

УДК 65.011.56

UDC 65.011.56

ЦИФРОВАЯ СИСТЕМА УПРАВЛЕНИЯ ПРОЦЕССОМ ПОДОГРЕВА ВОЗДУХА ДЛЯ СУШКИ СЕМЯН С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ РЕГУЛЯТОРА ДВОЙНОГО ДИФФЕРЕНЦИРОВАНИЯ

DIGITAL PROCESS CONTROL SYSTEM OF HEATED AIR FOR DRYING SEEDS USING A REGULATOR WITH DOUBLE DIFFERENTIATION

Пугачев Василий Иванович
к.т.н., доцент

Pugachev Vasiliy Ivanovich
Dr.Sci.Tech., 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 рассмотрены вопросы цифрового управления процессом подогрева воздуха для сушки семян, показано, что изменение нагрузки теплогенератора несущественно изменяет динамику системы стабилизации температуры горячего воздуха, делая её практически инвариантно по отношению к возмущениям. Доказано, что использование цифрового регулятора с двойным дифференцированием существенно улучшает динамику САУ, исключая повышение астатизма системы управления

In the article we present questions of digital process control of heated air for drying seeds; it is shown that the change in the load of the heat source slightly changes the dynamics of the system for stabilizing the temperature of hot air, making it almost invariant with respect to perturbations. It is proved that the use of digital controller with dual differentiation significantly improves the performance of the automatic control system, excluding the increase astatism of the management system

Ключевые слова: ЦИФРОВОЙ РЕГУЛЯТОР, ПЕРЕХОДНЫЕ ФУНКЦИИ, ДВОЙНОЕ ДИФФЕРЕНЦИРОВАНИЕ

Keywords: DIGITAL CONTROLLER, TRANSITION FUNCTION, DUAL DIFFERENTIATION

В [1] получена математическая модель камеры для подогрева воздуха для сушки зерна.

$$W_{01}(p) = \frac{T_2 k_2 p + k_2}{T_1 T_2 p^2 + (T_1 + k_1 T_2) p + (k_1 - 1)}$$

Коэффициенты модели значительно изменяются в зависимости от нагрузки печи, которая зависит от типа зерна, степени его влажности и т. д.

При максимальной нагрузке передаточная функция объекта имеет вид:

$$W_{01}(p) = \frac{12 \cdot p + 1.2}{2 \cdot p^2 + 11.2 \cdot p + 1}$$

При минимальной нагрузке

$$W_o2(p) = \frac{48 \cdot p + 4.8}{2 \cdot p^2 + 11.2 \cdot p + 1}$$

Перемещение регулирующего органа на подаче топлива осуществляется с помощью сервомотора, реализующего интегральное звено с передаточной функцией

$$W_c(p) = \frac{1}{10 \cdot p}$$

Для измерения температуры горячего воздуха можно применить малоинерционный термометр сопротивления с постоянной времени 20 секунд.

$$W_{iz}(p) = \frac{1}{20 \cdot p + 1}$$

В [2] предложена адаптивная система, обеспечивающая хорошее качество управления при любых нагрузках объекта. Однако, сложность создания такой системы в производственных условиях привела к разработке более простой системы, обеспечивающей апериодичность переходного процесса при различных нагрузках, не требующая перенастройки параметров управляющего устройства и обеспечивающая удовлетворительное качество управления [3].

Дальнейшие исследования [4] показали, что для существующих в настоящее время цифровых систем управления можно улучшить качество управления, используя легко реализуемые цифровыми устройствами более сложные законы управления, включающими первую и вторую производные.

При реализации законов управления в системах с сервомотором постоянной скорости [4] сервомотор отнесем к регулятору, реализующему интегральную составляющую, обеспечивающую исключение статической ошибки регулирования. При этом порядок астатизма системы не увеличится, что является существенным фактором снижения динамического заброса

и времени переходного процесса.

Для объекта управления, можно найти оптимальные параметры ПИД - регулятора, обеспечивающий требуемую относительную степень затухания переходного процесса. Поскольку переходный процесс в замкнутой системе не должен быть колебательным, примем относительную степень затухания $\Psi=0,99$.

Проведем расчет оптимальных параметров по расширенным амплитудно-фазовым характеристикам (РАФХ) для случая минимальной нагрузки[1].

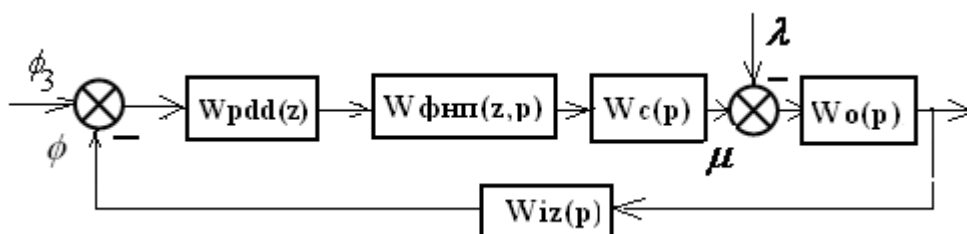


Рисунок 1 – Структурная схема цифровой системы управления

Здесь $Wpdd(z)$ – цифровой регулятор с двойным дифференцированием,

$Wфнп(z, p)$ – фиксатор нулевого порядка.

$$Wc(p) = \frac{1}{10 \cdot p}, \quad Wo1(p) = \frac{48 \cdot p + 4.8}{2 \cdot p^2 + 11.2 \cdot p + 1}, \quad Wiz(p) = \frac{1}{20 \cdot p + 1}.$$

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

Отнесем измеритель температуры к объекту. Тогда передаточная функция объекта принимает вид:

$$Wo(p) = \frac{48 \cdot p + 4.800}{40 \cdot p^3 + 226 \cdot p^2 + 31.20 \cdot p + 1}.$$

Обратная передаточная функция объекта:

$$Wob(p) = \frac{1}{Wo(p)}$$

$$Wob(p) = \frac{8.333 \cdot p^3 + 47.08 \cdot p^2 + 6.500 \cdot p + .2083}{10 \cdot p + 1}$$

Введя мнимое число $i = \sqrt{-1}$, найдем обратную расширенную амплитудно-фазовую характеристику (РАФХ) объекта:

$$Wob(i, w) = \frac{8.33 \cdot (i - .731)^3 \cdot w^3 + 47.1 \cdot (i - .731)^2 \cdot w^2 + 6.50 \cdot (i - .731) \cdot w + .208}{10 \cdot (i - .731) \cdot w + 1}$$

$$\alpha = 0.5, \quad a(w) = w \cdot (m^2 + 1)$$

$$C0(w) = 0.5 \cdot \left(a(w) \cdot \text{Im}(Wob(i, w)) + \sqrt{a(w)^2 \cdot \text{Im}(Wob(i, w))^2 + 4 \cdot a(w) \cdot w \cdot \alpha} \right)$$

$$C1(w) = m \cdot \text{Im}(Wob(i, w)) - \text{Re}(Wob(i, w)) + \frac{2 \cdot m \cdot w \cdot \alpha}{C0(w)}$$

$$w = 0.02, 0.02 + 0.001 \dots 3.2$$

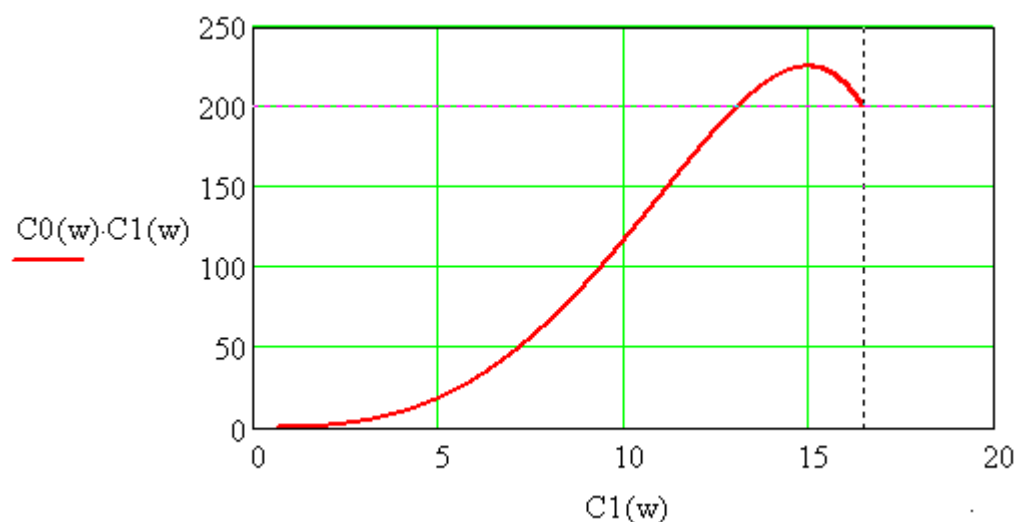


Рисунок 2 – Линия требуемой относительной степени затухания $\psi = 0,99$.

Оптимальные параметры ПИД – закона управления обеспечивающие требуемую относительную степень затухания равен:

коэффициент усиления регулятора, $K_p = 16.5$,

постоянная времени интегрирования: $T_i = 0,0825$ с.,

постоянная времени дифференцирования $T_d = 0,0413$ с.

Проведем пересчет параметров ДИД – регулятора в параметры ПДД – регулятора.

$$W_r(p) = K_p + \frac{1}{T_i \cdot p} + T_d \cdot p, \quad W_r(p) = 16.5 + \frac{12.12}{p} + .413e-1 \cdot p$$

$$W_{pdd}(p) \cdot W_c(p) \text{ expand} \rightarrow \frac{1}{10} \cdot \frac{K_{pd} + T_p \cdot p + T_{dd} \cdot p^2}{p}$$

$$K_{pd} = 121.2, \quad T_p = 165, \quad T_{dd} := .4130$$

$$W_{pdd}(p) = 121.2 + 165 \cdot p + .4130 \cdot p^2$$

$$W_{pdd}(p) = 121.2 + 165.0 \cdot p + .4130 \cdot p^2$$

$$W_o(p) = W_{o1}(p) \cdot W_{iz}(p) \cdot W_c(p)$$

$$W_o(p) = \frac{4.800 \cdot p + .4800}{40 \cdot p^4 + 226 \cdot p^3 + 31.20 \cdot p^2 + 1 \cdot p}$$

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

$$W_{zpdd}(p) = \frac{661.0 \cdot p + 792.2 \cdot p^2 + 1.982 \cdot p^3 + 58.18}{40 \cdot p^4 + 228.0 \cdot p^3 + 823.4 \cdot p^2 + 662.0 \cdot p + 58.18}$$

$$W_{zpdd}(i, w) = \frac{661 \cdot i \cdot w + 792.2 \cdot i^2 \cdot w^2 + 1.982 \cdot i^3 \cdot w^3 + 58.18}{40 \cdot i^4 \cdot w^4 + 228 \cdot i^3 \cdot w^3 + 823.4 \cdot i^2 \cdot w^2 + 662 \cdot i \cdot w + 58.18}$$

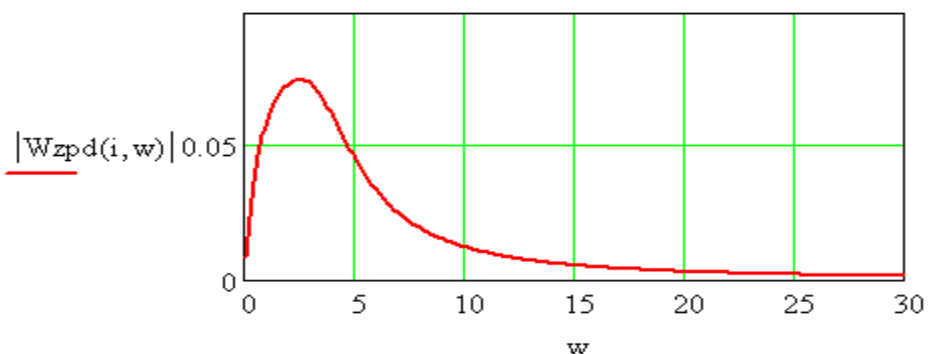


Рисунок 3 - Амплитудно-частотная характеристика замкнутой САУ

Частота среза системы: $W_{cpd} = 25$, рекомендуемый период квантования цифровой системы:

$$T_{opd} = \frac{\pi}{W_{cpd}}. \quad T_{opd} = 0,126 \text{ с.}$$

Возникает вопрос, Будет ли динамика цифровых систем удовлетворительной и будет ли вообще устойчивой цифровая САУ при изменении математической модели объекта при различных нагрузках.

Найдем передаточную функцию цифрового ПДД- регулятора.

$$W_{pdd}(p) = 121.2 + 165.0 \cdot p + .4130 \cdot p^2$$

Примем период квантования равным $T = 0.1 \text{ с.}$

$$\begin{aligned} &.4130 \cdot \frac{\varepsilon(n+2) - 2 \cdot \varepsilon(n+1) + \varepsilon(n)}{T^2} + 165.0 \cdot \left(\frac{\varepsilon(n+1) - \varepsilon(n)}{T} \right) + 121.2 \cdot \varepsilon(n) \\ &= 41.30 \cdot \varepsilon(n+2) + 1567.40 \cdot \varepsilon(n+1) - 1487.50 \cdot \varepsilon(n). \end{aligned}$$

Передаточная функция цифрового ПДД- регулятора.

$$W_{pdd}(z) = \frac{u(z)}{\varepsilon(z)}. \quad W_{pdd}(z) = 41.30 \cdot z^2 + 1567.40 \cdot z - 1487.50.$$

Найдем дискретную передаточную функцию объекта, включающего сам объект, измеритель и сервомотор..

$$W_o(p) = \frac{48 \cdot p + 4.800}{40 \cdot p^3 + 226 \cdot p^2 + 31.20 \cdot p + 1.}$$

$$H_o(t) = (-5.39) \cdot e^{(-.500e-1)t} + 4.80 + .593 \cdot e^{(-2.80)t} \cdot \cosh(2.71 \cdot t) + .514 \cdot e^{(-2.80)t} \cdot \sinh(2.71 \cdot t)$$

$$H_o(n, T_o) = (-5.39) \cdot e^{(-.500e-1) \cdot n \cdot T_o} + 4.80 + .593 \cdot e^{(-2.80) \cdot n \cdot T_o} \cdot \cosh(2.71 \cdot n \cdot T_o) + .514 \cdot e^{(-2.80) \cdot n \cdot T_o} \cdot \sinh(2.71 \cdot n \cdot T_o).$$

$$H_o(z, T_o) = \frac{S_i(z, T_o)}{S_z(z, T_o)}$$

С учетом фиксатора нулевого порядка:

$$H_o(z, T_o) = H_o(z, T_o) \cdot (1 - z^{-1}), \quad T_o = 0.1.$$

Дискретная передаточная функция объекта, включающего сам объект и измеритель

$$W_o(z) = \frac{.5026919e-2 \cdot z^2 - .7971843e-3 \cdot z - .4138169e-2}{z^3 - 2.562395 \cdot z^2 + 2.130774 \cdot z - .5683602}$$

$$\lim_{z \rightarrow 1} W_o(z) \text{ float,3} \rightarrow 4.87$$

$$T_c = 10, \quad W_c(z) := \frac{T_o \cdot z^{-1}}{T_c \cdot (1 - z^{-1})}$$

Передаточная функция регулятора совместно с сервомотором:

$$W_{rz}(z) = W_{pdd}(z) \cdot W_c(z),$$

$$W_{rz}(z) = \frac{.41300 \cdot z^2 + 15.674 \cdot z - 14.875}{z - 1}.$$

Передаточная функция замкнутой цифровой системы по каналу

$\lambda \rightarrow \varphi$

$$Wz\lambda\phi(z) = \frac{-W_o(z)}{1 + W_o(z) \cdot W_{rz}(z)}$$

$$Wz\lambda\phi(z) = \frac{(-.5026919e-2 \cdot z^3 + .5824103e-2 z^2 + .3340985e-2 z - .4138169e-3)}{1.002076 z^4 - 3.483932 z^3 + 4.604189 z^2 - 2.752138 z + .6299154}$$

$$\lim_{z \rightarrow 1} Wz\lambda\phi(z) \text{ float,3} \rightarrow 0$$

$$Hz\lambda\phi(z) = Wz\lambda\phi(z) \cdot \frac{z}{z - 1}$$

$$Hz\lambda\phi(n) = (-.480e-4) \cdot e^{(-.994e-2) \cdot n} \cdot \cos(.127e-17 \cdot n) \dots\dots$$

(остальные коэффициенты опущены из за сложности выражения)

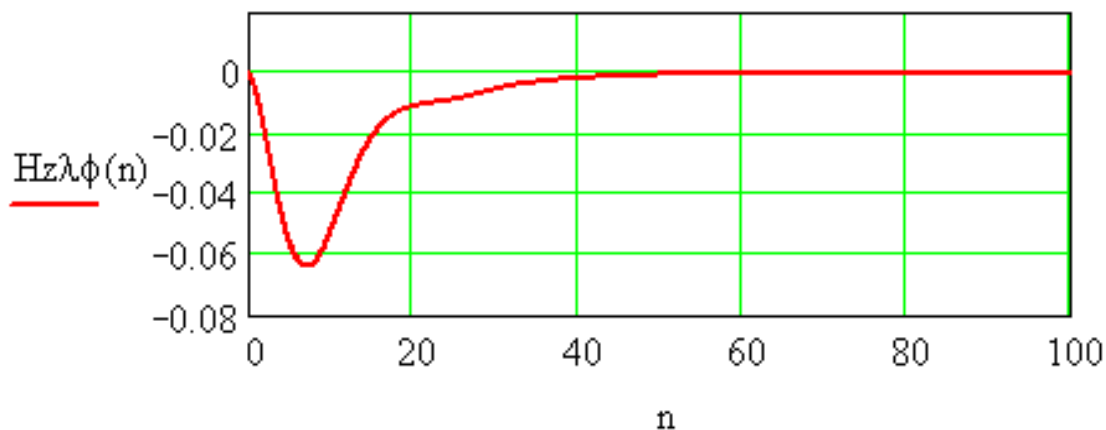


Рисунок 4 - График переходных функций замкнутой САУ по каналу нагрузка – регулируемая величина $Hz\lambda\phi(n)$ при минимальной нагрузке для цифровой САУ

Рассмотрим работу цифровой САУ при максимальной нагрузке, но с теми же параметрами цифрового ПДД - регулятора.

$$\underline{W_0}(p) = \frac{12 \cdot p + 1.200}{40 \cdot p^3 + 226 \cdot p^2 + 31.20 \cdot p + 1.}$$

$$H_0(t) = (-1.3) \cdot e^{(-.50e-1)t} + 1.2 + .15 \cdot e^{(-2.8)t} \cdot \cosh(2.7 \cdot t) + .13 \cdot e^{(-2.8)t} \cdot \sinh(2.7 \cdot t)$$

$$H_0(n, T_0) = (-1.3) \cdot e^{(-.50e-1)nT_0} + 1.2 + .15 \cdot e^{(-2.8)nT_0} \cdot \cosh(2.7 \cdot n \cdot T_0)$$

+

$$+ .13 \cdot e^{(-2.8)nT_0} \cdot \sinh(2.7 \cdot n \cdot T_0).$$

$$\underline{H_0}(z, T_0) := \frac{Si(z, T_0)}{Sz(z, T_0)}, \quad \underline{H_0}(z, T_0) = H_0(z, T_0) \cdot (1 - z^{-1}).$$

$$T_0 = 0.1$$

$$\underline{H_0}(z) = \frac{.1000000e-4 \cdot z^3 + .1231727e-2 \cdot z^2 - .1792714e-3 \cdot z - .1039541e-2}{z^3 - 2.562393 \cdot z^2 + 2.130772 \cdot z - .5683601}$$

$$\lim_{z \rightarrow 1} H_0(z) \text{ float,3} \rightarrow 1.21$$

$$\underline{H_0}(z, T_0) := \frac{Si(z, T_0)}{Sz(z, T_0)}, \quad \underline{W_{01}}(z, T_0) = H_0(z, T_0) \cdot (1 - z^{-1}).$$

$$T_0 = 0.1$$

$$\underline{W_{01}}(z) = \frac{.1257896e-2 \cdot z^2 - .2002076e-3 \cdot z - .1034384e-2}{z^3 - 2.562395 \cdot z^2 + 2.130774 \cdot z - .5683601}$$

$$\lim_{z \rightarrow 1} W_{01}(z) \text{ float,3} \rightarrow 1.23$$

$$T_c = 10, \quad \underline{W_c}(z) = \frac{T_0 \cdot z^{-1}}{T_c \cdot (1 - z^{-1})}.$$

$$W_{rz}(z) = W_{pdd}(z) \cdot W_c(z),$$

$$\text{Wrz}(z) = \frac{.41300 \cdot z^2 + 15.674 \cdot z - 14.875}{z - 1}.$$

$$\text{Wz1}\lambda\phi(z) = \frac{-\text{Wo1}(z)}{1 + \text{Wo1}(z) \cdot \text{Wrz}(z)}.$$

$$\text{Wz1}\lambda\phi(z) = \frac{(-.1257896e-2 \cdot z^3 + .1458104e-2 z^2 + .8341764e-3 z - .1034384e-2)}{1.000520 \cdot z^4 - 3.542761 \cdot z^3 + 4.670893 \cdot z^2 - 2.712369 \cdot z + .5837466}$$

$$\lim_{z \rightarrow 1} \text{Wz1}\lambda\phi(z) \text{ float,3} \rightarrow 0$$

Проверим на устойчивость замкнутую систему при максимальной нагрузке по критерию Джюри.

Характеристическое уравнение замкнутой цифровой САУ:

$$X(p) = 1.000520 \cdot z^4 - 3.542761 \cdot z^3 + 4.670893 \cdot z^2 - 2.712369 \cdot z + .5837466$$

$$b = X(p) \left| \begin{array}{l} \text{simplify} \\ \text{coeffs, } z \rightarrow \\ \text{float,7} \end{array} \right. \begin{pmatrix} .5837466 \\ -2.712369 \\ 4.670893 \\ -3.542761 \\ 1.000520 \end{pmatrix},$$

$$n = \text{length}(b) - 1,$$

$$\underline{A} = \left| \begin{array}{l} \text{for } i \in 0..n \\ a_i \leftarrow b_{n-i} \\ a \end{array} \right.$$

$$A \text{ float}, 7 \rightarrow \begin{pmatrix} 1.000520 \\ -3.542761 \\ 4.670893 \\ -2.712369 \\ .5837466 \end{pmatrix}, \quad V = \begin{pmatrix} 1 \\ z \\ z^2 \\ z^3 \\ z^4 \end{pmatrix}.$$

```

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
    |

```

$$K_{coef} = Q, \quad K_{coef} = \begin{pmatrix} 0.583 \\ -0.978 \\ 0.997 \end{pmatrix}, \quad K_{pdd} = \begin{pmatrix} 0.583 \\ -0.978 \\ 0.997 \end{pmatrix}.$$

Цифровая система устойчива.

Переходная функция замкнутой цифровой САУ:

$$Hz1\lambda\phi(z) = Wz1\lambda\phi(z) \cdot \frac{z}{z - 1}$$

$$Hz1\lambda\phi(n) := (-.25343e-3) \cdot e^{(-.98989e-2) \cdot n} \cdot \cos(.25775e-18 \cdot n) \dots \blacksquare$$

(остальные коэффициенты опущены из за сложности выражения)

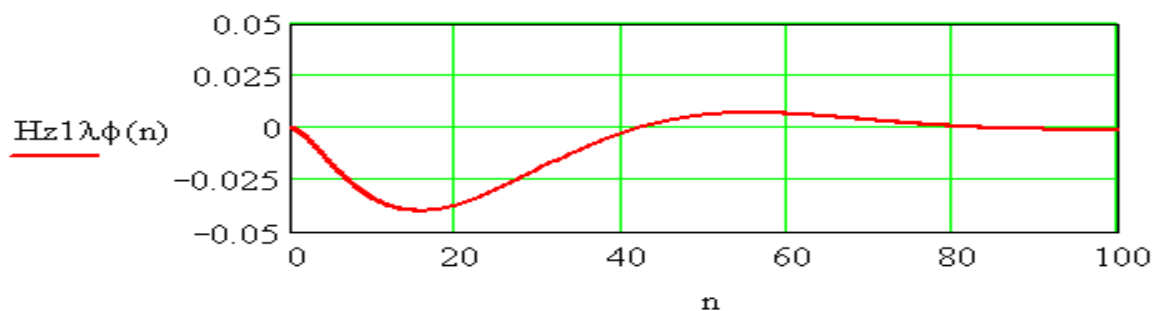


Рисунок 5 - График переходных функций замкнутой САУ по каналу нагрузка – регулируемая величина $H z 1 \lambda \phi(n)$ при максимальной нагрузке для цифровой САУ

Динамика цифровой системы удовлетворительна, система работает устойчиво, длительность переходных процессов по возмущающим воздействиям по сравнению с [2, 3] уменьшилась на порядок, втрое уменьшился динамический заброс. Система практически инвариантна по отношению к возмущениям.

Выводы

1. Изменение нагрузки теплогенератора несущественно изменяет динамику системы стабилизации температуры горячего воздуха, делая её практически инвариантно по отношению к возмущениям.

2. Использование ПДД – цифрового регулятора существенно улучшает динамику САУ, исключая повышение астатизма системы управления.

Литература

1. Пугачев В.И., Петриченко В.Г. Разработка математической модели процесса подогрева воздуха для сушки зерна. // Научн. журнал КубГАУ, № 75(01), 2012.

2. Пугачев В.И., Петриченко В.Г. Рекомендации по созданию системы управления процессом подогрева воздуха для сушки семян. // Научн. журнал КубГАУ, № 78(04), 2012.

3. Пугачев В. И., Пиотровский Д. Л. Синтез системы управления температурой воздухоподогревателя для сушки зерна. // Научн. журнал КубГАУ, № 91(07), 2013.

4. Пугачев В. И., Пиотровский Д. Л., Осокин В. В., Хазнаферов В. А. Оптимиза-

ция систем управления, обладающих астатизмом из за сервомотора путем использования цифрового регулятора с двойным дифференцированием. Научный журнал КубГАУ № 92(08), 2013 г., 16 с.

5. Стефани Е.П. Основы расчета настройки регуляторов теплоэнергетических процессов. - М.:Энергия,1972. -376 с.

6. Пугачев В.И. Теория автоматического управления (использование Mathcad при анализе и синтезе систем управления): учеб. пособие / Изд. КубГТУ, 2006 – 140 с.

References

1. Pugachev V.I., Petrichenko V.G. Razrabotka matematicheskoj modeli processa podogreva vozduha dlja sushki zerna. // Nauchn. zhurnal KubGAU, № 75(01), 2012.

2. Pugachev V.I., Petrichenko V.G. Rekomendacii po sozdaniju sistemy upravlenija processom podogreva vozduha dlja sushki semjan. // Nauchn. zhurnal KubGAU, № 78(04), 2012.

3. Pugachev V. I., Piotrovskij D. L. Sintez sistemy upravlenija temperaturroj vozduhopodogrevatelja dlja sushki zerna. // Nauchn. zhurnal KubGAU, № 91(07), 2013.

4. Pugachev V. I., Piotrovskij D. L., Osokin V. V., Haznaferov V. A. Optimizacija sistem upravlenija, obladajushhих астатизмом из за сервомотора путем ispol'zovanija cifrovogo reguljatora s dvojnym differencirovaniem. Nauchnyj zhurnal KubGAU № 92(08), 2013 g., 16 s.

5. Stefani E.P. Osnovy rascheta nastrojki reguljatorov teplojenergeticheskikh processov. - М.:Jenergija,1972. -376 s.

6. Pugachev V.I. Teorija avtomaticheskogo upravlenija (ispol'zovanie Mathcad pri analize i sinteze sistem upravlenija): ucheb. posobie / Izd. KubGTU, 2006 – 140 с.