

УДК 681.5.015.24

UDC 681.5.015.24

05.00.00 Технические науки

Technical sciences

**ОПТИМИЗАЦИЯ ЦИФРОВЫХ СИСТЕМ
УПРАВЛЕНИЯ ПРОЦЕССОМ СУШКИ ЗЕРНА**

OPTIMIZATION OF DIGITAL CONTROL SYSTEM OF THE PROCESS OF GRAIN DRYING

Берестин Николай Константинович
аспирант

Berestin Nikolay Konstantinovich
postgraduate

Пугачев Василий Иванович
к.т.н., доцент

Pugachev Vasilii Ivanovich
Cand.Tech.Sci., assistant professor.

Пиотровский Дмитрий Леонидович
д.т.н., профессор, заведующий кафедрой автоматизации производственных процессов
ФГБОУ ВПО «Кубанский государственный технологический университет», Краснодар, Россия

Piotrovskiy Dmitriy Leonidovich
Dr.Sci.Tech., professor
Kuban State Technological University, Krasnodar, Russia

В статье производится исследование цифровой непрерывной системы и оптимизация цифровой систем управления. Показывается, что эталоном при синтезе цифровой системы должна служить непрерывная система, поэтому, сначала нужно создать желаемую непрерывную систему, а затем пытаться приблизить к ней цифровую систему

The article is a study of digital continuous system and optimization of digital control systems. It is shown that the standard in the synthesis of digital systems should provide a continuous system, so first we need to create the desired continuous system and then we could try to get the digital system closer to it

Ключевые слова: АНАЛИЗ, ПЕРЕДАТОЧНАЯ ФУНКЦИЯ, СИНТЕЗ, НЕПРЕРЫВНАЯ СИСТЕМА, СЕРВОМОТОР, ОПТИМИЗАЦИЯ

Keywords: ANALYSIS, TRANSFER FUNCTION, SYNTHESIS, CONTINUOUS SYSTEM, SERVO-MOTOR, OPTIMIZATION

При анализе цифровых систем управления их представляют в виде трех элементов: цифрового фильтра (регулятора), фиксатора и приведенной непрерывной части.

Так как в системе имеет место фиксатор нулевого порядка с передаточной функцией вида:

$$K_{\phi}(p) = \frac{1}{p} (1 - e^{-pT}),$$

то с учетом того, что $z = e^{pT}$, эту функцию можно записать в следующем далее виде:

$$K_{\phi}(p, z) = \frac{1 - z^{-1}}{p}.$$

Сомножитель $1/p$ относят к линейной части, поэтому передаточная функция приведенной непрерывной части может быть записана в следующем виде:

$$W_{\text{п.н.ч.}}(p) = \frac{1}{p} W_0(p)(1 - e^{-pT}).$$

Так как

$$L^{-1}\left\{\frac{W_0(p)}{p}\right\} = h(t),$$

есть переходная функция линейной части системы, то z – передаточную функцию линейной части находим по следующему выражению:

$$W_{\text{п.н.ч.}}(z) = \frac{z-1}{z} \cdot Z\{h[n]\}.$$

Сложность исследования цифровых систем заключается в том, что коэффициенты передаточных функций зависят от периода квантования, метода получения передаточной функции.

Поскольку в непрерывной системе регулируемая величина измеряется непрерывно, управляющее воздействие изменяется непрерывно, то такая система должна быть эталоном для цифровой системы, в которой процессы протекают дискретно и в промежутках между измерениями регулируемая величина и управляющее воздействие остаются постоянными.

Задача синтеза цифровой системы – приблизить максимально свойства цифровой и непрерывной систем. Вместе с тем цифровые устройства позволяют реализовать более сложные законы управления и, возможно, улучшить качество управления по сравнению с непрерывными системами.

Так в [1] рекомендуется использовать ПДД – закон управления, обеспечивающий астатизм системы управления за счет сервомотора, а управляющее устройство легко реализует двойное дифференцирование в цифровой системе.

Проведём оптимизацию ПИД – регулятора без учета сервомотора.

$$\alpha = 0.5, \quad \psi = 0.99, \quad m = \frac{-\ln(1 - \psi)}{2 \cdot \pi}, \quad m = 0.733$$

$$W_o(p) = 1.5 \cdot \frac{e^{(-10) \cdot p}}{664.7 \cdot p^3 + 272.2 \cdot p^2 + 30.3 \cdot p + 1}, \quad W_c(p) = \frac{1}{20 \cdot p}$$

$$W_{oc}(p) = W_o(p) \cdot W_c(p)$$

$$W_{oc}(p) = .7500e-1 \cdot \frac{e^{(-10) \cdot p}}{(664.7 \cdot p^3 + 272.2 \cdot p^2 + 30.3 \cdot p + 1) \cdot p}$$

$$W_{ob}(p) = \frac{1}{W_o(p)}$$

$$W_{ob}(p) = 443.1 \cdot e^{10 \cdot p} \cdot p^3 + 181.5 \cdot e^{10 \cdot p} \cdot p^2 + 20.20 \cdot e^{10 \cdot p} \cdot p + .6667 \cdot e^{10 \cdot p}$$

$$W_{ob}(i, w) = 443.1 \cdot e^{10 \cdot (i - .731) \cdot w} \cdot (i - .731)^3 \cdot w^3 + 181.5 \cdot e^{10 \cdot (i - .731) \cdot w} \cdot (i - .731)^2 \cdot w^2 + 20.2 \cdot e^{10 \cdot (i - .731) \cdot w} \cdot (i - .731) \cdot w + .6667 \cdot e^{10 \cdot (i - .731) \cdot w}$$

$$\alpha = 0.15$$

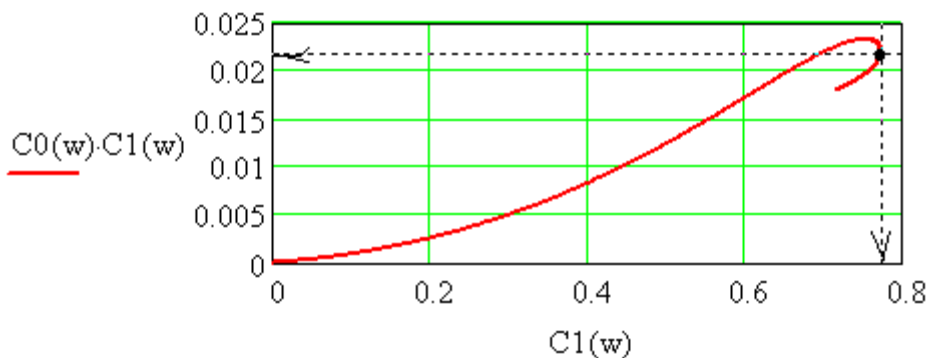


Рисунок 1 - график линии требуемой относительной степени затухания $\psi = 0,99$

Оптимальные значения параметров управляющего устройства:

$$K_p = 0.77, \quad T_i = \frac{K_p}{0.022}, \quad T_i = 35.0, \quad T_d = T_i \cdot \alpha, \quad T_d = 5.25.$$

Проведём расчет переходной функции замкнутой системы с оптимальными значениями параметров ПИД - управляющего устройства:

$$W_{pid}(p) = K_p + T_d \cdot p + \frac{1}{T_i \cdot p}, \quad W_{pid}(p) = .77 + 5.25 \cdot p + \frac{.2857e-1}{p}.$$

$$W_{zpid}(p) = \frac{W_o(p) \cdot W_{pid}(p)}{1 + W_o(p) \cdot W_{pid}(p)}.$$

$$W_{zpid}(p) = \frac{e^{(-10.) \cdot p} \cdot [3. \cdot (.7700e5 \cdot p + .5250e6 \cdot p^2 + 2857.)]}{F20(p) + F21(p)}$$

где:

$$F20(p) = .1329e9 \cdot p^4 + .5444e8 \cdot p^3 + .6060e7 \cdot p^2 + .2000e6 \cdot p,$$

$$F21(p) := .2310e6 \cdot e^{(-10.) \cdot p} \cdot p + .1575e7 \cdot e^{(-10.) \cdot p} \cdot p^2 + 8571. \cdot e^{(-10.) \cdot p}$$

$$W_{zpid}(i, w) := \frac{(.23100e6 \cdot i \cdot w + .15750e7 \cdot i^2 \cdot w^2 + 8571.) \cdot e^{(-10.) \cdot iw}}{FF1(i, w) + FF2(i, w)},$$

где:

$$FF1(i, w) = .1329e9 \cdot i^4 \cdot w^4 + .5444e8 \cdot i^3 \cdot w^3 + .6060e7 \cdot i^2 \cdot w^2 + .2000e6 \cdot i \cdot w,$$

$$FF2(i, w) = .2310e6 \cdot e^{(-10.) \cdot iw} \cdot i \cdot w + .1575e7 \cdot e^{(-10.) \cdot iw} \cdot i^2 \cdot w^2 + 8571. \cdot e^{(-10.) \cdot iw}.$$

$$H_{zpid}(t) = \frac{2}{\pi} \cdot \int_0^1 \frac{\text{Re}(W_{zpid}(i, w)) \cdot \sin(w \cdot t)}{w} dw$$

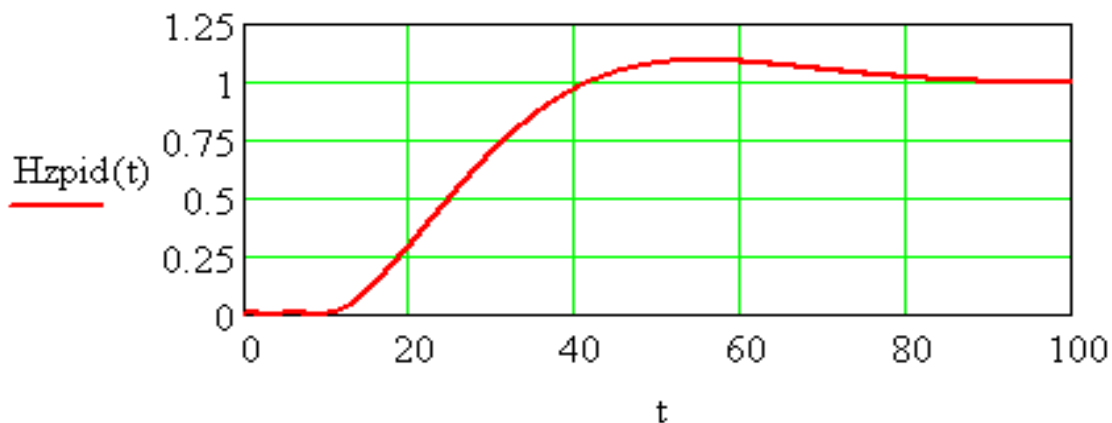


Рисунок 2 - график переходной функции замкнутой системы с оптимальными значениями параметров ПИД - управляющего устройства

Найдем параметры ПДД – закона управления, который реализует ПИД – закон совместно с сервомотором.

$$W_{pid}(p) = .77 + 5.25 \cdot p + \frac{.2857e-1}{p},$$

$$.77 + 5.25 \cdot p + \frac{.2857e-1}{p} = \frac{.7700 \cdot p + 5.250 \cdot p^2 + .2857e-1}{p}$$

$$W_{pdd}(p) = K_{pdd} + T_p \cdot p + T_{dd} \cdot p^2$$

$$W_{pid}(p) = W_{pdd}(p) \cdot W_c(p)$$

$$W_{pdd}(p) \cdot W_c(p) = .5000e-1 \cdot \frac{K_{pdd} + T_p \cdot p + T_{dd} \cdot p^2}{p}$$

$$\frac{.7700 \cdot p + 5.250 \cdot p^2 + .2857e-1}{p} = .5000e-1 \cdot \frac{K_{pdd} + T_p \cdot p + T_{dd} \cdot p^2}{p}$$

$$K_{pdd} = \frac{.2857e-1}{.5000e-1}, \quad T_p = \frac{.7700}{.5000e-1}, \quad T_{dd} = \frac{5.250}{.5000e-1}$$

$$W_{pdd}(p) = .5714 + 15.40 \cdot p + 105.0 \cdot p^2.$$

Проведём расчет переходной функции замкнутой системы с оптимальными значениями параметров ПДД - управляющего устройства:

$$W_{zpdd}(p) = \frac{W_{oc}(p) \cdot W_{pdd}(p)}{1 + W_{oc}(p) \cdot W_{pdd}(p)}.$$

$$W_{zpdd}(p) = \frac{e^{(-10.)p} \cdot [3. \cdot (.7700e5 \cdot p + .5250e6 \cdot p^2 + 2857.)]}{F23(p) + F24(p)},$$

где:

$$F23(p) = .1329e9 \cdot p^4 + .5444e8 \cdot p^3 + .6060e7 \cdot p^2 + .2000e6 \cdot p,$$

$$F24(p) = .2310e6 \cdot e^{(-10.)p} \cdot p + .1575e7 \cdot e^{(-10.)p} \cdot p^2 + 8571. \cdot e^{(-10.)p}.$$

$$W_{zpdd}(i, w) = e^{(-10.)iw} \cdot \frac{.23100e6 \cdot i \cdot w + .15750e7 \cdot i^2 \cdot w^2 + 8571.}{F25(i, w) + F26(i, w)},$$

где:

$$F25(i, w) = .1329e9 \cdot i^4 \cdot w^4 + .5444e8 \cdot i^3 \cdot w^3 + .6060e7 \cdot i^2 \cdot w^2 + .2000e6 \cdot i \cdot w,$$

$$F26(i, w) = .2310e6 \cdot e^{(-10.)iw} \cdot i \cdot w + .1575e7 \cdot e^{(-10.)iw} \cdot i^2 \cdot w^2 + 8571. \cdot e^{(-10.)iw}.$$

$$H_{zpdd}(t) = \frac{2}{\pi} \cdot \int_0^1 \frac{\text{Re}(W_{zpdd}(i, w)) \cdot \sin(w \cdot t)}{w} dw$$

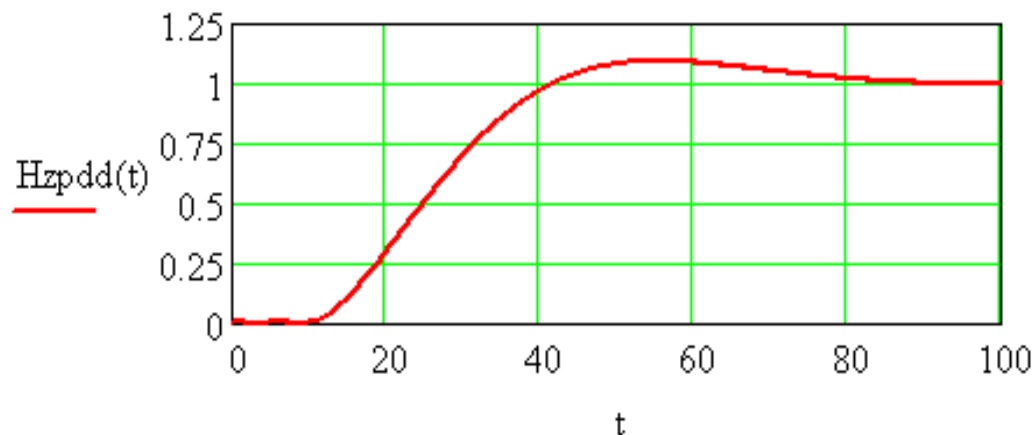


Рисунок 3 - график переходной функции замкнутой системы с оптимальными значениями параметров ПДД - управляющего устройства

Динамический заброс составляет 9 процентов.

$$W_{zp}(i, w) = \frac{e^{(-10 \cdot i) \cdot w} \cdot 147}{F1(i, w) + F2(i, w)}$$

$$F1(i, w) = .6647e7 \cdot w^4 \cdot i^4 + .2722e7 \cdot w^3 \cdot i^3 + .3030e6 \cdot w^2 \cdot i^2,$$

$$F2(i, w) = .1000e5 \cdot w \cdot i + 147 \cdot e^{(-10 \cdot i) \cdot w}$$

$$Hzp(t) = \frac{2}{\pi} \cdot \int_0^1 \frac{\text{Re}(W_{zp}(i, w)) \cdot \sin(w \cdot t)}{w} dw$$

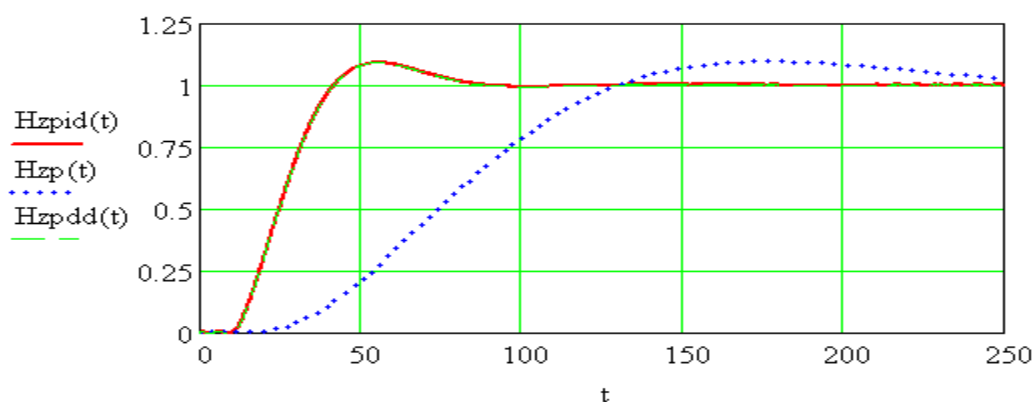


Рисунок 4 - сравнительные графики переходных функций замкнутых систем с ПИД, П и ПДД законами управления

Вывод очевиден, цифровой закон управления следует реализовать для ПДД – регулятора.

В непрерывном регуляторе реализовать вторую производную сложно, но в цифровом устройстве эта процедура легко реализуема.

Для проведения расчётов цифровой системы необходимо знать период квантования, обеспечивающий измерение непрерывной величины дискретным способом без потери информации. Для этого найдем частоту среза замкнутой системы с ПДД – регулятором.

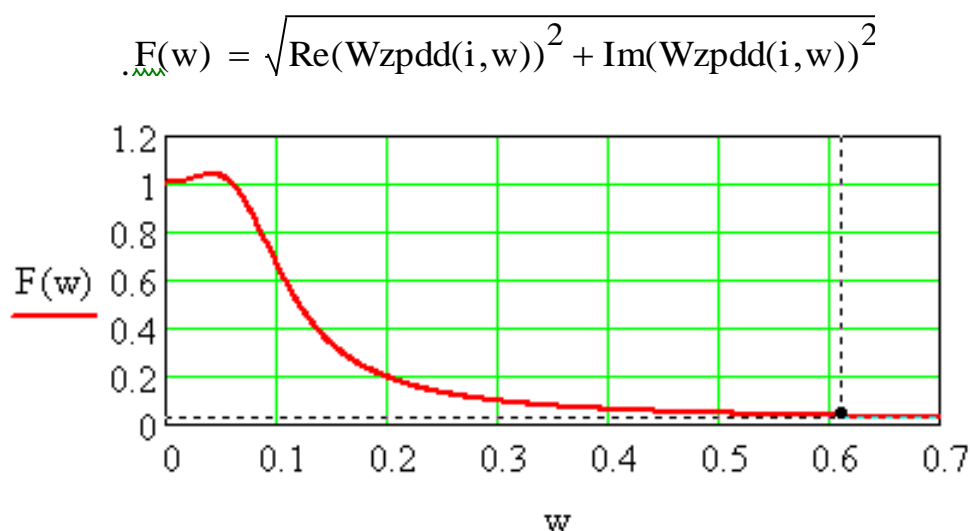


Рисунок 5 - график амплитудно-частотной характеристики замкнутой системы с ПДД – регулятором

Расчетный период квантования по теореме В. А. Котельникова:

$$W_{\text{сpdd}} = 0.61, \quad T_{\text{опdd}} = \frac{\pi}{W_{\text{сpdd}}}, \quad T_0 = 5.15.$$

Найдем дискретную передаточную функцию ПДД – регулятора.

Примем $T = 5$ с. $W_{\text{pdd}}(p) \rightarrow .5714 + 15.40 \cdot p + 105.0 \cdot p^2$

$$105.0 \cdot \frac{\varepsilon(n+2) - 2 \cdot \varepsilon(n+1) + \varepsilon(n)}{T^2} + 15.40 \cdot \left(\frac{\varepsilon(n+1) - \varepsilon(n)}{T} \right) + 5.714 \cdot \varepsilon(n) =$$

$$= 4.200 \cdot \varepsilon(n+2) - 5.320 \cdot \varepsilon(n+1) + 1.691 \cdot \varepsilon(n)$$

$$\left(4.200 \cdot z^2 - 5.320 \cdot z + 1.691 \right) \cdot \varepsilon(z) = u(z), \quad W_{pdd}(z) = \frac{u(z)}{\varepsilon(z)}$$

$$W_{pdd}(z) = 4.200 \cdot z^2 - 5.320 \cdot z + 1.691$$

Найдем дискретную передаточную функцию объекта управления совместно с сервомотором.

$$H_o(t) = 1.500 - .2962 \cdot e^{(-.2527)t} + 5.437 \cdot e^{(-.9244e-1)t} - 6.641 \cdot e^{(-.6442e-1)t}$$

$$H_o(n, T_o) = 1.500 - .2962 \cdot e^{(-.2527)nT_o} + 5.437 \cdot e^{(-.9244e-1)nT_o} - 6.641 \cdot e^{(-.6442e-1)nT_o}$$

$$H_o(z, T_o) = H_o(z, T_o) \cdot (1 - z^{-1}), \quad T_o = 5$$

$$H_o(z) = \frac{.29310e-1 \cdot z^2 + .70098e-1 \cdot z + .10456e-1}{z^3 - 1.6372 \cdot z^2 + .83931 \cdot z - .12902}$$

$$\lim_{z \rightarrow 1} H_o(z) \text{ float}, 3 \rightarrow 1.50$$

С учётом звена чистого запаздывания $W_{\tau}(z) = z^{-2}$

$$T_c = 20, \quad W_{oc}(z) = H_o(z) \cdot \frac{T_o \cdot z^{-3}}{T_c \cdot (1 - z^{-1})}$$

$$W_{oc}(z) = \frac{.7327500e-2 \cdot z^2 + .1752450e-1 \cdot z + .2614000e-2}{z^6 - 2.637200 \cdot z^5 + 2.476510 \cdot z^4 - .9683300 \cdot z^3 + .1290200 \cdot z^2}$$

Проведём расчет переходной функции цифровой замкнутой системы с ПДД – цифровым регулятором.

$$W_{zpdd}(z) = \frac{W_{oc}(z) \cdot W_{pdd}(z)}{1 + W_{oc}(z) \cdot W_{pdd}(z)}$$

$$W_{zpdd}(z) = \frac{.30776e-1 \cdot z^4 + .34621e-1 \cdot z^3 - .69861e-1 \cdot z^2 + .15727e-1 \cdot z + .44203e-2}{F27(z) + F28(z)}$$

где:

$$F27(z) = z^6 - 2.6372 \cdot z^5 + 2.5073 \cdot z^4 - .93371 \cdot z^3,$$

$$F28(z) = .59159e-1 \cdot z^2 + .15727e-1 \cdot z + .44203e-2 .$$

$$\lim_{z \rightarrow 1} Wzpd(z) \text{ float,3} \rightarrow 1.00$$

Проверим на устойчивость цифровую систему по критерию Джюри.[2].

Характеристическое уравнение замкнутой цифровой системы:

$$X(p) = z^6 - 2.6372 z^5 + 2.5073 z^4 - .93371 z^3 + .59159e-1 z^2 + .15727e-1 z + .44203e-2 = 0.$$

$$b = X(p) \left| \begin{array}{l} \text{simplify} \\ \text{coeffs, z} \rightarrow \\ \text{float, 5} \end{array} \right. \begin{pmatrix} .44203e-2 \\ .15727e-1 \\ .59159e-1 \\ -.93371 \\ 2.5073 \\ -2.6372 \\ 1. \end{pmatrix},$$

$$n = \text{length}(b) - 1, \quad \underline{A} = \left| \begin{array}{l} \text{for } i \in 0.. n \\ a_i \leftarrow b_{n-i} \\ a \end{array} \right. ,$$

$$A \text{ float, 6} \rightarrow \begin{pmatrix} 1. \\ -2.6372 \\ 2.5073 \\ -.93371 \\ .59159e-1 \\ .15727e-1 \\ .44203e-2 \end{pmatrix}, \quad V = \begin{pmatrix} 1 \\ z \\ z^2 \\ z^3 \\ z^4 \\ z^5 \\ z^6 \end{pmatrix}.$$

$$B(z) = V^T \cdot b, \quad \lim_{z \rightarrow 1} B(z) = .1570e-1$$

```

Q = | a ← A
    | for j ∈ 0.. n - 2
    |   | last ← n - j
    |   | for k ∈ 0.. last
    |   |   bk ← alast-k
    |   | op ← b
    |   | qj ←  $\frac{a_{last}}{a_0}$ 
    |   | for i ∈ 0.. (last - 1)
    |   |   ci ← ai - bi · qj
    |   | a ← c
    | Q ← q
    
```

$$\text{Koef} = \text{Q}, \quad \text{Koef} = \begin{pmatrix} 4.42 \times 10^{-3} \\ 0.027 \\ 0.12 \\ -0.691 \\ 0.947 \end{pmatrix}, \quad \text{Kpdd} = \begin{pmatrix} 4.42 \times 10^{-3} \\ 0.027 \\ 0.12 \\ -0.691 \\ 0.948 \end{pmatrix}.$$

Поскольку выполняются все условия устойчивости, т.е. замкнутая цифровая система устойчива, то можно попытаться построить переходную функцию замкнутой цифровой системы с использованием Mathcad..

$$\text{Hzpdd}(z) = \text{Wzpdd}(z) \cdot \frac{z}{z - 1}.$$

$$\begin{aligned}
 \text{Hzpdd}(n) = & (-.8320) \cdot e^{(-.1572)n} \cdot \sin(.2479 \cdot n) + \\
 & + .4821 \cdot e^{(-.5920)n} \cdot \cos(.5095e-17 \cdot n) + 1.000 \cdot e^{(-.1210e-16)n} \cdot \cos(.4441e-34 \cdot n) - \\
 & - 1.169 \cdot e^{(-.1572)n} \cdot \cos(.2479 \cdot n) - .2237e-1 \cdot e^{(-2.000)n} \cdot \sin(2.252 \cdot n) -
 \end{aligned}$$

$$-.9649e-1 \cdot e^{(-2.000)n} \cdot \cos(2.252 \cdot n) - .2164 \cdot e^{(-.5142)n} \cdot \cos(.6785e-17 \cdot n)$$

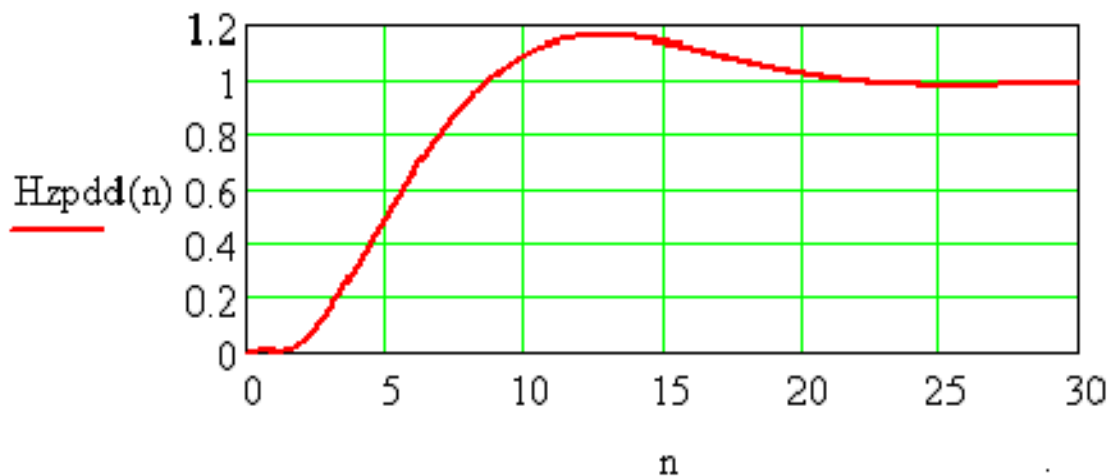


Рисунок 6 - график переходной функции замкнутой цифровой системы

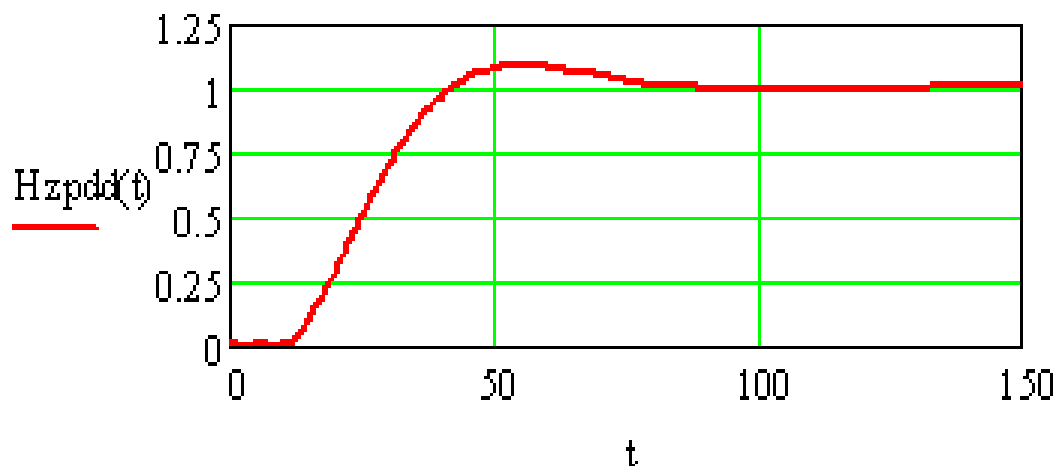


Рисунок 7 - График переходной функции замкнутой непрерывной системы

Сравнение графиков переходных функций показывает, что динамический заброс в цифровой системе 19 процентов, а в непрерывной 9. Это естественно, поскольку цифровая система реагирует дискретно.

Иногда Mathcad не дает результата при сложных передаточных функциях. В этом случае рекомендуется использование программы, составленной В. И. Пугачевым [2].

$$\underline{\text{Wzpdd}}(z) = \frac{.30776e-1 \cdot z^4 + .34621e-1 \cdot z^3 - .69861e-1 \cdot z^2 + .15727e-1 \cdot z + .44203e-2}{F27(z) + F28(z)}$$

$$\text{Sch}(z) = .30776e-1 \cdot z^4 + .34621e-1 \cdot z^3 - .69861e-1 \cdot z^2 + .15727e-1 \cdot z + .44203e-2$$

$$\text{Szn}(z) = z^6 - 2.6372 \cdot z^5 + 2.5073 \cdot z^4 - .93371 \cdot z^3 + .59159e-1 \cdot z^2 + .15727e-1 z + 44203e-2$$

$$\text{Wf}(z) = \frac{\text{Sch}(z)}{\text{Szn}(z)}, \quad \text{ch} = \text{Sch}(z) \left| \begin{array}{l} \text{simplify} \\ \text{coeffs, } z \rightarrow \\ \text{float, 5} \end{array} \right. \begin{pmatrix} .44203e-2 \\ .15727e-1 \\ -.69861e-1 \\ .34621e-1 \\ .30776e-1 \end{pmatrix}$$

$$\text{zn} = \text{Szn}(z) \left| \begin{array}{l} \text{simplify} \\ \text{coeffs, } z \rightarrow \\ \text{float, 5} \end{array} \right. \begin{pmatrix} .44203e-2 \\ .15727e-1 \\ .59159e-1 \\ -.93371 \\ 2.5073 \\ -2.6372 \\ 1. \end{pmatrix},$$

$$\underline{\text{n}} = 0.. 30,$$

$$\text{x}(\text{n}) = 1.$$

$$\underline{\text{F}}(\text{x}) := \begin{cases} 0 & \text{if } x < 0 \\ 1 & \text{otherwise} \end{cases}$$

```

Hf(n) = | c1 ← length(ch) - 1
        | z1 ← length(zn) - 1
        | for j ∈ 0.. n
        |   yj ← 0
        | for i ∈ 0.. n
        |   | b ← 0
        |   | a ← 0
        |   | for s ∈ 0.. c1
        |   |   b ← b + chc1-s · F(i + c1 - z1 - s) · x(i + c1 - z1 - s)
        |   | if i > 0
        |   |   | for g ∈ 1.. | z1 if i ≥ z1
        |   |   |               | i if i < z1
        |   |   |   a ← a + znz1-g · yi-g
        |   |   |   yi ←  $\frac{1 \cdot (b - a)}{zn_{z1}}$ 
        |   |   |   yi ←  $\frac{1}{zn_{z1}} \cdot b$  if i = 0
        |   |   |   yj
    
```

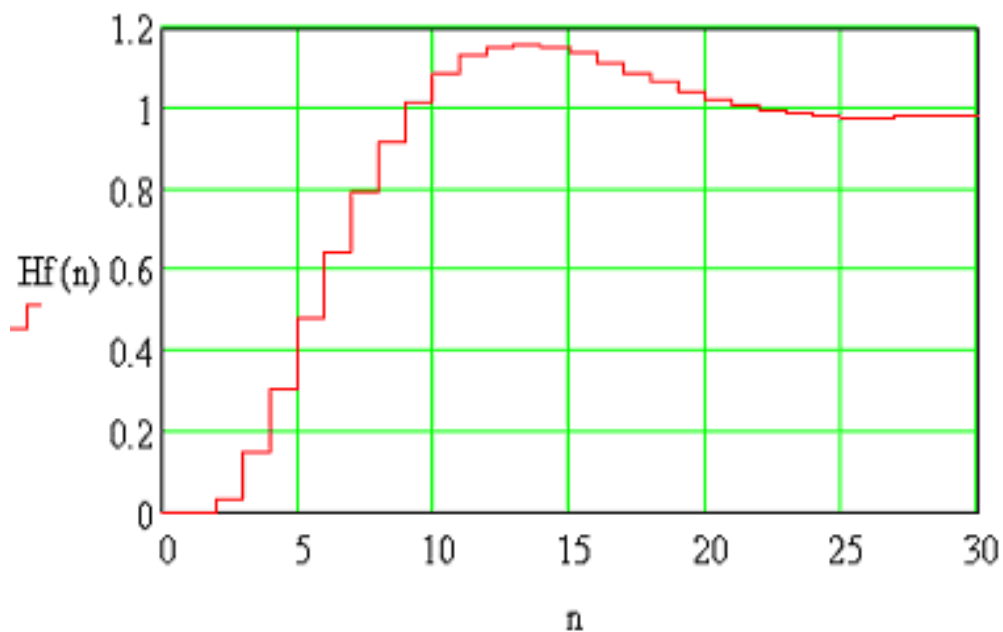


Рисунок 8 - график переходной функции замкнутой цифровой системы, построенный по передаточной функции

Данная программа весьма эффективна и, практически, не дает сбоев.

Выводы:

1. Эталонном при синтезе цифровой системы должна служить непрерывная система, поскольку в ней постоянно измеряется регулируемая величина и вырабатывается управляющее воздействие. Поэтому сначала нужно создать желаемую непрерывную систему а затем пытаться приблизить к ней цифровую.
2. В цифровых системах можно использовать интегрирующий сервомотор для реализации интегральной составляющей в законе управления.
3. В отличие от непрерывных систем в цифровых легко реализовать вторую производную ошибки управления через уравнения в конечных разностях.
4. Найдя оптимальные параметры управляющего устройства, реализующего ПИД – закон управления, для объекта без сервомотора, можно использовать их для реализации ПДД- закона управления объектом с интегрирующим сервомотором в цифровой системе.
5. Сравнение переходных функций непрерывной системы и цифровой при одинаковых параметрах настройки показывает, что динамический заброс в цифровой системе больше, чем в непрерывной.

Литература

1. Пугачев В. И., Пиотровский Д. Л., Осокин В. В., Хазнаферов В. А. Оптимизация систем управления, обладающих астатизмом из за сервомотора путем использования цифрового регулятора с двойным дифференцированием. Научный журнал КубГАУ №92(08), 2013 г., 20 с.

2. Пугачев В.И. Теория автоматического управления, раздел «Цифровые системы управления». Учебное пособие / Куб. гос. технол. у-нт. - Краснодар. 2005 - 100 с.

References

1. Pugachev V. I., Piotrovskij D. L., Osokin V. V., Haznaferov V. A. Optimizacija sistem upravlenija, obladajushih astatizmom iz za servomotora putem ispol'zovanija cifrovogo reguljatora s dvojnym differencirovaniem. Nauchnyj zhurnal KubGAU №92(08), 2013 g., 20 s.

2. Pugachev V.I. Teorija avtomaticheskogo upravlenija, razdel «Cifrovye sistemy upravlenija». Uchebnoe posobie / Kub. gos. tehnol. u-nt. - Krasnodar. 2005 - 100 s.