^{m-n} f_i = 1/\sum_{i=0}^{n-1}\beta_i. \tag{3}$$

Передаточная функция ДКУ при этом имеет вид:

$$D(z) = \frac{F_{m-n}(z)\cdot Q_n(z)}{z^m - G_{m-1}(z)} = \frac{Q_{m-1}(z)}{S_{m-1}(z)}, \qquad Q_{m-1}(z) = F_{m-n}(z)Q_{n-1}(z), \tag{4}$$

где $Q_{n-1} = Q_n(z)/(z-1) = (z-d_1)\cdots(z-d_{n-1})$, $S_{m-1}(z) = (z^m - G_{m-1}(z))\big/(z-1) = s_{m-1}z^{m-1} +$ $+ s_{m-2}z^{m-2} + \ldots + s_1 z + s_0$, $s_0 = g_0$, $s_1 = g_1 + s_0$, $s_2 = g_2 + s_1, \cdots, s_{m-1} = g_{m-1} + s_{m-2} = 1$.

Индексы в обозначениях Q_n, Q_{n-1}, Q_{m-1} представляют собой степени соответствующих полиномов. Степени числителя и знаменателя $D(z)$ равны $m-1$, что не противоречит физической реализуемости. По сравнению с рассмотренным в [1] случаем порядок $D(z)$ возрос на ($m-n$) единиц. Как и в [1], все полюсы $W_{\text{НЧ}}(z)$, кроме единичного, компенсируются, а все нули сохраняются.

Передаточная функция разомкнутой скорректированной системы имеет вид:

$$W_{\text{ЦСС}}(z) = \frac{1}{z-1}W_{\text{ЦСС}1}(z), \qquad W_{\text{ЦСС}1}(z) = \frac{G_{m-1}(z)}{S_{m-1}(z)}. \tag{5}$$

Несложно показать, что:

$$S_{m-1}(1) = \sum_{i=1}^{m} i g_{m-i}, \qquad W_{\text{ЦСС}1}(z) = \frac{G_{m-1}(1)}{S_{m-1}(1)} = 1/\sum_{i=1}^{m} i g_{m-i}. \tag{6}$$

Для получения выражения коэффициентов g_i полинома $G_{m-1}(z)$ ($G_{m-1}(z) =$ $= KR_{n-1}(z)F_{m-n}(z)$) умножим в столбик полиномы $KR_{n-1}(z)$ и $F_{m-n}(z)$ и положим $z=1$. Учитывая коэффициенты суммы $S_{m-1}(1)$, сгруппируем слагаемые с одинаковыми коэффициентами β_i. В частном случае $n=3$, $m=6$, $m-n=3$ с учетом формулы (1) получаем:

$$\begin{aligned} S_{m-1}(1) &= \beta_2(f_3 + 2f_2 + 3f_1 + 4f_0) + \beta_1(2f_3 + 3f_2 + 4f_1 + 5f_0) + \\ &+ \beta_0(3f_3 + 4f_2 + 5f_1 + 6f_0) = \beta_2(f_3 + f_2 + f_1 + f_0) + \beta_2(f_2 + 2f_1 + 3f_0) + \\ &+ 2\beta_1(f_3 + f_2 + f_1 + f_0) + \beta_1(f_2 + 2f_1 + 3f_0) + 3\beta_0(f_3 + f_2 + f_1 + f_0) + \\ &+ \beta_0(f_2 + 2f_1 + 3f_0) = \left[\sum_{i=0}^{n-1}(i+1)\beta_{n-1-i}\right]\sum_{i=0}^{n-m} f_i + \sum_{i=0}^{n-1}\beta_i\left[\sum_{i=0}^{m-n-1}(i+1)f_{m-n-1-i}\right]. \end{aligned} \tag{7}$$

Полученная для частного случая формула (7) справедлива и в общем случае. С учетом формулы (10) из [1] и (2)—(5) сумму $S_{m-1}(1)$ можно представить в виде:

$$S_{m-1}(1)=\sum_{i=0}^{n-1}(i+1)\beta_{n-1-i}\Big/\sum_{i=0}^{n-1}\beta_i+\sum_{i=0}^{n-1}\beta_i\sum_{i=0}^{m-n-1}(i+1)f_{m-n-1-i}=$$

$$=1/W_1(1)+\sum_{i=0}^{n-1}\beta_i\sum_{i=0}^{m-n-1}(i+1)f_{m-n-1-i}=1/W_{\text{ЦСС}1}(1),$$

где $W_1(1)=\sum_{i=0}^{n-1}\beta_i\Big/\sum_{i=0}^{n-1}(i+1)\beta_{n-1-i}$.

Очевидно, что $W_1(1)$ совпадает с выражением $W_{\text{ЦСС}1}(1)$ [1, формула (10)] для исходной ЦСС со временем затухания, равным порядку НЧ [1].

Из последней формулы непосредственно следует:

$$W_{\text{ЦСС}1}(1)=W_1(1)\Big/\Big(1+W_1(1)\sum_{i=0}^{n-1}\beta_i\sum_{i=0}^{m-n-1}(i+1)f_{m-n-1-i}\Big). \tag{8}$$

Из формулы (8) видна зависимость скоростной ошибки ЦСС

$$\theta_\text{к}=\frac{\Omega T}{W_{\text{ЦСС}1}(1)}=\frac{\Omega T}{W_1(1)}\left[1+W_1(1)\sum_{i=0}^{n-1}\beta_i\sum_{i=0}^{m-n-1}(i+1)f_{m-n-1-i}\right] \tag{9}$$

от выбора коэффициентов полинома $F_{n-m}(3)$. В случае

$$\sum_{i=0}^{m-n-1}(i+1)f_{m-n-1-i}>0 \tag{10}$$

скоростная ошибка при увеличенном времени затухания свободного процесса больше, чем при минимальном времени затухания.

В простейшем случае при

$$f_i=\text{const}=1\Big/\Big[(m-n+1)\sum_{j=0}^{n-1}\beta_j\Big]=f \tag{11}$$

получаем

$$W_{\text{ЦСС}1}(1)=W_1(1)/[1+0,5(m-n)W_1(1)]. \tag{12}$$

Согласно (10) получаем скоростную ошибку

$$\theta_\text{к}=\frac{\Omega T}{W_{\text{ЦСС}1}(1)}=\frac{\Omega T}{W_1(1)}[1+0,5(m-n)W_1(1)]=\theta'_\text{к}\,[1+0,5(m-n)W_1(1)], \tag{13}$$

где $\theta'_\text{к}=\dfrac{\Omega T}{W_1(1)}$ совпадает со значением ошибки исходной системы, имеющей длительность свободного процесса nT.

Пример. Для уменьшения необходимых управляющих воздействий в рассмотренном в примере [1] увеличим время полного затухания свободного процесса с nT=3T до mT=6T.

Используя рассчитанные в [1] значения β_i, $i=2,\ 1,\ 0$, получаем $f=1/(m-n+1)/\sum_{i=0}^{n-1}\beta_i=$ $=1/4/7,2529\cdot10^{-6}=3,4469\cdot10^{4}$ и определяем коэффициенты g_i и s_i:

$$g_5=\beta_2 f_3=\beta_2 f=4,3241\cdot10^{-2},\ \ g_4=\beta_1 f_3+\beta_2 f_2=(\beta_1+\beta_2)f=0,209889,$$

$$g_3=\beta_0 f_3+\beta_1 f_2+\beta_2 f_1==(\beta_0+\beta_1+\beta_2)f=0,25,\ \ g_2=\beta_0 f_2+\beta_1 f_1+\beta_2 f_0=(\beta_0+\beta_1+\beta_2)f=0,25,$$

$$g_1=\beta_0 f_1+\beta_1 f_0=(\beta_0+\beta_1)f=0,20676,\ \ g_0=\beta_0 f_0=\beta_0 f=4,0115\cdot10^{-2},$$

$$s_0 = g_0 = 4,3241 \cdot 10^{-2},\ \ s_1 = s_0 + g_1 = 0,24687,\ \ s_2 = s_1 + g_2 = 0,49687,$$
$$s_3 = s_2 + g_3 = 0,77687,\ \ s_4 = s_3 + g_4 = 0,95676,\ \ s_5 = 1.$$

Вычисляя коэффициенты полинома числителя $D(z)$, получаем

$$Q_{m-1}(z) = F_{m-n}(z)Q_n(z) = f(z^3 + z^2 + z + 1)(z^2 + \alpha_1 z + \alpha_0) = \sum_{i=0}^{5} q_i\ ,$$

где $q_5 = f = 3,4469 \cdot 10^4$, $q_4 = f(1+\alpha_1) = -2,9567 \cdot 10^4$, $q_3 = q_2 = f(1+\alpha_1+\alpha_0) = 1,0030 \cdot 10^2$, $q_1 = f(\alpha_1+\alpha_0) = -3,4369 \cdot 10^4$, $q_0 = f\alpha_0 = 2,9668 \cdot 10^4$.

На рис. 1 представлена цифровая модель линеаризованной ЦСС с увеличенным временем затухания свободного процесса, построенная в системе MatLab 6.5 Simulink 5 и позволяющая исследовать ЦСС при линейно возрастающем воздействии и при скачке задающего воздействия.

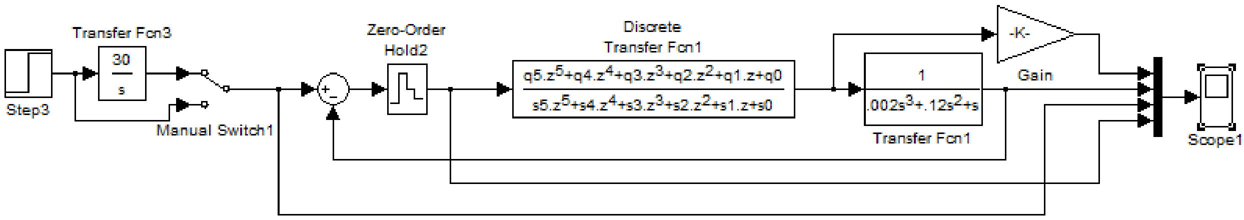

Рис. 1

На рис. 2 и 3 представлены результаты моделирования процессов отработки линейно возрастающего воздействия и скачка задающего воздействия соответственно.

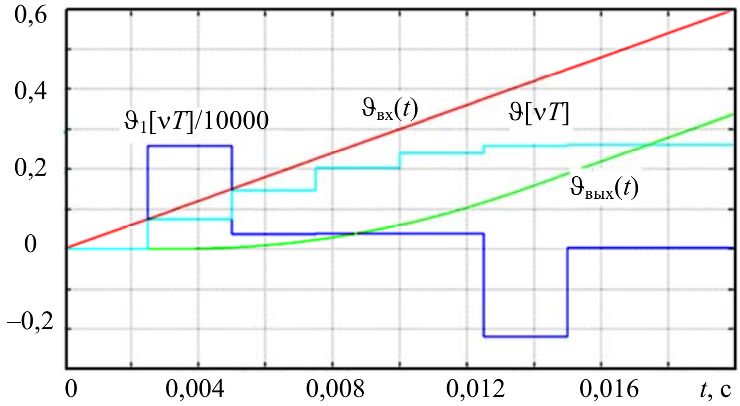

Рис. 2

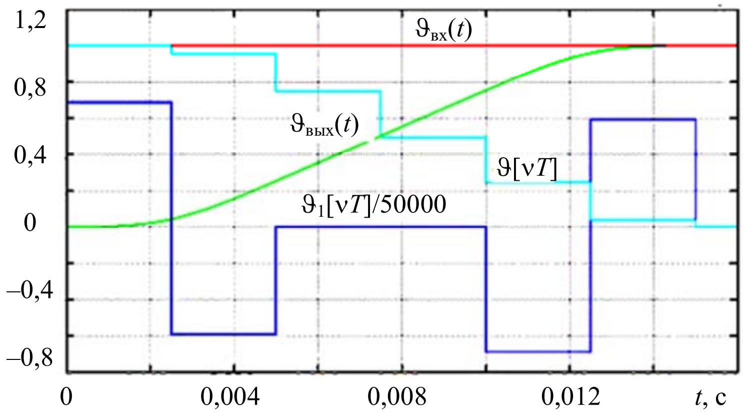

Рис. 3

Из рис. 2 видно, что установившийся режим слежения с постоянной скоростью наступает через за шесть периодов дискретности. Скоростная ошибка, определенная в результате моделирования, составляет $\theta_к = 0,2615^о$. Расчетная величина $\theta_к$ определяется по формуле (13) с учетом вычисленного по формуле (22) [1] значения $W_1(1) = 0,50633$:

$$\theta_к = \theta'_к\,[1 + 0,5(m-n)W_1(1)] = 0,1481 \cdot [1 + 0,5(6-3)0,50633] = 0,2621^о$$

хорошо согласуется с результатом моделирования.

Эффект уменьшения управляющего воздействия при увеличении времени затухания свободного процесса можно оценить, сравнив максимумы модуля θ_1. Так, при отработке скачка задающего воздействия получаем из [1, рис. 4] и рис. 1 $\max\left|\theta_1[\nu T]\right|$ соответственно $2{,}6 \cdot 10^5$ и $3{,}5 \cdot 10^4$. При отработке линейно возрастающего воздействия из [1, рис. 3] и рис. 2 соответственно получаем $1{,}1 \cdot 10^4$ и $2{,}6 \cdot 10^3$.

Полагая, что при отработке скачка задающего воздействия $\max\left|\theta_1[\nu T]\right|$ соответствует ν=0, снизить управляющее воздействие при увеличении времени полного затухания свободного процесса можно следующим образом. Используя передаточную функцию

$$\Phi_{\theta_1}(z) = \frac{\Theta_1(z)}{\Theta(z)} = (1 - \Phi(z))D(z)$$

и Z-преобразование единичного скачка задающего воздействия $z/(z-1)$, получаем

$$\Theta_1(z) = (1 - \Phi(z))D(z)z/(z-1), \;\; \theta_1[0] = \lim_{z\to\infty} \Theta_1(z) = \lim_{z\to\infty} (1 - \Phi(z))D(z)z/(z-1) = D(\infty).$$

Для исходной системы согласно формуле (16) [2] получаем при K=1 с$^{-1}$

$$D(\infty) = D_n(\infty) = 1\Big/\sum_{i=0}^{n-1} \beta_i\,,$$

а для системы с увеличенным временем затухания свободного процесса по формуле (4) с учетом s_{m-1}=1, $q_{m-1} = f_{m-n}$ получаем:

$$D(\infty) = D_m(\infty) = q_{m-1}/s_{m-1} = f_{m-n}. \quad (14)$$

При условии (11) выражение (14) принимает вид

$$D_m(\infty) = f_{m-n} = f = 1\Big/\left[(m-n+1)\sum_{i=0}^{n-1} \beta_i\right] = D_n(\infty)/(m-n+1). \quad (15)$$

В рассмотренных примерах n=3, m=6, $D_m(\infty) = D_n(\infty)/4$. Моделирование, представленное в [1, рис. 4] и на рис. 3, подтверждает полученный результат и показывает пессимистичность оценки. В действительности $\max\left|\theta_1[\nu T]\right|$ уменьшился не в 4, а в $2{,}6 \cdot 10^5 / 3{,}5 \cdot 10^4 \approx 7{,}4$ раза.

Сохранение скоростной ошибки неизменной. Увеличение скоростной ошибки при простейшем выборе коэффициентов полинома $F_{m-n}(z) = \sum_{i=1}^{m-n} f_i z^i$, определяемом выражением (11), требует усложнить выбор значений коэффициентов f_i i=0, 1,…, n–m. Для сохранения скоростной ошибки неизменной необходимо согласно формуле (9) выполнить условие

$$\sum_{i=0}^{m-n-1} (i+1) f_{m-n-1-i} = 0. \quad (16)$$

Для рассмотренного примера (n=3, m=6) это условие принимает вид

$$\varphi_2 = f_2 + 2f_1 + 3f_0 = 0. \quad (17)$$

Кроме этого, необходимо выполнить условие (3), принимающее в рассматриваемом случае вид

$$\varphi_1 = f_3 + f_2 + f_1 + f_0 = 1/(\beta_2 + \beta_1 + \beta_0). \quad (18)$$

Для выбора наилучших значений f_i необходим критерий оптимальности. Таковым по смыслу решаемой задачи может быть минимум квадратичной функции

$$V = \sum_{i=0}^{m-1} g_i^2, \tag{19}$$

где g_i — коэффициенты полинома $G_{m-1}(z)$ (2).

Выбор критерия основан на известном факте [2]: коэффициенты g_i представляют собой приращения переходной характеристики на интервалах дискретности.

В рассматриваемом примере (m=6, n=3):

$$\begin{aligned} G_5(z) &= (\beta_2 z^2 + \beta_1 z + \beta_0)(f_3 z^3 + f_2 z^2 + f_1 z + f_0) = \\ &= g_5 z^5 + g_4 z^4 + g_3 z^3 + g_2 z^2 + g_1 z + g_0, \end{aligned} \tag{20}$$

где $g_5 = \beta_2 f_3$, $g_4 = \beta_2 f_2 + \beta_1 f_3$, $g_3 = \beta_2 f_1 + \beta_1 f_2 + \beta_0 f_3$, $g_2 = \beta_2 f_0 + \beta_1 f_1 + \beta_0 f_2$, $g_1 = \beta_1 f_0 + \beta_0 f_1$, $g_0 = \beta_0 f_0$.

Таким образом, оптимальные значения f_i, i=0, 1, 2, 3, удовлетворяют условиям (17) и (18) и обеспечивают минимум квадратичной функции (20). Для их определения необходимо решить задачу поиска условного экстремума. Воспользовавшись методом множителей Лагранжа, исследуем на экстремум функцию

$$\Phi(f_0, f_1, f_2, f_3) = V(f_0, f_1, f_2, f_3) + \lambda_1 \varphi_1(f_0, f_1, f_2, f_3) + \lambda_2 \varphi_2(f_0, f_1, f_2, f_3).$$

Совместно с уравнениями (17), (18) получаем систему из шести линейных уравнений относительно f_0—f_3, λ_1, λ_2:

$$\begin{cases} \varphi_1 = f_3 + f_2 + f_1 + f_0 + 0 \cdot \lambda_1 + 0 \cdot \lambda_2 = 1/(\beta_2 + \beta_1 + \beta_0), \\ \varphi_2 = 0 \cdot f_3 + f_2 + 2 \cdot f_1 + f_0 + 0 \cdot \lambda_1 + 0 \cdot \lambda_2 = 0, \\ \dfrac{\delta\Phi}{\delta f_3} = \alpha_3 f_3 + \alpha_2 f_2 + \alpha_1 f_1 + 0 \cdot f_0 + \lambda_1 + 0 \cdot \lambda_2 = 0, \\ \dfrac{\delta\Phi}{\delta f_2} = \alpha_2 f_3 + \alpha_3 f_2 + \alpha_2 f_1 + \alpha_1 f_0 + \lambda_1 + \lambda_2 = 0, \\ \dfrac{\delta\Phi}{\delta f_1} = \alpha_1 f_3 + \alpha_2 f_2 + \alpha_3 f_1 + \alpha_4 f_0 + \lambda_1 + 2 \cdot \lambda_2 = 0, \\ \dfrac{\delta\Phi}{\delta f_0} = 0 \cdot f_3 + \alpha_1 f_2 + \alpha_2 f_1 + \alpha_3 f_0 + \lambda_1 + 3 \cdot \lambda_2 = 0, \end{cases} \tag{21}$$

где $\alpha_3 = \beta_2^2 + \beta_1^2 + \beta_0^2$, $\alpha_2 = \beta_2\beta_1 + \beta_1\beta_0$, $\alpha_1 = \beta_2\beta_0$, $\alpha_4 = \beta_1\beta_0$.

Решив систему линейных уравнений (21), вычисляем коэффициенты передаточной функции ДКУ $D(z)$ (4):

$$\begin{aligned} Q_{m-1}(z) &= F_{m-n}(z) Q_{n-1}(z)\big|_{m=6,\ n=3} = (f_3 z^3 + f_2 z^2 + f_1 z + f_0)(z^2 + \alpha_1 z + \alpha_0) = \\ &= q_5 z^5 + q_4 z^4 + q_3 z^3 + q_2 z^2 + q_1 z + q_0, \end{aligned} \tag{22}$$

где

$q_5 = f_3$, $q_4 = f_2 + a_1 f_3$, $q_3 = f_1 + a_1 f_2 + a_0 f_3$, $q_2 = f_0 + a_1 f_1 + a_0 f_2$, $q_1 = a_1 f_0 + a_0 f_1$, $q_0 = a_0 f_0$,

$$S_{m-1}(z) = s_5 z^5 + s_4 z^4 + s_3 z^3 + s_2 z^2 + s_1 z + s_0, \tag{23}$$

$$s_0 = g_0,\ s_1 = g_1 + s_0,\ s_2 = g_2 + s_1,\ s_3 = g_3 + s_2,\ s_4 = g_4 + s_3,\ s_5 = 1.$$

В результате вычислений получена передаточная функция ДКУ ЦСС

$$D(z) = \frac{(11{,}682z^5 - 19{,}792z^4 + 8{,}9982z^3 - 5{,}2881z^2 + 6{,}4190z - 1{,}9794) \cdot 10^4}{z^5 + 0{,}85344z^4 + 0{,}26469z^3 + 0{,}0050477z^2 - 0{,}10892z - 0{,}026764}. \quad (24)$$

На рис. 4 представлен процесс отработки линейно возрастающего воздействия ($\Omega = 30° / \text{с}$) рассматриваемой в примере ЦСС при рассчитанном ДКУ (24). Сравнение с аналогичным процессом в ЦСС при минимальном времени переходного процесса [1, рис. 3] показывает сохранение неизменной скоростной ошибки и уменьшение $\max|\theta_1[\nu T]|$ примерно в $2{,}1 / 1{,}7 = 1{,}24$ раза.

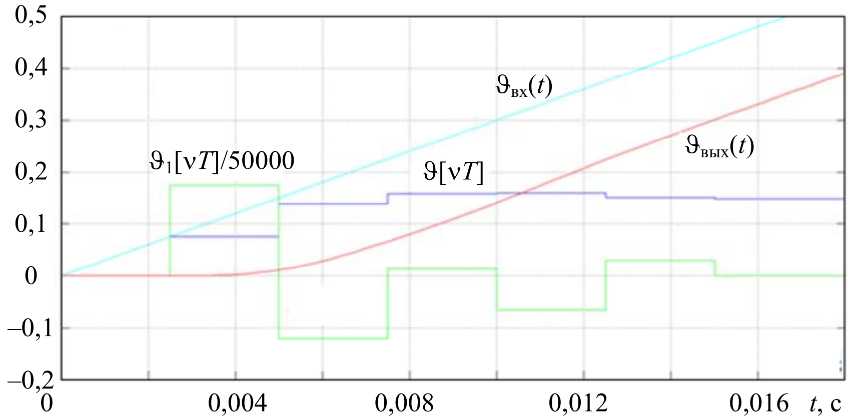

Рис. 4

Результаты моделирования процесса отработки единичного скачка представлены на рис. 5.

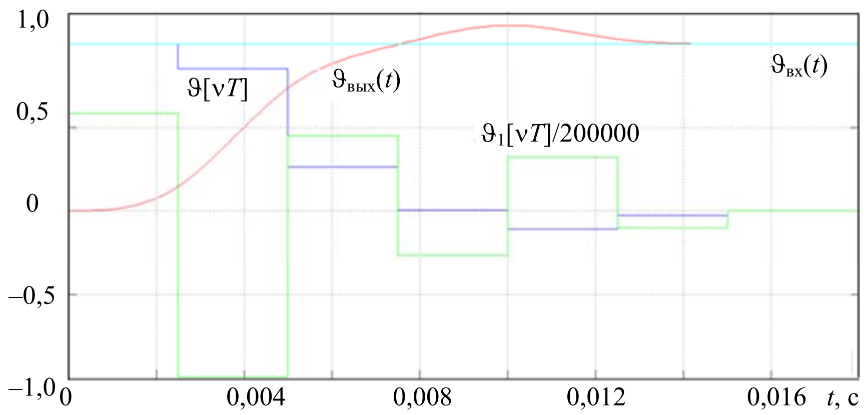

Рис. 5

Сравнение с аналогичным процессом в ЦСС с минимальным временем переходного процесса [1, рис. 4] показывает уменьшение $\max|\theta_1[\nu T]|$ примерно в $1{,}3 / 1 = 1{,}3$ раза. При этом появляется небольшое перерегулирование порядка 10 %.

Выводы

1. При высокой частоте дискретизации время полного затухания свободного процесса оказывается очень малым. Это требует больших управляющих воздействий и сужает линейную зону системы.

2. Увеличение времени полного затухания свободного процесса сверх минимального позволяет уменьшить величину управляющего воздействия, но повышает порядок дискретного корректирующего устройства и при простейшем способе его выбора увеличивает скоростную ошибку.

3. При более сложном способе выбора дискретного корректирующего устройства удается избежать увеличения скоростной ошибки, но уменьшение управляющего воздействия существенно снижается и появляется небольшое перерегулирование. Выбор другого критерия

оптимальности при определении коэффициентов f_j теоретически может улучшить свойства системы.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *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.
2. *Коршунов А. И.* Цифровая следящая система с конечным временем затухания свободного процесса // Изв. вузов. Приборостроение. 2019. Т. 62, № 12. С. 1078—1086.
3. *Изерман Р.* Цифровые системы управления. М.: Мир, 1984. 541 с.
4. *Джури Э.* Импульсные системы автоматического регулирования. М.: Физматгиз, 1963. 567 с.
5. *Шипилло В. П.* Операторно-рекуррентный метод расчета электрических цепей и систем. М.: Энергоатомиздат, 1991. 311 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. II. Время переходного процесса, большее минимального // Изв. вузов. Приборостроение. 2020. Т. 63, № 9. С. 794—802.

CALCULATION OF A DIGITAL TRACKING SYSTEM WITH A FINITE DECAY TIME OF A FREE PROCESS. PART II. TRANSITION TIME EXCEEDING MINIMUM

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

Two methods for selecting the transfer function of a discrete correction filter are considered. With a simpler method, the control effect is significantly reduced, but the speed error increases. A more complex method of correction filter selection enables the speed error retention, as in the case of minimum damping time of the free process, but with a less significant reduction in the control effect and a small overshoot when working out the jump. An example of digital tracking system calculating is given. Numerical simulation of the calculated CSR in the MatLab system is performed for linearly increasing and stepwise reference signals. The simulation data are reported to coincide with the calculated results.

Keywords: digital tracking system, free process decay, transition time exceeding minimum

REFERENCES

1. Konovalov A.M., Korshunov A.I. *Journal of Instrument Engineering*, 2020, no. 9(63), pp. 786–793. (in Russ.)
2. Korshunov A.I. *Journal of Instrument Engineering*, 2019, no. 12(62), pp. 1078–1086. (in Russ.)
3. Isermann R. *Digital control systems*, Berlin etc., 1981.
4. Jury E.J. *Sampled-data control systems*, NY, Wiley, London, Chapmen and Hall, 1958.
5. Shipillo V.P. *Operatorno-rekurrentnyy metod rascheta elektricheskikh tsepey i sistem* (Operator-Recurrence Method for Calculating Electrical Circuits and Systems), Moscow, 1991, 311 p. (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 II. Transition time exceeding minimum. *Journal of Instrument Engineering*. 2020. Vol. 63, N 9. P. 794—802 (in Russian).

DOI: 10.17586/0021-3454-2020-63-9-794-802