

УДК 681.5.034.2

UDC 681.5.034.2

05.00.00 Технические науки

Engineering

**ДИНАМИЧЕСКАЯ ОПТИМИЗАЦИЯ ПРОЦЕССА СУШКИ ЗЕРНА С ПОМОЩЬЮ НЕПРЕРЫВНОЙ СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ**

**DYNAMIC OPTIMIZATION OF GRAIN DRYING PROCESSES USING A CONTINUOUS MANAGEMENT SYSTEM**

Берестин Николай Константинович  
аспирант

Berestin Nikolay Konstantinovich  
Postgraduate

*Кубанский Государственный Технологический  
Университет, Краснодар, Россия*

*Kuban State University of Technology, Krasnodar,  
Russia*

В статье рассматривается динамическая оптимизация процесса сушки зерна путем правильного подбора требуемых параметров. Проведены расчеты оптимальных параметров управляющего устройства

The article considers the dynamic optimization of the drying process of grain by proper selection of the required parameters. The calculations of the optimal parameters of the control device

Ключевые слова: ОПТИМИЗАЦИЯ, УСТОЙЧИВОСТЬ, ОПТИМАЛЬНЫЕ ПАРАМЕТРЫ, ПЕРЕДАТОЧНАЯ ФУНКЦИЯ, ПЕРЕХОДНАЯ ФУНКЦИЯ

Keywords: OPTIMIZATION, STABILITY, OPTIMAL PARAMETERS, TRANSFER FUNCTION, TRANSITION FUNCTION

**Doi: 10.21515/1990-4665-124-066**

Переходный процесс в промышленной системе управления должен иметь определённый характер, диктуемый требованиями технологии производства. Следовательно, условие устойчивости системы управления является необходимым, но не достаточным для использования её в промышленных целях [1].

Задача настройки системы автоматического управления (САУ) состоит в том, чтобы установить значения настроечных параметров управляющего устройства, обеспечивающие требуемое оптимальное качество управления.

В качестве критерия оптимальности при этом используют различные требования, например:

1) максимальное отклонение регулируемой величины от заданного значения должно быть минимальным, т.е. САУ должна максимально фильтровать возмущающие воздействия;

- 2) длительность переходного процесса должна быть минимальной;
- 3) затухание переходного процесса должно быть интенсивным;
- 4) запас устойчивости САУ по модулю и фазе должен быть наибольшим;
- 5) интеграл по времени от отклонения от нового установившегося значения должен быть минимальным и т. д [2].

Таким образом, существуют конкурирующие свойства системы и переходных процессов в ней. В этом смысле выбор настройки управляющего устройства является типичной задачей многокритериальной оптимизации.

В существующих методах оптимизации, как правило, используют два критерия оптимальности. Выбирают настройку управляющего устройства, обеспечивающую экстремальное значение одного из критериев, при наличии ограничений на другую.

Современные управляющие устройства реализуются в несвязанном виде, что облегчает их настройку, но формул для их реализации нет. Получим формулы для оптимизации управляющих устройств с несвязанными параметрами.

Если расширенная АФХ разомкнутой САУ проходит на комплексной плоскости через точку  $-1, j0$ , то замкнутая система будет обладать требуемой относительной степенью затухания. Эта величина является целевой функцией оптимизации [3].

Пусть управляющее устройство имеет передаточную функцию:

$$W_r(p) = K_p + \frac{1}{T_i \cdot p}, \quad \text{а объект управления } W_o(p).$$

Если обозначить через

$$\psi = \frac{A_1 - A_2}{A_1} = 1 - \frac{A_2}{A_1} = 1 - \frac{C e^{-\alpha(t+T)} \sin[\beta(t+T)]}{C e^{-\alpha(t+T)} \sin \beta t} = 1 - e^{-\alpha T}$$

и учесть, что  $T = \frac{2\kappa}{\beta}$ , то, обозначив  $\frac{\alpha}{\beta} = m$ , можно записать:  $\psi = 1 - e^{-2\pi m}$ ,

$$\text{или } m = \frac{-\ln(1 - \psi)}{2\pi}.$$

Для получения расширенной АФХ необходимо в передаточную функцию подставить  $p = (i - m) \cdot w$ .

Для обеспечения требуемой относительной степени затухания необходимо, чтобы выполнялось условие:

$$W_r(m, iw)W_o(m, iw) = -1, \text{ или } -W_r(m, iw) = \frac{1}{W_o(m, iw)}. \quad (1)$$

Обозначим

$$\frac{1}{W_o(m, iw)} = Wob(i, w) = \text{Re}(Wob(i, w)) + j \cdot \text{Im}(Wob(i, w)).$$

$$K_p + \frac{1}{T_i \cdot p} = \frac{C_o + C_1 \cdot p}{p}, \text{ где } K_p = C_1, C_o = 1/T_i. \quad (2)$$

С учетом обозначений (2) выражение (1) можно записать так:

$$-C_o - (i - m) \cdot w \cdot C_1 = (i - m) \cdot w \cdot \text{Re}(Wob(i, w)) + i \cdot (i - m) \cdot \text{Im}(Wob(i, w)),$$

или:

$$-C_o + m \cdot w \cdot C_1 - i \cdot w \cdot C_1 = i \cdot w \cdot \text{Re}(Wob(i, w)) - m \cdot w \cdot \text{Re}(Wob(i, w)) - i \cdot w \cdot \text{Im}(Wob(i, w)) - w \cdot \text{Im}(Wob(m, w)).$$

Отделим вещественные и мнимые части последнего выражения:

$$\begin{aligned} -C_o + m \cdot w \cdot C_1 &= -m \cdot w \cdot \text{Re}(Wob(i, w)) - w \cdot \text{Im}(Wob(m, w)), \\ -i \cdot w \cdot C_1 &= i \cdot w \cdot \text{Re}(Wob(i, w)) - i \cdot m \cdot w \cdot \text{Im}(Wob(i, w)). \end{aligned} \quad (3)$$

Из выражений (3):

$$C_1(w) = m \text{Im}(Wob(i, w)) - \text{Re}(Wob(i, w)).$$

Подставив значение  $C_1$  во вторую часть (3), получим:

$$\begin{aligned} -C_o + m^2 \cdot w \cdot \text{Im}(Wob(i, w)) - m \cdot w \cdot \text{Re}(Wob(i, w)) &= \\ -m \cdot w \cdot \text{Re}(Wob(i, w)) - w \cdot \text{Im}(Wob(i, w)) & \end{aligned}$$

откуда

$$C_0 = m^2 \cdot w \cdot \text{Im}(W_{ob}(i, w)) + w \cdot \text{Im}(W_{ob}(i, w)) = (m^2 + 1) \cdot \text{Im}(W_{ob}(i, w)). \quad (4)$$

Линию равной степени затухания в плоскости координат управляющего устройства можно построить, изменяя частоту от нуля до частоты среза замкнутой системы управления.

$$C_0 C_1(w) = F(C_1(w)).$$

Для случая одного параметра  $K_r$  достаточно найти точку пересечения обратной расширенной АФХ объекта с отрицательной осью абсцисс.

$$C_1(w) = -\text{Re}(W_{ob}(i, w)).$$

Для случая двух параметров настройки вводится дополнительная функция цели: минимум интеграла то отклонения регулируемой величины от нового установившегося значения:

$$\int_0^{\infty} |\varepsilon(t)| dt = \min.$$

Для случая трех параметров, задаваясь отношением  $T_d/T_i = \alpha$ , получим следующие расчетные формулы:

$$C_0(w) = 0,5 [ \alpha \cdot \text{Im}(W_{ob}(i, w)) + \sqrt{\alpha^2 \cdot \text{Im}(W_{ob}(i, w))^2 + 4 \cdot a \cdot w \cdot \alpha} ] ;$$

$$C_1(w) = m \cdot \text{Im}(W_{ob}(i, w)) - \text{Re}(W_{ob}(i, w)) + \frac{2 \cdot m \cdot w \cdot \alpha}{C_0(w)},$$

$$a = w(m^2 + 1).$$

Процедура поиска оптимальных параметров управляющего устройства предполагает наличие объекта управления и управляющего устройства. В нашем случае имеется сервомотор постоянной скорости, перемещающий заслонку на подаче воздуха, изменяющий положение заслонки от полного закрытия до полного открытия за 20 секунд. Считая исполнительный механизм интегрирующим звеном, его передаточная функция:

$$W_c(p) = \frac{1}{T_c \cdot p} = \frac{1}{20 \cdot p}.$$

Отнесём сервомотор к объекту управления и найдем оптимальные параметры управляющего устройства, обеспечивающие заданную относительную степень затухания и минимум интеграла по времени от отклонения регулируемой величины от нового установившегося значения.

Математическая модель объекта имеет передаточную функцию со знаком минус. Это обстоятельство требует от регулятора правильного знака действия, т.е. также отрицательного знака в передаточной функции. Поскольку нас не интересует вид управляющего воздействия, то в расчетах можно не учитывать отрицательные знаки.

Рекомендуемое отношение  $T_i/T_d$  для ПИД – закона регулирования (0÷0,5). Желаемая относительная степень затухания переходного процесса

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

Передаточная функция объекта с учетом сервомотора:

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

Обозначим передаточную функцию объекта с учетом сервомотора:

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

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

Обратная передаточная функция объекта с учетом сервомотора:

$$W_{ob}(p) = \frac{1}{W_{oc}(p)}, \quad W_{ob}(p) = 8863 \cdot p^4 + 3629 \cdot p^3 + 404.0 \cdot p^2 + 13.33 \cdot p.$$

Сделав подстановку  $p = (i - m) \cdot w$  в обратной передаточной функции объекта с учетом сервомотора, получаем:

$$W_{ob}(p) = 8863 \cdot (e^p)^{10} \cdot p^4 + 3629 \cdot (e^p)^{10} \cdot p^3 + 404.0 \cdot (e^p)^{10} \cdot p^2 + 13.33 \cdot (e^p)^{10} \cdot p,$$

$$W_{ob}(i, w) = .6366e - 18 \cdot e^{1273e-18(.7854e20i-.5756e20)w} \cdot w.$$

$$\cdot (F3(i, w) - F4(i, w) - F5(i, w) - F6(i, w) ) ,$$

где:

$$F3(i, w) = - .9302e21 \cdot w \cdot i + .3409e21 \cdot w + .2094e20 \cdot i - .1535e20 ,$$

$$F4(i, w) = - .1253e23 w^2 \cdot i^2 + .9187e22 w^2 \cdot i - .2244e22 w^2 + .6346e21 \cdot w \cdot i^2 ,$$

$$F5(i, w) = - .2193e23 \cdot w^3 \cdot i + .4018e22 \cdot w^3 + .5700e22 \cdot w^2 \cdot i^3 ,$$

$$F6(i, w) = .1392e23 \cdot w^3 \cdot i^4 - .4082e23 \cdot w^3 \cdot i^3 + .4487e23 \cdot w^3 \cdot i^2 .$$

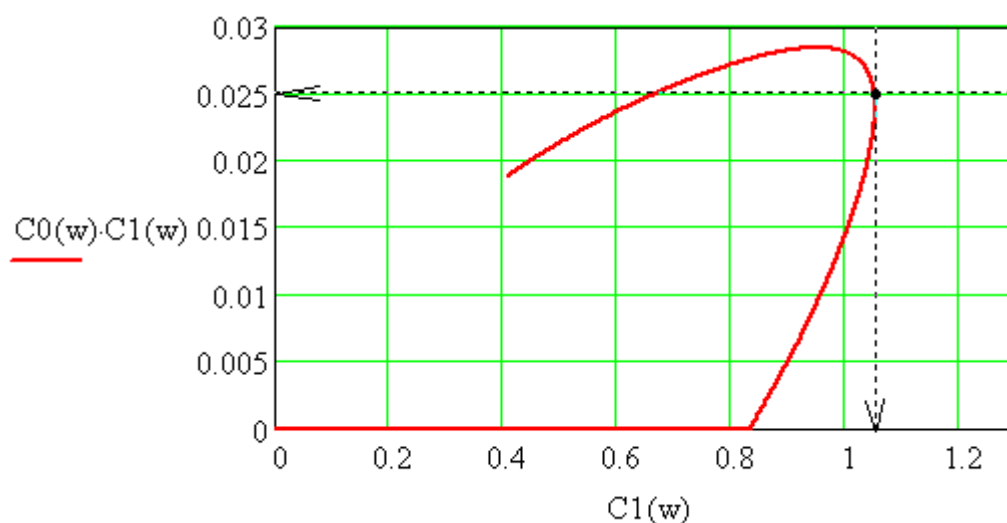


Рисунок 1 - Линия требуемой относительной степени затухания  $\psi = 0,99$

Оптимальные параметры управляющего устройства:

$$K_p = 1.05, \quad T_i = \frac{K_p}{0.025}, \quad T_i = 42.0, \quad T_d = T_i \cdot \alpha, \quad T_d = 21.0.$$

Необычность линии равной степени затухания в том, что она поворачивается против часовой стрелки, а точка правее максимума дает параметры управляющего устройства, при которых замкнутая система не обладает требуемой относительной степенью затухания. Убедимся в этом.

$$W_r(p) = K_p + T_d \cdot p + \frac{1}{T_i \cdot p}, \quad W_r(p) = 1.05 + 21.0 \cdot p + \frac{.2381e-1}{p} .$$

$$W_{raz}(p) = W_r(p) \cdot W_{oc}(p).$$

$$W_{\text{раз}}(p) = .7500e-5 \cdot \frac{e^{(-10.) \cdot p} \cdot (.1050e6 \cdot p + .2100e7 \cdot p^2 + 2381.)}{(6647. \cdot p^3 + 2722. \cdot p^2 + 303. \cdot p + 10.) \cdot p^2}.$$

Оценить устойчивость замкнутой системы с чистым запаздыванием аналитически нельзя, поскольку трансцендентная функция имеет бесчисленное множество корней.

Построим амплитудно-фазовую характеристику разомкнутой системы (рисунок 2) и, если она устойчива, то построим переходную функцию замкнутой системы (рисунок 3).

$$W_{\text{раз}}(i, w) = .7500e-5 \cdot \frac{e^{(-10.) \cdot w i} \cdot (.1050e6 \cdot w \cdot i + .2100e7 \cdot w^2 \cdot i^2 + 2381.)}{(6647. \cdot w^3 \cdot i^3 + 2722. \cdot w^2 \cdot i^2 + 303. \cdot w \cdot i + 10.) \cdot w^2 \cdot i^2}$$

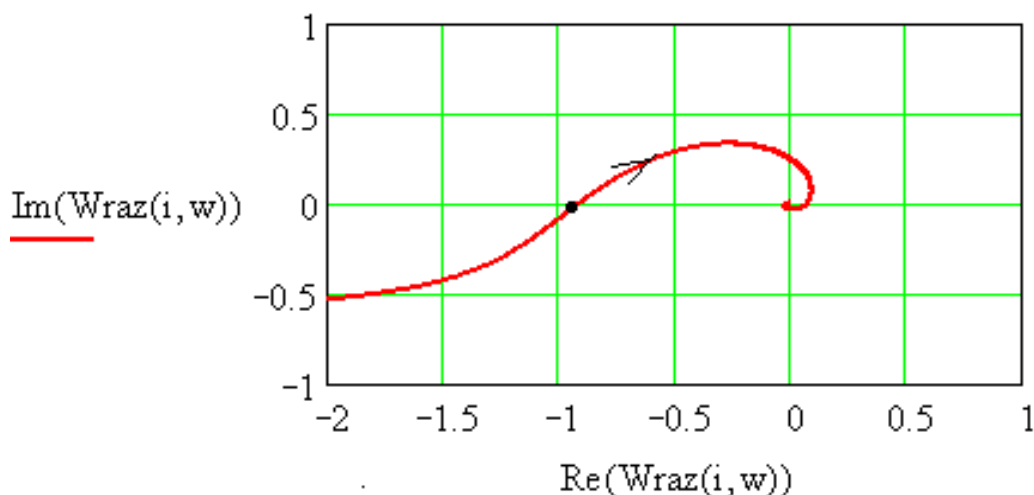


Рисунок 2 - График амплитудно-фазовой характеристики разомкнутой системы

Из графика видно, что система устойчива, но находится на границе устойчивости. Это позволяет использовать построение переходной функции по обобщенной вещественной частотной характеристике.

$$W_{\text{зpid}}(p) = \frac{W_{\text{ос}}(p) \cdot W_{\text{r}}(p)}{1 + W_{\text{ос}}(p) \cdot W_{\text{r}}(p)}$$

$$Wzpid(p) = \frac{3 \cdot (.1050e6 \cdot p + .2100e7 \cdot p^2 + 2381.) \cdot e^{(-10.)p}}{F7(p) + F8(p)}$$

где:

$$F7(p) = .2659e10 \cdot p^5 + .1089e10 \cdot p^4 + .1212e9 \cdot p^3 + .4000e7 \cdot p^2,$$

$$F8(p) := .3150e6 \cdot e^{(-10.)p} \cdot p + .6300e7 \cdot e^{(-10.)p} \cdot p^2 + 7143. \cdot e^{(-10.)p}$$

$$Wzpid(i, w) = \frac{.3150e6 \cdot w \cdot i + .6300e7 \cdot w^2 \cdot i^2 + 7143.}{F9(i, w) + F10(i, w)}$$

где:

$$F9(i, w) = .2659e10 w^5 \cdot i^5 + .1089e10 w^4 \cdot i^4 + .1212e9 w^3 \cdot i^3 + .4000e7 w^2 \cdot i^2,$$

$$F10(i, w) = .3150e6 e^{(-10.)wi} \cdot w \cdot i + .6300e7 e^{(-10.)wi} \cdot w^2 \cdot i^2 + 7143. \cdot e^{(-10.)wi}$$

$$Hzpid(t) = \frac{2}{\pi} \cdot \int_0^3 \frac{\text{Re}(Wzpid(i, w)) \cdot \sin(w \cdot t)}{w} dw$$

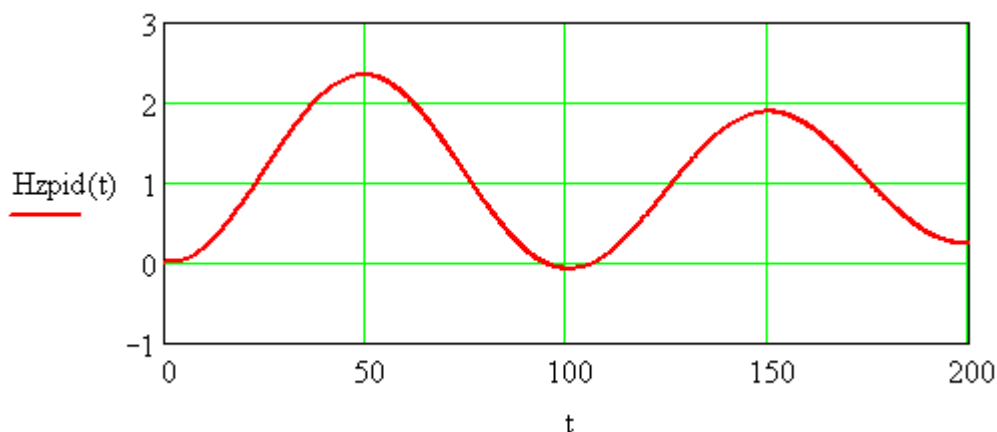


Рисунок 3 - График переходной функции замкнутой системы

Можно сделать вывод, что при поиске оптимальных параметров следует обращать внимание на необычность линии равной степени затухания и результаты расчетов проверять на устойчивость.

Это связано с повышением астатизма системы до второго порядка за счет интегрального сервомотора.



Попытаемся найти решение задачи путем снижения значения  $\alpha$ .

Решение найдено при  $\alpha_w = 0.0001$  (рисунок 4).

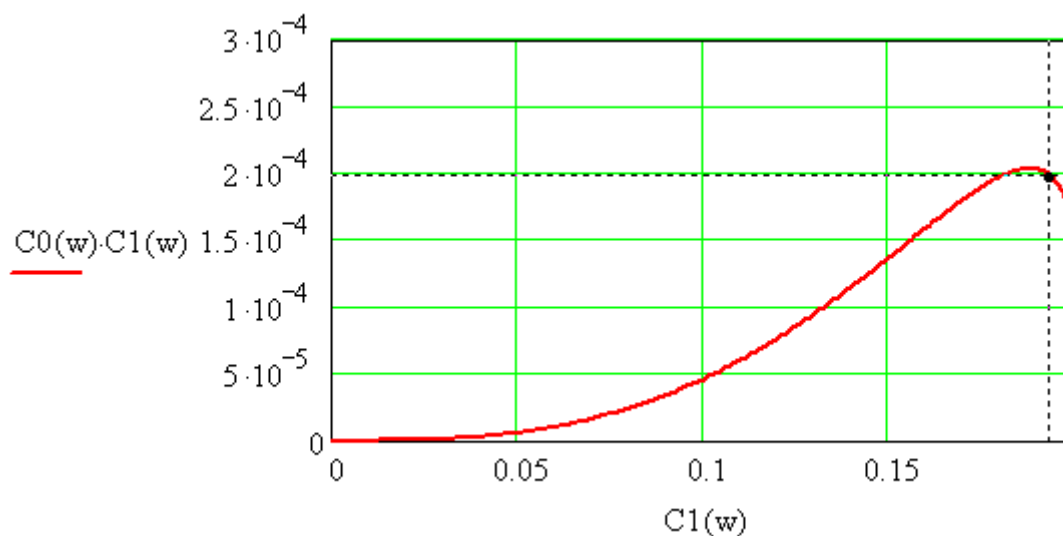


Рисунок 4 - Линия требуемой относительной степени затухания  $\psi = 0,99$

Оптимальные параметры управляющего устройства:

$$K_p = 0.194, \quad T_i = \frac{K_p}{0.0002}, \quad T_i = 970, \quad T_d = T_i \cdot \alpha, \quad T_d = .970e-1,$$

$$W_r(p) = K_p + T_d \cdot p + \frac{1}{T_i \cdot p}, \quad W_r(p) = .194 + .970e-1 \cdot p + \frac{.1031e-2}{p}$$

$$W_{raz}(p) = W_r(p) \cdot W_{oc}(p)$$

$$W_{raz}(p) := \frac{e^{(-10.)p} \cdot [.7500e-6 \cdot (.1940e6 \cdot p + .9700e5 \cdot p^2 + 1031.)]}{p^2 \cdot (6647. \cdot p^3 + 2722. \cdot p^2 + 303. \cdot p + 10.)}$$

$$W_{raz}(i, w) = e^{(-10.)wi} \cdot \frac{.14550000 \cdot w \cdot i + .72750000e-1 \cdot w^2 \cdot i^2 + .7732500e-3}{(6647. \cdot w^3 \cdot i^3 + 2722. \cdot w^2 \cdot i^2 + 303. \cdot w \cdot i + 10.) \cdot w^2 \cdot i^2}$$

$$w = 0.0, 0.0 + 0.0001 .. 1$$

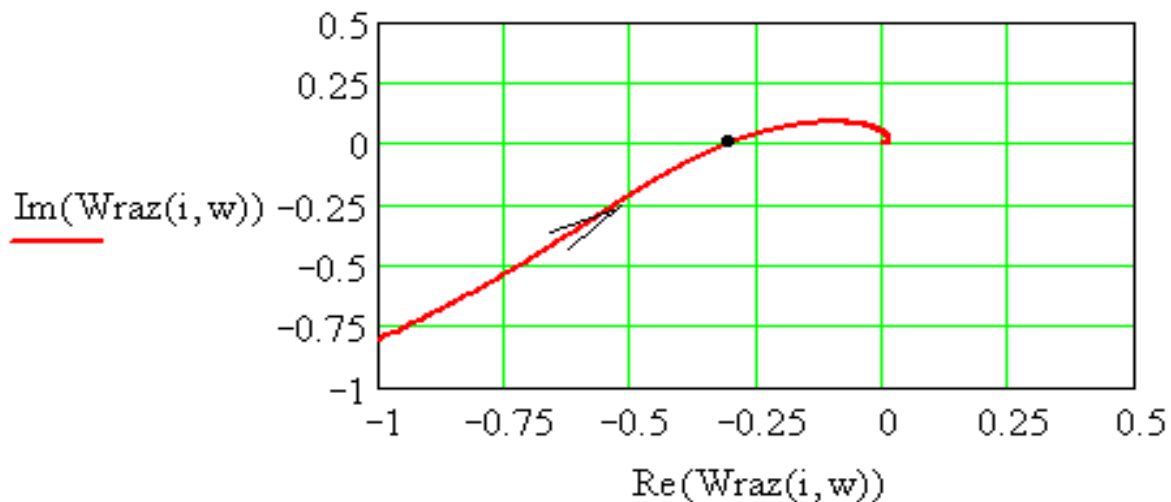


Рисунок 5 - График амплитудно-фазовой характеристики разомкнутой системы

Замкнутая система устойчива. Проверим исследование её динамики.

$$W_{zpid}(p) = \frac{W_{oc}(p) \cdot W_r(p)}{1 + W_{oc}(p) \cdot W_r(p)}$$

$$W_{zpid}(p) = \frac{3 \cdot (.1940e6 \cdot p + .9700e5 \cdot p^2 + 1031.) \cdot e^{(-10.)p}}{FF7(p) + FF8(p)}$$

где:

$$FF7(p) = .2659e11 \cdot p^5 + .1089e11 \cdot p^4 + .1212e10 \cdot p^3 + .4000e8 \cdot p^2,$$

$$FF8(p) := .5820e6 \cdot e^{(-10.)p} \cdot p + .2910e6 \cdot e^{(-10.)p} \cdot p^2 + 3093. \cdot e^{(-10.)p}$$

$$W_{zpid}(i, w) = \frac{(.5820e6 \cdot w \cdot i + .2910e6 \cdot w^2 \cdot i^2 + 3093.) \cdot e^{(-10.)wi}}{F9(i, w) + F10(i, w)}$$

где:

$$FF9(i, w) = .2659e11 \cdot w^5 \cdot i^5 + .1089e11 \cdot w^4 \cdot i^4 + .1212e10 \cdot w^3 \cdot i^3 + .4000e8 \cdot w^2 \cdot i^2,$$

$$FF10(i, w) = .5820e6 \cdot e^{(-10.)wi} \cdot w \cdot i + .2910e6 \cdot e^{(-10.)wi} \cdot w^2 \cdot i^2 + 3093. \cdot e^{(-10.)wi}$$

$$Hzpid(t) = \frac{2}{\pi} \cdot \int_0^3 \frac{\text{Re}(Wzpid(i, w)) \cdot \sin(w \cdot t)}{w} dw$$

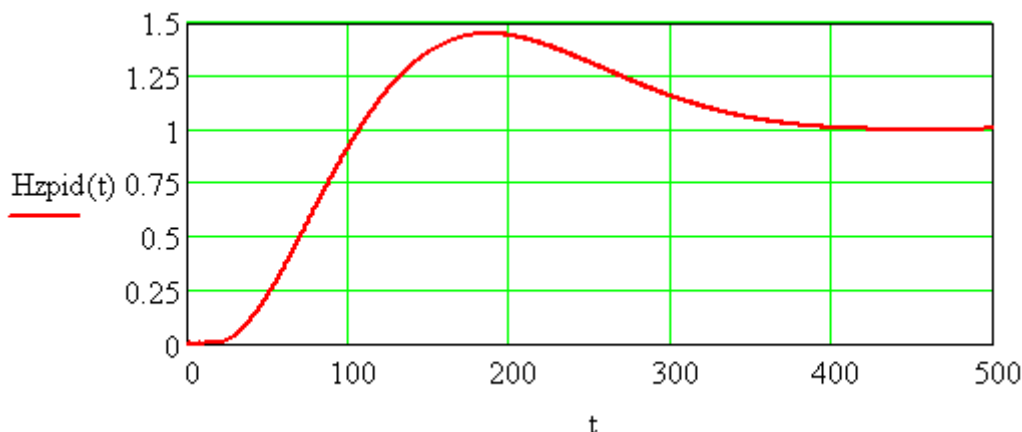


Рисунок 6 - График переходной функции замкнутой системы

Как следует из графика переходной функции замкнутой системы, её динамика неудовлетворительна, динамический заброс 48 процентов, что не может быть использовано в производственных условиях.

Рассмотрим влияние снижения порядка астатизма замкнутой системы путем охвата сервомотора обратной связью.

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

При охвате сервомотора обратной связью его передаточная функция будет:

$$W_c(p) = \frac{W_c(p)}{1 + W_c(p)}, \quad W_c(p) = \frac{1}{20 \cdot p + 1}, \quad W_{oc}(p) = W_o(p) \cdot W_c(p).$$

$$W_{oc}(p) = 1.5 \cdot \frac{e^{(-10) \cdot p}}{(664.7 \cdot p^3 + 272.2 \cdot p^2 + 30.3 \cdot p + 1) \cdot (20 \cdot p + 1)}$$

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

$$Wob(p) = \frac{8863.}{e^{(-10.)p}} \cdot p^4 + \frac{4072.}{e^{(-10.)p}} \cdot p^3 + \frac{585.5}{e^{(-10.)p}} \cdot p^2 + \frac{33.53}{e^{(-10.)p}} \cdot p + \frac{.6667}{e^{(-10.)p}}$$

Заменяв в Wob(p)  $p = (i-m)w$ , получаем:

$$Wob(i,w) = .1000e-19 \cdot (F15(i,w)) \cdot e^{.5000e-18 \cdot w(.2000e20i-.1466e20)}$$

где:

$$F15(i,w) = F11(i,w) + F12(i,w) + F13(i,w) + F14(i,w).$$

Здесь:

$$F11(i,w) = .8863e24 \cdot w^4 \cdot i^4 - .2598e25 \cdot w^4 \cdot i^3 + .2857e25 \cdot w^4 \cdot i^2,$$

$$F12(i,w) = .1396e25 \cdot w^4 \cdot i + .2558e24 \cdot w^4 + .4072e24 \cdot w^3 \cdot i^3,$$

$$F13(i,w) = .8954e24 \cdot w^3 \cdot i^2 + .6562e24 \cdot w^3 \cdot i - .1603e24 \cdot w^3 + .5855e23 \cdot w^2 \cdot i^2,$$

$$F14(i,w) = .8583e23 w^2 \cdot i + .3145e23 w^2 + .3353e22 w \cdot i - .2458e22 w + .6667e2,$$

$$\alpha_w = 0.1$$

$$w = 0.0, 0.0 + 0.0001 .. 0.06$$

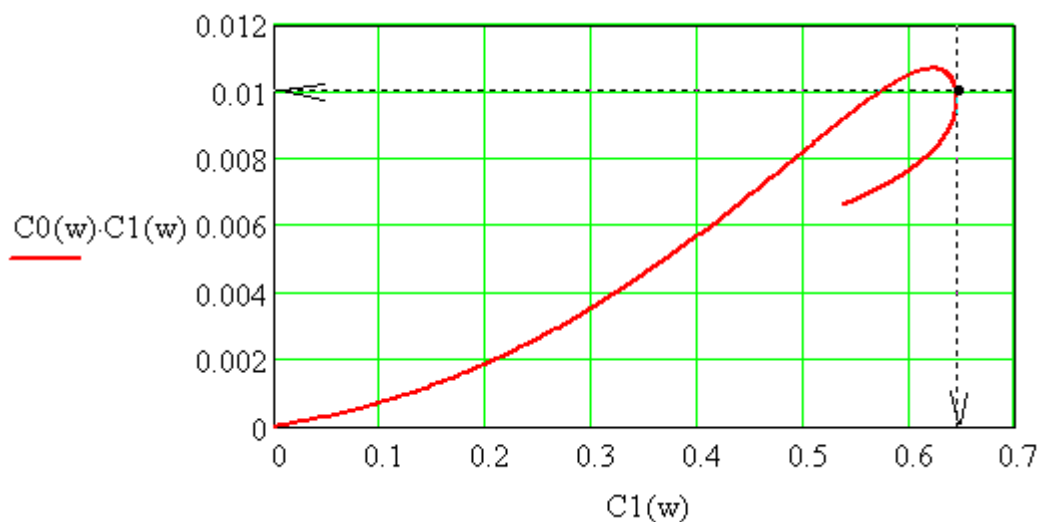


Рисунок 7 - Линия требуемой относительной степени затухания  $\psi = 0,99$

Как видно из результатов исследований, получить требуемую относительную степень затухания  $\psi = 0,99$  при  $T_d/T_i = 0,5$  не удалось. Положительный результат получен только для  $T_d/T_i = 0,1$ .

Оптимальные параметры управляющего устройства:

$$K_p = 0.65, \quad T_i = \frac{K_p}{0.01}, \quad T_i = 65.0, \quad T_d = T_i \cdot \alpha, \quad T_d = 6.50.$$

График переходной функции замкнутой системы с ПИД - регулятором и охватом сервомотора обратной связью построим по обобщенной вещественной частотной характеристике.

$$W_r(p) = K_p + T_d \cdot p + \frac{1}{T_i \cdot p}, \quad W_r(p) = .65 + 6.50 \cdot p + \frac{.1538e-1}{p}.$$

$$W_{zpid}(p) = \frac{W_{oc}(p) \cdot W_r(p)}{1 + W_{oc}(p) \cdot W_r(p)}.$$

$$W_{zpid}(p) = \frac{e^{(-10.)p} \cdot [3. \cdot (.3250e5 \cdot p + .3250e6 \cdot p^2 + 769.)]}{F16(p) + F17(p)},$$

где:

$$F16(p) := .1329e10 \cdot p^5 + .6109e9 \cdot p^4 + .8782e8 \cdot p^3 + .5030e7 \cdot p^2 + .1000e6 \cdot p,$$

$$F17(p) := .9750e5 \cdot e^{(-10.)p} \cdot p + .9750e6 \cdot e^{(-10.)p} \cdot p^2 + 2307. \cdot e^{(-10.)p}.$$

$$W_{zpid}(i, w) = \frac{(.9750e5 \cdot w \cdot i + .9750e6 \cdot w^2 \cdot i^2 + 2307.) \cdot e^{(-10.)wi}}{F18(i, w) + F19(i, w)},$$

где:

$$F18(i, w) = .1329e10 \cdot w^5 \cdot i^5 + .6109e9 \cdot w^4 \cdot i^4 + .8782e8 \cdot w^3 \cdot i^3 + .5030e7 \cdot w^2 \cdot i^2,$$

$$F19(i, w) = .1000e6w \cdot i + .9750e5e^{(-10)wi} \cdot w \cdot i + .9750e6e^{(-10)wi} \cdot w^2 \cdot i^2 + 2307: e^{(-10)wi}$$

$$H_{zpid}(t) := \frac{2}{\pi} \cdot \int_0^3 \frac{\text{Re}(W_{zpid}(i, w)) \cdot \sin(w \cdot t)}{w} dw$$

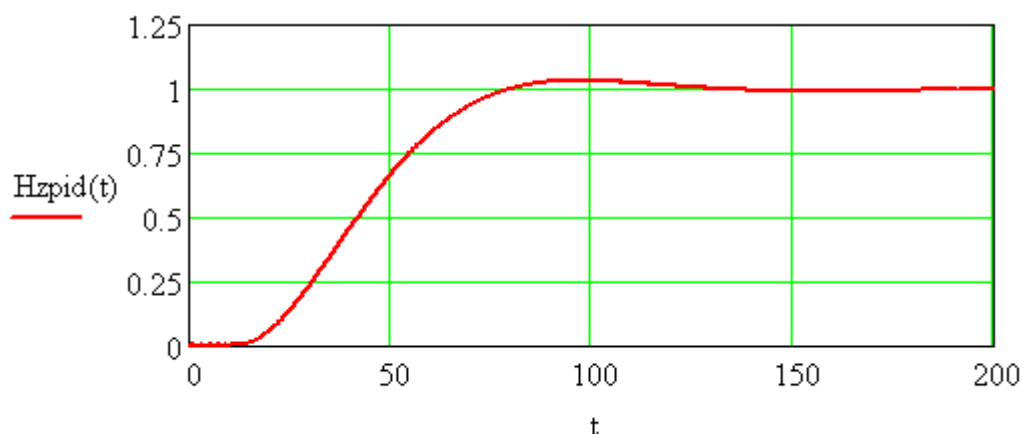


Рисунок 8 - График переходной функции замкнутой системы с ПИД - непрерывным регулятором при охвате сервомотора обратной связью

Из приведенного выше можно сделать вывод, что динамический заброс не превышает 4 процентов, т.е. охват сервомотора обратной связью позволяет использовать данную систему управления в промышленных целях.

Найдем частоту среза замкнутой системы с оптимальными параметрами управляющего устройства. Для этого построим амплитудно-частотную характеристику замкнутой системы.

Подставив в передаточную функцию замкнутой системы  $p = iw$ . получаем:

$$W_{zpid}(i, w) = \frac{(.9750e5 \cdot w \cdot i + .9750e6 \cdot w^2 \cdot i^2 + 2307.) \cdot e^{(-10.) \cdot w \cdot i}}{F18(i, w) + F19(i, w)}$$

Период квантования определяется по теореме В. А. Котельникова

$$W_{cpid} = 0.25, \quad T_{opid} = \frac{\pi}{W_{cpid}}, \quad T_{opid} = 12.6, \quad M = 1.$$

Период квантования, обеспечивающий отсутствие потери информации при измерении непрерывной величины дискретным способом, можно принять равным 10 с.

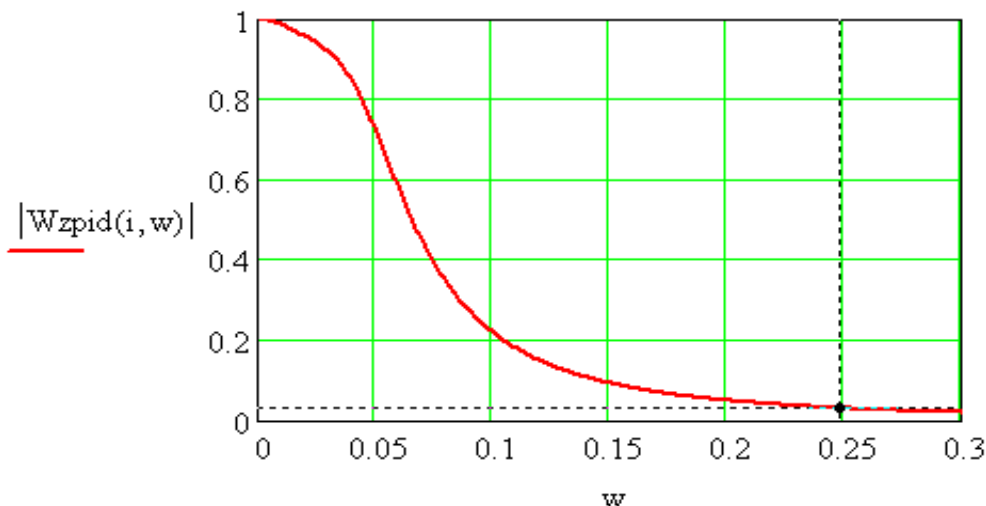


Рисунок 9 - График построим амплитудно-частотной характеристики замкнутой системы.

Проведем оптимизацию простого (пропорционального) закона управления.

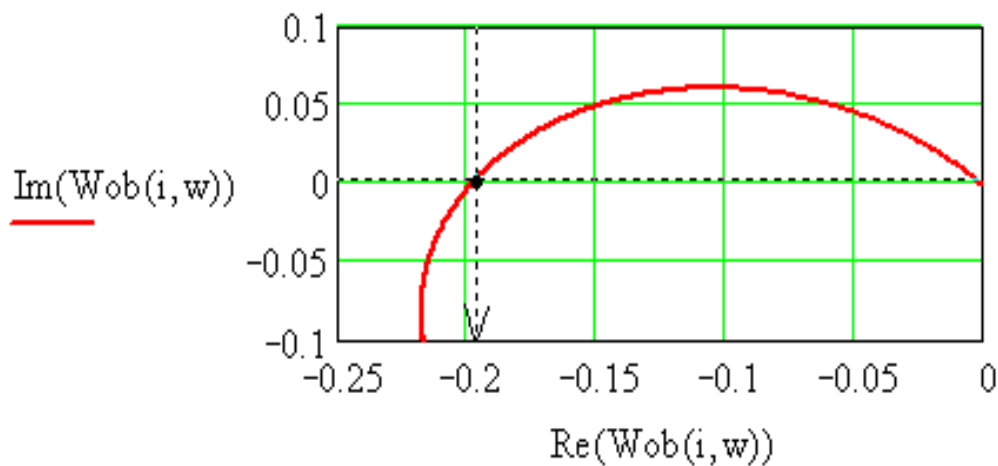


Рисунок 10 - График обратной расширенной АФХ объекта с учетом сервомотора

Оптимальный коэффициент усиления управляющего устройства

$$K_p = 0.196, \quad W_r(p) = 0.196, \quad W_{zp}(p) = \frac{W_{oc}(p) \cdot W_r(p)}{1 + W_{oc}(p) \cdot W_r(p)}$$

$$W_{zp}(p) = \frac{e^{(-10) \cdot p} \cdot 147.}{.1000e5 \cdot p + .3030e6 \cdot p^2 + .2722e7 \cdot p^3 + .6647e7 \cdot p^4 + 147. \cdot e^{(-10) \cdot p}}$$

Переходную функцию замкнутой системы с пропорциональным регулятором построим по обобщенной вещественной частотной характеристике:

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

где

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

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

$$H_{zp}(t) = \frac{2}{\pi} \cdot \int_0^3 \frac{\text{Re}(W_{zp}(i, w)) \cdot \sin(w \cdot t)}{w} dw$$

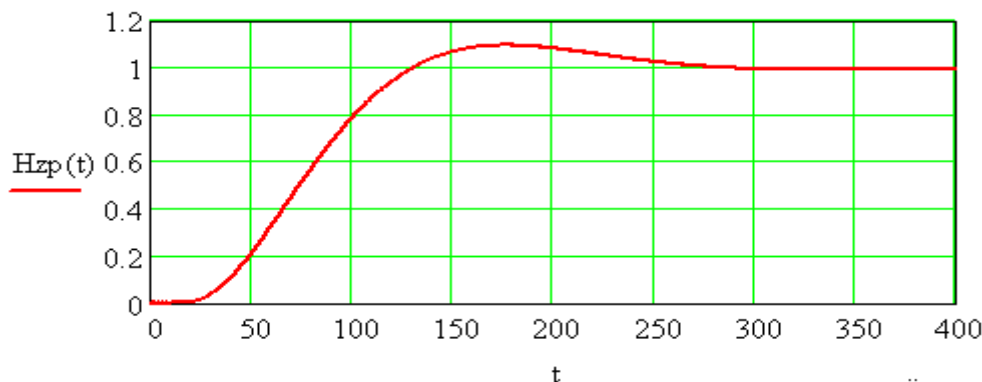


Рисунок 11 - График переходной функции замкнутой системы с пропорциональным регулятором:

Для расчета периода квантования, позволяющего измерять непрерывную величину дискретным способом без потери информации, найдем амплитудно-частотную характеристику замкнутой системы с П - регулятором:



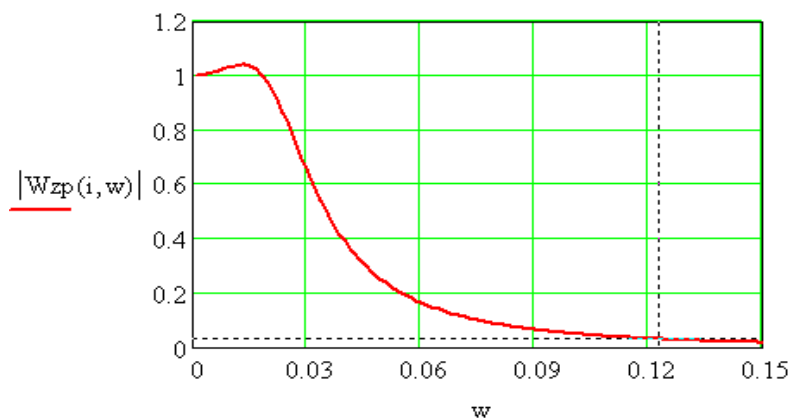


Рисунок 12 - График амплитудно-частотной характеристики замкнутой системы с П – регулятором.

Период квантования определим аналогично предыдущему случаю и он может быть не более 25,5 с.

$$W_{cpid} = 0.123, \quad T_{opid} = \frac{\pi}{W_{cpid}}, \quad T_{opid} = 25.5, \quad M = 1.034.$$

Как следует из расчетов, период квантования может быть выбран в 2 раза больше, что является преимуществом при использовании контактной системы управления приводом.

Для выбора окончательного варианта закона управления сравним графики переходных функций систем с пропорциональным регулятором и астатической системой второго порядка и системы с ПИД - регулятором с сервомотором, охваченным обратной связью.

Динамический заброс системы с ПИД – регулятором - 4%, с П - регулятором 9%. Длительность переходного процесса с ПИД – регулятором в 2 раза меньше. Более сложной является система с сервомотором, охваченным обратной связью и сложным ПИД – регулятором. Выбор варианта – за пользователем.

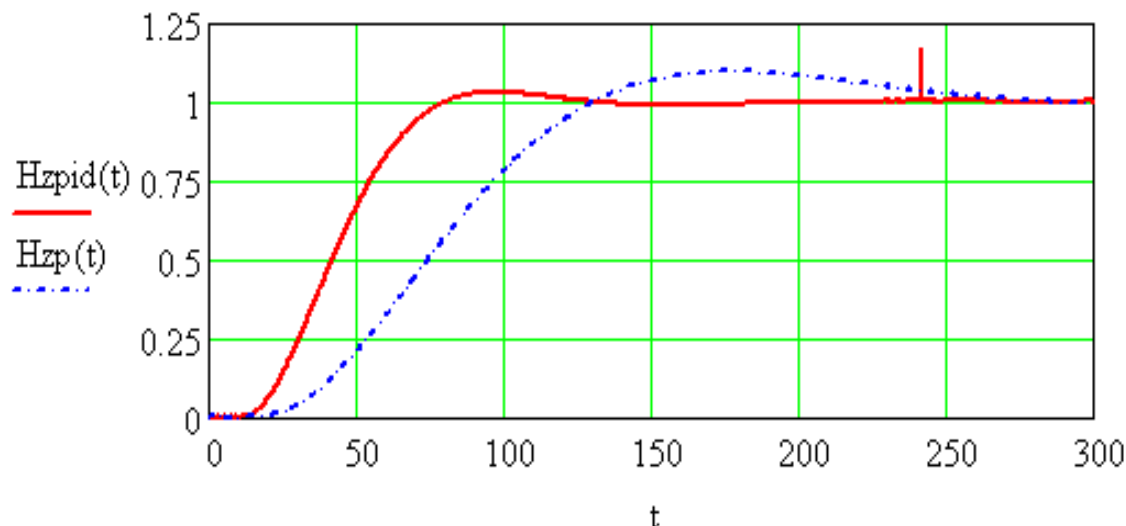


Рисунок 13 - Сравнительные графики переходных функций систем с пропорциональным  $H_{zp}(t)$  и ПИД - регулятором  $H_{zpid}(t)$  с сервомотором, охваченным обратной связью

#### Выводы

1. При оптимизации параметров управляющего устройства по расширенным амплитудно-фазовым характеристикам для объектов с чистым запаздыванием и высокой степенью знаменателя передаточной функции особое внимание следует уделять направлению вращения линии требуемой относительной степени затухания. Если оно происходит против часовой стрелки, то точка правее максимума не является искомой точкой, обеспечивающей требуемую относительную степень затухания.

2. При оптимизации параметров управляющего устройства по расширенным амплитудно-фазовым характеристикам для объектов с чистым запаздыванием и высокой степенью знаменателя передаточной функции эффективность влияния производной в законе управления, которая должна повышать быстродействие и запас устойчивости, снижается или вообще ухудшает динамику замкнутой системы.

3. Весьма эффективным в системах с интегрирующим сервомотором и ПИД – законом управления является охват его единичной обратной свя-

зью, что позволяет вводить производную в закон управления и снижать динамический заброс.

4. Если нет необходимости охватывать сервомотор обратной связью, то следует использовать самый простой П – закон управления.

### **Литература**

1. Асмаев М.П. Автоматизированные информационно-управляющие системы: учебное пособие /М.П.Асмаев, Д.Л.Пиотровский - Краснодар: изд-во КубГТУ, 2009.
2. Асмаев М.П. Автоматизированное управление в технических системах: учебное пособие/ М.П.Асмаев, Д.Л.Пиотровский, А.И.Рябов - Краснодар: изд-во КубГТУ, 2002.
3. Пугачев В.И. Цифровая реализация системы управления процессом подогрева воздуха для сушки семян/В.И.Пугачев, Д.Л.Пиотровский // Политематический сетевой электронный научный журнал Кубанского государственного аграрного университета. - 2013. - № 91. - С. 432-444.

### **References**

1. Asmaev M.P. Avtomatizirovannye informacionno-upravljajushhie sistemy: uchebnoe posobie /M.P.Asmaev, D.L.Piotrovskij - Krasnodar: izd-vo KubGTU, 2009.
2. Asmaev M.P. Avtomatizirovannoe upravlenie v tehniceskix sistemah: uchebnoe posobie/ M.P.Asmaev, D.L.Piotrovskij, A.I.Rjabov - Krasnodar: izd-vo KubGTU, 2002.
3. Pugachev V.I. Cifrovaja realizacija sistemy upravlenija processom podogreva vozduha dlja sushki semjan/V.I.Pugachev, D.L.Piotrovskij // Politematicheskij setevoj jelektronnyj nauchnyj zhurnal Kubanskogo gosudarstvennogo agrarnogo universiteta. - 2013. - № 91. - S. 432-444.