УДК 631.36-52

ЦИФРОВАЯ РЕАЛИЗАЦИЯ СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ ПРОЦЕССОМ ПОДОГРЕВА ВОЗДУХА ДЛЯ СУШКИ СЕМЯН

Пугачев Василий Иванович
к.т.н., доцент

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

В статье рассмотрены вопросы управления процессом подогрева воздуха в шахтной сушилке при помощи цифрового регулятора

Ключевые слова: ЦИФРОВОЙ РЕГУЛЯТОР, ПЕРЕХОДНЫЕ ФУНКЦИИ, СУШКА ЗЕРНА

UDC 631.36-52

DIGITAL IMPLEMENTATION OF THE PROCESS CONTROL SYSTEM HEATING AIR FOR DRYING SEEDS

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

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

The article considers the issues of digital process of control of heating air in the dryer shaft

Keywords: DIGITAL CONTROLLER, TRANSITION FUNCTIONS, GRAIN DRYING

Современные системы управления, используемые в пищевой промышленности, отличаются широким спектром средств автоматизации. Это могут быть промышленные регуляторы, реализующие непрерывный или цифровой закон управления, микроконтроллеры, управляющие вычислительные комплексы (УВК) и др.

В тех случаях, когда необходимо реализовать цифровой закон управления с оптимальными параметрами регулятора, обеспечивающими удовлетворительную динамику переходных процессов при различных нагрузках [1], можно воспользоваться результатами исследований, приведенных ниже.

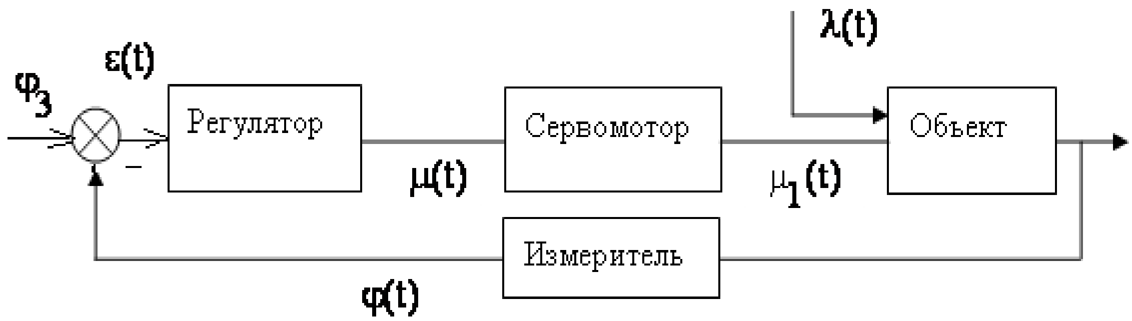

Рисунок 1 − Структурная схема системы управления

Передаточная функция объекта, сервомотора и измерителя имеют вид:

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

Используя методику расчета систем управления с сервомотором постоянной скорости [2], эквивалентная передаточная функция объекта принимает вид:

$$Wo1(p) = Womin(p) \cdot Wiz(p) \cdot Wc(p).$$

$$Wo1(p) = \frac{4.800 \cdot p + .4800}{40. \cdot p^4 + 226. \cdot p^3 + 31.20 \cdot p^2 + 1. \cdot p}$$

Оптимальные параметры цифрового фильтра, реализующего ПД – закон управления [1]:

$$Wr(p) = 1 + 50 \cdot p.$$

Для реализации цифрового закона управления необходимо знать период квантования измеряемой непрерывной регулируемой величины, при котором не будет потери информации. Этот вопрос можно решить с помощью теоремы В.А. Котельникова [3]. Для этого найдем частоту среза замкнутой непрерывной системы с оптимальными параметрами по каналу: задание – регулируемая величина.

$$Wz1(p) = \frac{Wo1(p) \cdot Wr(p)}{1 + Wo1(p) \cdot Wr(p)}.$$

$$Wz1(p) = \frac{28.8 \cdot p + 240. \cdot p^2 + .480}{40. \cdot p^4 + 226. \cdot p^3 + 271. \cdot p^2 + 29.8 \cdot p + .480}.$$

Переходную функцию непрерывной САУ при минимальной нагрузке находим как:

$$Hn1(t) = invlaplace\{\frac{Wz1(p)}{p}\},$$

$$Hn1(t) = 1. + .604 \cdot e^{(-4.00)\cdot t} - 1.59 \cdot e^{(-1.53)\cdot t} + .713e\text{-}2 \cdot e^{(-.101)\cdot t} - .247e\text{-}1 \cdot e^{(-.195e\text{-}1)\cdot t}$$
.

Заменив в передаточной функции p=iw, находим амплитудно-фазовую характеристику (АФХ):

$$Wz1(i,w) = \frac{28.8 \cdot i \cdot w + 240. \cdot i^2 \cdot w^2 + .480}{40. \cdot i^4 \cdot w^4 + 226. \cdot i^3 \cdot w^3 + 271. \cdot i^2 \cdot w^2 + 29.8 \cdot i \cdot w + .480}.$$

Модуль АФХ определим так:

$$M1(w) = \sqrt{Re(Wz1(i,w))^2 + Im(Wz1(i,w))^2}$$

Приняв за частоту среза системы частоту, при которой сигнал на выходе равен 3 процента от гармонического сигнала на ее входе, фильтрующие свойства замкнутой системы по каналу задание - регулируемая величина можно определить так:

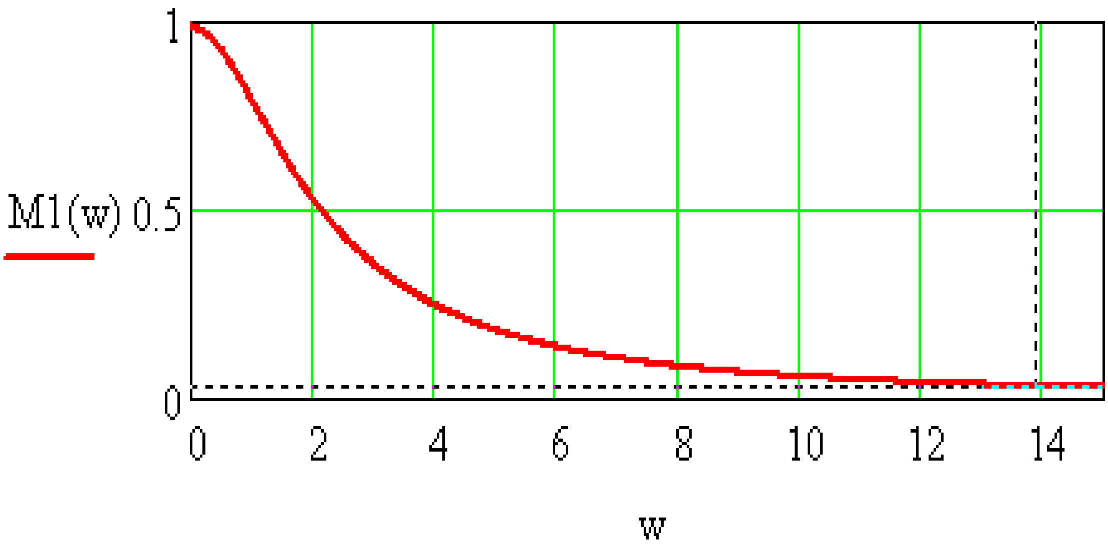

Рисунок 2 – Амплитудно-частотная характеристика замкнутой САУ по каналу задание – регулируемая величина

Сигнал на выходе системы составляет 3 процента от входного при частоте Wc = 14 рад/с.. При этом в соответствии с теоремой В. А. Котельникова период квантования не должен быть больше 0, 224 с.

$$Wc = 14, \qquad To1 = \frac{\pi}{Wc}, \qquad To1 = .224.$$

Проверим период квантования для канала возмущение - регулируемая величина. Для этого найдем АЧХ замкнутой САУ по этому каналу.

$$Wr(p) \to 1 + 50 \cdot p. \qquad Wo\lambda(p) = Womin(p) \cdot Wiz(p),$$

$$Wo\lambda(p) = \frac{48. \cdot p + 4.80}{40. \cdot p^3 + 226. \cdot p^2 + 31.2 \cdot p + 1.}$$

$$Wz1\lambda(p) = \frac{Wo\lambda(p)}{1 + Wo1(p) \cdot Wr(p)}.$$

$$Wz1\lambda(p) = \frac{1920. \cdot p^2 + 192. \cdot p}{1600. \cdot p^4 + 9040. \cdot p^3 + .1085e5 \cdot p^2 + 2920. \cdot p + 192.}$$

$$Wz1\lambda(i,w) = \frac{1920. \cdot i^2 \cdot w^2 + 192. \cdot i \cdot w}{1600. \cdot i^4 \cdot w^4 + 9040. \cdot i^3 \cdot w^3 + .1085e5 \cdot i^2 \cdot w^2 + 2920. \cdot i \cdot w + 192.}$$

$$M2(w) = \sqrt{\mathrm{Re}\left(Wz1\lambda(i,w)\right)^2 + \mathrm{Im}\left(Wz1\lambda(i,w)\right)^2}.$$

Фильтрующие свойства замкнутой системы по каналу возмущение - регулируемая величина

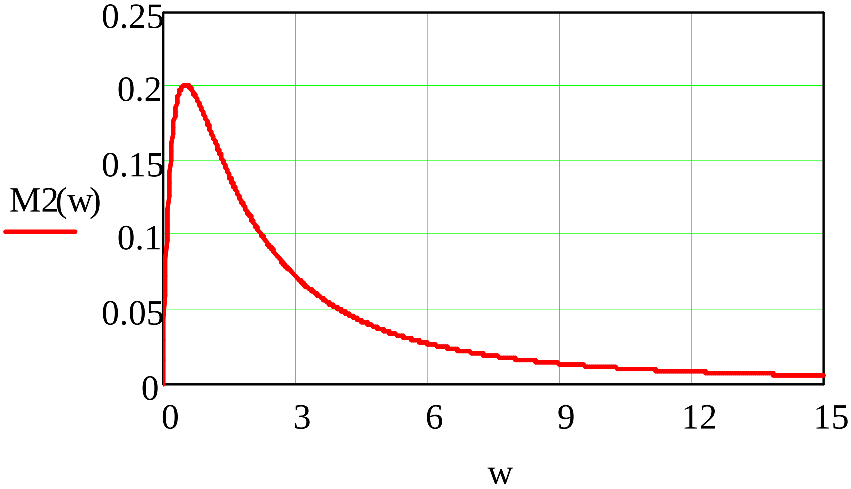

Рисунок 3 – Амплитудно-частотная характеристика замкнутой САУ по каналу возмущение – регулируемая величина

Как следует из графика, частота среза меньше полученной ранее (14 рад/с), поэтому не смысла рассчитывать период квантования.

Фильтрующие свойства замкнутой системы по каналу задание - регулируемая величина при максимальной нагрузке

$$Womax(p) = \frac{12 \cdot p + 1.2}{2 \cdot p^2 + 11.2 \cdot p + 1}, \quad Wc(p) = \frac{1}{10 \cdot p}, \quad Wiz(p) = \frac{1}{20 \cdot p + 1}.$$

$$Wo2(p) = Womax(p) \cdot Wiz(p) \cdot Wc(p),$$

$$Wo2(p) = \frac{1.200 \cdot p + .1200}{40. \cdot p^4 + 226. \cdot p^3 + 31.20 \cdot p^2 + 1. \cdot p}.$$

$$Wz1(p) = \frac{Wo2(p) \cdot Wr(p)}{1 + Wo2(p) \cdot Wr(p)}.$$

$$Wz2(p) = \frac{7.20 \cdot p + 60. \cdot p^2 + .120}{40. \cdot p^4 + 226. \cdot p^3 + 91.2 \cdot p^2 + 8.20 \cdot p + .120}.$$

Переходную функцию непрерывной САУ при максимальной нагрузке находим как:

$$Hn2(t) = invlaplace\{\frac{Wz2(p)}{p}\},$$

$$Hn2(t) = 1. + .585e\text{-}1 \cdot e^{(-5.22)\cdot t} - .998 \cdot e^{(-.308)\cdot t} + .389e\text{-}1 \cdot e^{(-.103)\cdot t} - .994e\text{-}1 \cdot e^{(-.181e\text{-}1)\cdot t}$$

$$Wz2(i,w) = \frac{7.20 \cdot i \cdot w + 60. \cdot i^2 \cdot w^2 + .120}{40. \cdot i^4 \cdot w^4 + 226. \cdot i^3 \cdot w^3 + 91.2 \cdot i^2 \cdot w^2 + 8.20 \cdot i \cdot w + .120}.$$

$$M3(w) = \sqrt{Re(Wz2(i,w))^2 + Im(Wz2(i,w))^2}.$$

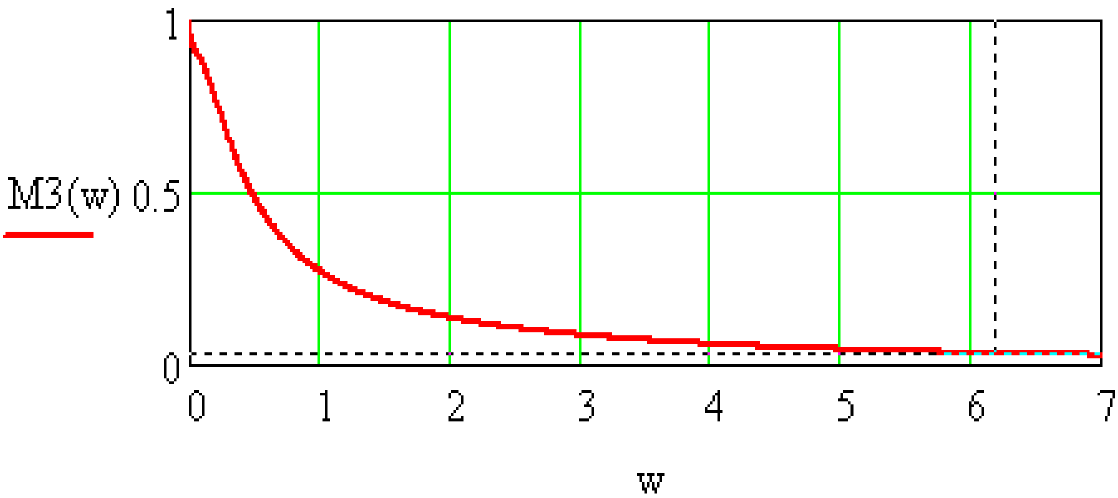

Рисунок 4 – АЧХ замкнутой системы по каналу задание - регулируемая величина при максимальной нагрузке

$$Wc = 6.2, \qquad To1 = \frac{\pi}{Wc}, \qquad To1 = .506 .$$

Примем период квантования T = 0,2 с.

Проанализировать работу цифровой САУ можно по виду переходных функций замкнутой системы с оптимальными параметрами при различных нагрузках. Поскольку регулятор цифровой (дискретный), то для возможности совместного исследования объект также следует представить в виде дискретной передаточной функции.

Рассмотрим случай минимальной нагрузки объекта.

$$Ho1(p) = \frac{Wo1(p)}{p}, \quad Ho1(p) = \frac{4.8000 \cdot p + .48000}{40. \cdot p^5 + 226. \cdot p^4 + 31.200 \cdot p^3 + 1. \cdot p^2}.$$

$$Ho1(t) = .480 \cdot t - 10.2 + 10.8 \cdot e^{(-.500e\text{-}1)\cdot t} - .611 \cdot e^{(-2.80)\cdot t} \cdot \cosh(2.71 \cdot t)$$

$$-.609 \cdot e^{(-2.80)\cdot t} \cdot \sinh(2.71 \cdot t).$$

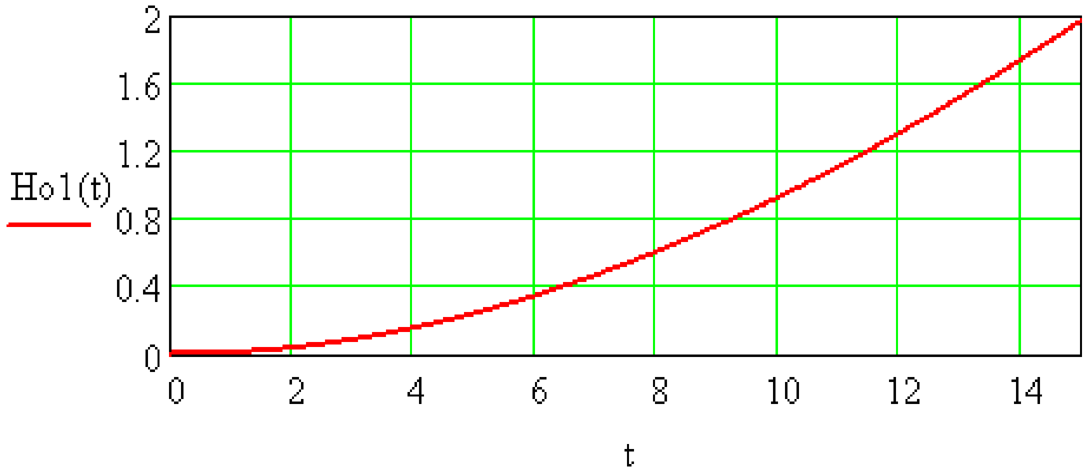

Рисунок 5 – Вид переходной функции эквивалентного объекта при минимальной нагрузке.

Решетчатая переходная функция.

$$Ho1(n,T) = .480 \cdot n \cdot T - 10.2 + 10.8 \cdot e^{(-.500e\text{-}1)\cdot n \cdot T} - .611 \cdot e^{(-2.80)\cdot n \cdot T} \cdot \cosh(2.71 \cdot n \cdot T)$$

$$-.609 \cdot e^{(-2.80)\cdot n \cdot T} \cdot \sinh(2.71 \cdot n \cdot T).$$

Применив прямое дискретное Z – преобразование с учетом фиксатора нулевого порядка, получаем:

$T = 0.2$

$$H(z) = \frac{(-.1458e\text{-}2)\cdot z^4 + .2142e\text{-}2\cdot z^3 - .1232e\text{-}2\cdot z^2 + .8387e\text{-}4\cdot z + .4794e\text{-}3\cdot z^5}{z^5 - 4.297\cdot z^4 + 7.226\cdot z^3 - 5.871\cdot z^2 + 2.271\cdot z - .3226}$$

$$Wo1(z) = H(z,T)\cdot\left(1 - z^{-1}\right).$$

Дискретная передаточная функция приведенной непрерывной части равна

$$Wo1(z) = \frac{0.000124\cdot z^3 + 0.000263\cdot z^2 - 0.000305\cdot z - 0.00007}{z^4 - 3.304319\cdot z^3 + 3.93179\cdot z^2 - 1.950505\cdot z + 0.323034}.$$

Уравнение непрерывного ПД – закона управления:

$$\mu(t) = Kp\cdot\varepsilon(t) + Td\cdot\left(\frac{d}{dt}\varepsilon(t)\right),$$

где: $\mu(t)$ - сигнал на выходе регулятора, $\varepsilon(t)$ - ошибка управления.

Уравнение ПД – закона управления в конечных разностях:

$$\mu(n) = Kp\cdot\varepsilon(n) + \frac{Td\cdot(\varepsilon(n) - \varepsilon(n-1))}{T},$$

Применив прямое Z преобразование, получаем:

$$\mu(z) := Kp\cdot\varepsilon(z) + \frac{Td}{T}\cdot\left(\varepsilon(z) - z^{-1}\cdot\varepsilon(z)\right),$$

Дискретная передаточная функция регулятора:

$$Wr(z) = \frac{\mu(z)}{\varepsilon(z)}. \quad Wr(z) = Kp + \frac{Td}{T} - \frac{Td}{T}\cdot z^{-1},$$

$$Kp = 1, \qquad Td = 50, \qquad Wr(z) = 251.0 - \frac{250.0}{z}.$$

Передаточная функция замкнутой цифровой системы по каналу задание – регулируемая величина:

$$Wz1(z) = \frac{Wo1(z) \cdot Wr(z)}{1 + Wo1(z) \cdot Wr(z)}.$$

$$Wz1(z) = \frac{.3112e\text{-}1 \cdot z^4 + .3501e\text{-}1 \cdot z^3 - .1423 \cdot z^2 + .5868e\text{-}1 \cdot z + .1750e\text{-}1}{z^5 - 3.273 \cdot z^4 + 3.967 \cdot z^3 - 2.093 \cdot z^2 + .3817 \cdot z + .1750e\text{-}1}$$

$$\lim_{z \to 1} Wz1(z) \ \text{float},3 \ \to 1.$$

Проверка правильности расчетов показывает, что они верны. Замкнутая система астатическая, поэтому предел передаточной функции замкнутой САУ равен единице.

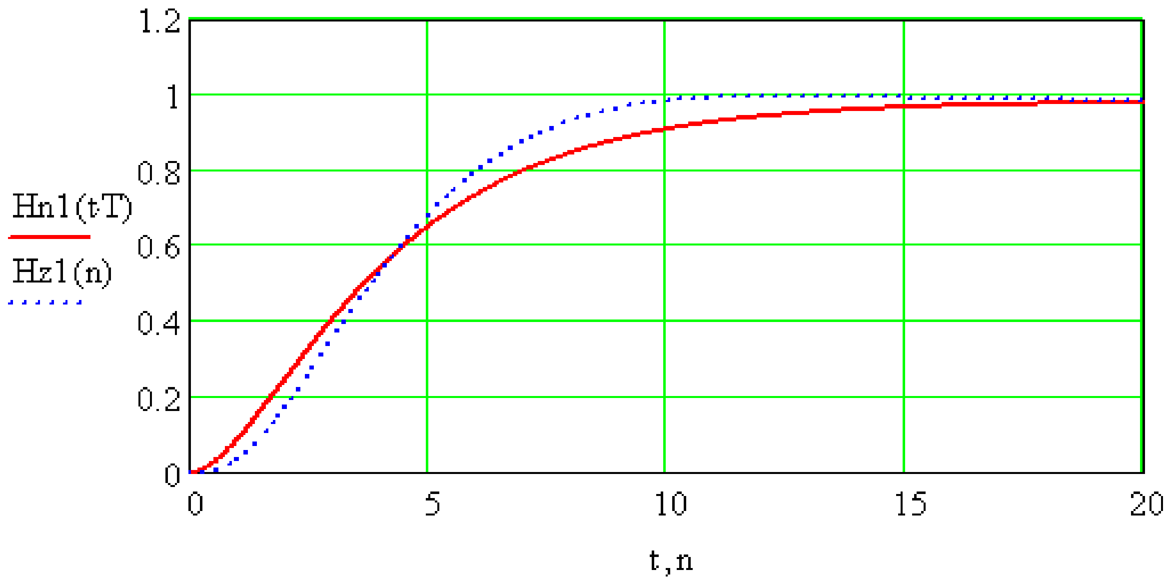

Рисунок 6 – Сравнительные графики переходных функций замкнутых непрерывной Hn1(t) и цифровой Hz1(n) систем при минимальной нагрузке.

Найдем дискретную передаточную функцию приведенной непрерывной части для случая максимальной нагрузки объекта.

$$Wo2(p) = \frac{1.200 \cdot p + .1200}{40. \cdot p^4 + 226. \cdot p^3 + 31.20 \cdot p^2 + 1. \cdot p}.$$

Оптимальные параметры цифрового фильтра:

$$Wr(p) = 1 + 50 \cdot p$$

Изображение переходной функции для случая максимальной нагрузки объекта.

$$Ho2(p) = \frac{Wo2(p)}{p}, \qquad Ho2(p) = \frac{1.2000 \cdot p + .12000}{40. \cdot p^5 + 226. \cdot p^4 + 31.200 \cdot p^3 + 1. \cdot p^2}.$$

Используя обратное преобразование Лапласа, находим выражение оригинала переходной функции.

$$Ho2(t) = .120 \cdot t - 2.54 + 2.70 \cdot e^{(-.500e-1)\cdot t} - .153 \cdot e^{(-2.80)\cdot t} \cdot \cosh(2.71 \cdot t)$$

$$-.152 \cdot e^{(-2.80)\cdot t} \cdot \sinh(2.71 \cdot t).$$

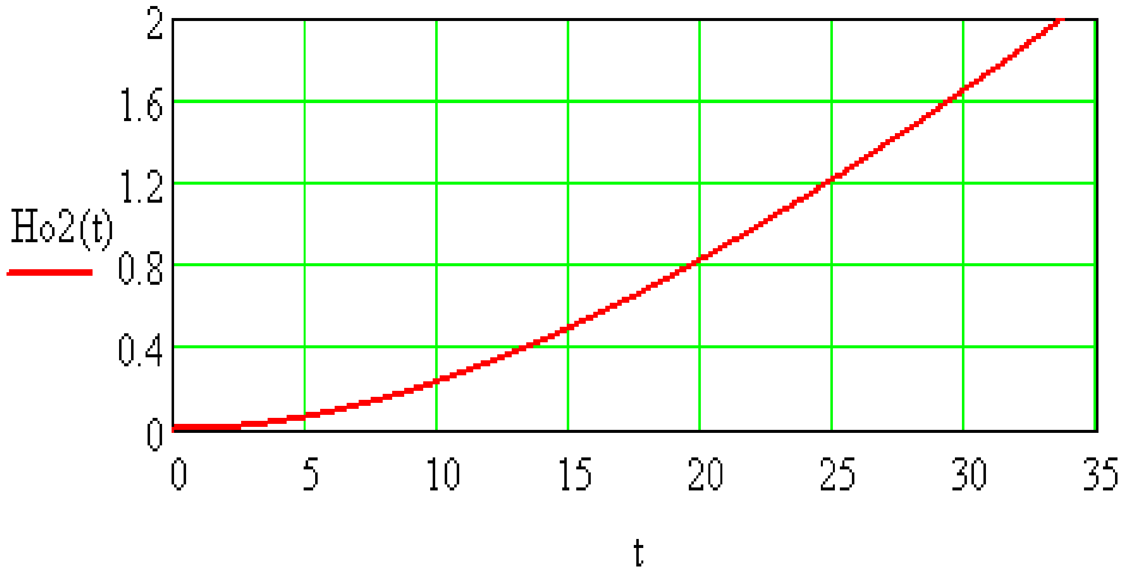

Рисунок 7 – Вид переходной функции приведенной непрерывной части при максимальной нагрузке

Методика получения дискретной передаточной функции объекта при максимальной нагрузке аналогична предыдущему.

$$Ho2(n,T) = .120 \cdot n \cdot T - 2.54 + 2.70 \cdot e^{(-.500e-1) \cdot n \cdot T} - .153 \cdot e^{(-2.80) \cdot n \cdot T} \cdot \cosh(2.71 \cdot n \cdot T)$$

$$-.152 \cdot e^{(-2.80) \cdot n \cdot T} \cdot \sinh(2.71 \cdot n \cdot T)$$

$$T = 0.2$$

$$H(z) = \frac{(-.1458e\text{-}2) \cdot z^4 + .2142e\text{-}2 \cdot z^3 - .1232e\text{-}2 \cdot z^2 + .8387e\text{-}4 \cdot z + .4794e\text{-}3 \cdot z^5}{z^5 - 4.297 \cdot z^4 + 7.226 \cdot z^3 - 5.871 \cdot z^2 + 2.271 \cdot z - .3226}$$

$$Wo2(z) = H(z,T) \cdot \left(1 - z^{-1}\right)$$

$$Wo2(z) = \frac{0.000031 \cdot z^3 + 0.000066 \cdot z^2 - 0.000076 \cdot z - 0.000017}{z^4 - 3.304319 \cdot z^3 + 3.93179 \cdot z^2 - 1.950505 \cdot z + 0.323034}.$$

$$Wr(z) = 251.0 - \frac{250.0}{z}, \qquad Wz2(z) = \frac{Wo2(z) \cdot Wr(z)}{1 + Wo2(z) \cdot Wr(z)}.$$

$$Wz(z) = \frac{.7781e\text{-}2 \cdot z^4 + .8816e\text{-}2 \cdot z^3 - .3558e\text{-}1 \cdot z^2 + .1473e\text{-}1 \cdot z + .4250e\text{-}2}{z^5 - 3.297 \cdot z^4 + 3.941 \cdot z^3 - 1.986 \cdot z^2 + .3378 \cdot z + .4250e\text{-}2}$$

$$\lim_{z \to 1} Wz2(z) \;\; \mathrm{float}, 3 \;\rightarrow 1. \qquad Hz2(z) = Wz2(z) \cdot \frac{z}{z-1}$$

$$Hz2(z) = \frac{.7781e\text{-}2 \cdot z^5 + .8816e\text{-}2 \cdot z^4 - .3558e\text{-}1 \cdot z^3 + .1473e\text{-}1 \cdot z^2 + .4250e\text{-}2 \cdot z}{z^6 - 4.297 \cdot z^5 + 7.237 \cdot z^4 - 5.927 \cdot z^3 + 2.324 \cdot z^2 - .3335 \cdot z - .4250e\text{-}2}.$$

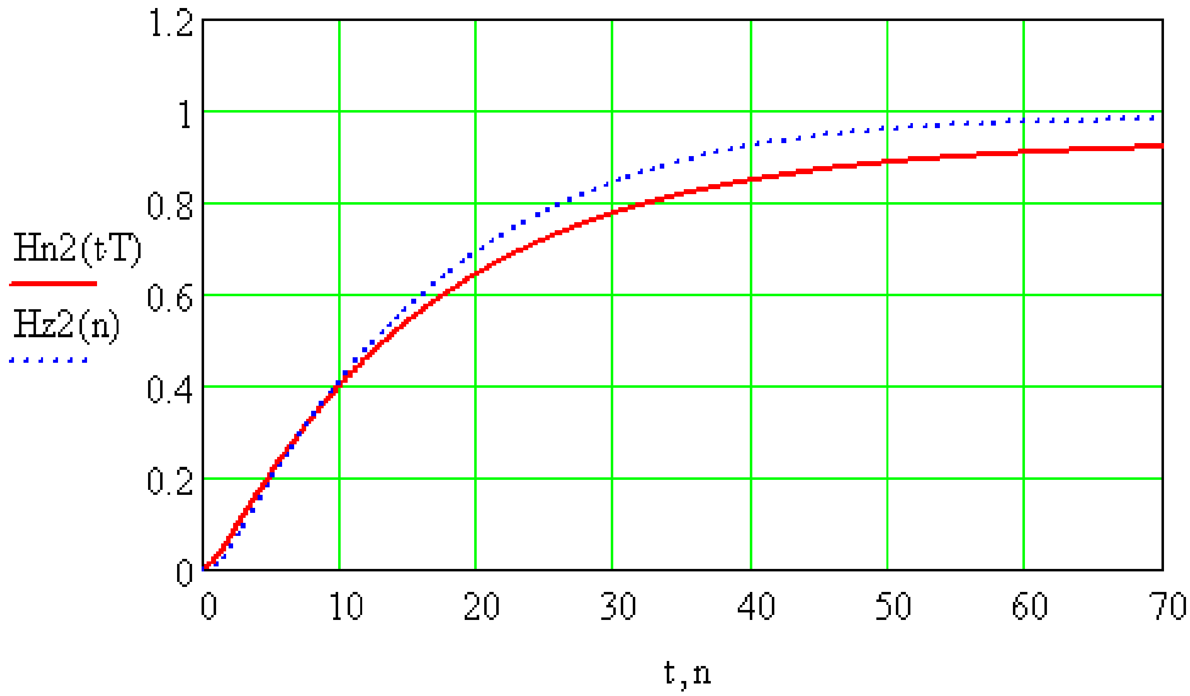

Рисунок 8 – Сравнительные графики переходных функций замкнутых непрерывной Hn2(t) и цифровой Hz2(n) систем при максимальной нагрузке.

Выводы

1. Исследование фильтрующих свойств непрерывной системы управления с оптимальными параметрами при различных нагрузках позволили найти период квантования непрерывной регулируемой величины, обеспечивающей отсутствие потери информации при ее дискретном измерении.

2. При получении дискретной передаточной функции ее коэффициенты зависят от периода квантования. Чем меньше период квантования, тем больше знаков следует брать при их вычислении. Нам пришлось брать шесть знаков после запятой, поскольку первые четыре – нули.

3. Приведенные в [1] переходные функции замкнутой непрерывной системы с оптимальными параметрами практически не отличаются от полученных для дискретной цифровой системы с теми же параметрами в данной работе, что позволяет быть уверенным в правильности расчетов и

использовать их для практической реализации.

Литература

1. Пугачев В. И. Метод расчета и оптимизации параметров системы управления с сервомотором постоянной скорости. Журнал научных публикаций аспирантов и докторантов № 5, Курск, май 2010 г.

2. Пугачев В. И. Теория автоматического управления (использование Mathcad при анализе и синтезе систем управления): учеб. пособие /Кубан. гос. технол. у-нт. – Краснодар: Изд. КубГТУ, 2006. – 140 с.

3. Пугачев В.И. Теория автоматического управления: учеб. пособие /Кубан. гос. технол. у-нт; Краснодар, 2005. – Раздел «Цифровые системы управления». – 100 с..

References

1. Pugachev V. I. Metod rascheta i optimizacii parametrov sistemy upravlenija s servomotorom postojannoj skorosti. Zhurnal nauchnyh publi-kacij aspirantov i doktorantov № 5, Kursk, maj 2010 g.

2. Pugachev V. I. Teorija avtomaticheskogo upravlenija (ispol'zovanie Mathcad pri analize i sinteze sistem upravlenija): ucheb. posobie /Kuban. gos. tehnol. u-nt. – Krasnodar: Izd. KubGTU, 2006. – 140 s.

3. Pugachev V.I. Teorija avtomaticheskogo upravlenija: ucheb. posobie /Kuban. gos. tehnol. u-nt; Krasnodar, 2005. – Razdel «Cifrovye sistemy upravlenija». – 100 s..