

УДК 631.36-52

UDC 631.36-52

**СИНТЕЗ СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ ТЕМПЕРАТУРОЙ ВОЗДУХОПОДОГРЕВАТЕЛЯ ДЛЯ СУШКИ ЗЕРНА**

**SYNTHESIS OF CONTROL SYSTEMS OF THE AIR PREHEATER FOR GRAIN DRYING**

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

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

Ключевые слова: ЦИФРОВОЙ РЕГУЛЯТОР, ВОЗДУХОПОДОГРЕВАТЕЛЬ, СУШКА ЗЕРНА

Keywords: DIGITAL CONTROLLER, AIR PREHEATER, GRAIN DRYING

Воздухоподогреватели для сушки зерна широко используются на элеваторах, где не всегда имеется квалифицированный обслуживающий персонал, способный к реализации нестандартных элементов для создания адаптивной системы управления [1]. Поэтому актуальной является проблема создания системы управления с использованием стандартных промышленных элементов, обеспечивающей заданное качество управления при изменении параметров объекта в широких пределах при изменении нагрузки.

Поставим задачу поиска закона управления и его параметров, обеспечивающих апериодический переходный процесс при изменении параметров объекта в диапазоне, приведенном в [1], т.е. в четыре раза.

Рассмотрим случай минимальной нагрузки на печь, когда передаточная функция ее равна:

$$W_{\text{min}}(p) = \frac{48 \cdot p + 4.8}{2 \cdot p^2 + 11.2 \cdot p + 1}.$$

Передаточная функция измерителя температуры:

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

Передаточная функция сервомотора:

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

Отнеся измеритель к объекту, передаточную функцию его можно записать так:

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

$$W_{o1}(p) = \frac{48 \cdot p + 4.800}{40 \cdot p^3 + 226 \cdot p^2 + 31.20 \cdot p + 1}$$

Примем пропорционально-интегральный закон управления.

$$W_r(p) = K_p + \frac{1}{T_i \cdot p}$$

тогда передаточная функция замкнутой САУ будет:

$$W_{z1}(p) = \frac{W_{o1}(p) \cdot W_r(p)}{1 + W_{o1}(p) \cdot W_r(p)}$$

$$W_{z1}(p) = \frac{48 \cdot K_p \cdot p^2 \cdot T_i + 48 \cdot p + 4.80 \cdot K_p \cdot p \cdot T_i + 4.80}{A(p) + B(p)}$$

где:

$$A(p) = 40 \cdot p^4 \cdot T_i + 226 \cdot p^3 \cdot T_i + 31.2 \cdot p^2 \cdot T_i + T_i \cdot p$$

$$B(p) = 48 \cdot K_p \cdot p^2 \cdot T_i + 48 \cdot p + 4.80 \cdot K_p \cdot p \cdot T_i + 4.80$$

Характеристическое уравнение замкнутой САУ:

$$X_1(p) = 40 \cdot p^4 \cdot T_i + 226 \cdot p^3 \cdot T_i + 31.2 \cdot p^2 \cdot T_i + T_i \cdot p + 48 \cdot K_p \cdot p^2 \cdot T_i + 48 \cdot p + 4.80 \cdot K_p \cdot p \cdot T_i + 4.80$$

$$X1(p) \text{ coeffs, } p \rightarrow \begin{pmatrix} 4.80 \\ Ti + 48. + 4.80 \cdot Kp \cdot Ti \\ 31.2 \cdot Ti + 48. \cdot Kp \cdot Ti \\ 226. \cdot Ti \\ 40. \cdot Ti \end{pmatrix} b = \begin{pmatrix} 4.80 \\ Ti + 48. + 4.80 \cdot Kp \cdot Ti \\ 31.2 \cdot Ti + 48. \cdot Kp \cdot Ti \\ 226. \cdot Ti \\ 40. \cdot Ti \end{pmatrix}$$

$$a := \begin{pmatrix} b_4 \\ b_3 \\ b_2 \\ b_1 \\ b_0 \end{pmatrix} a \rightarrow \begin{pmatrix} 40. \cdot Ti \\ 226. \cdot Ti \\ 31.2 \cdot Ti + 48. \cdot Kp \cdot Ti \\ Ti + 48. + 4.80 \cdot Kp \cdot Ti \\ 4.80 \end{pmatrix}$$

$$X1(p) = a_0 \cdot p^4 + a_1 \cdot p^3 + a_2 \cdot p^2 + a_3 \cdot p + a_4$$

Степень характеристического уравнения  $n = 4$ ,  $k$  – индекс коэффициента в характеристическом уравнении.

Условие аperiodичности переходного процесса:

$$Ay(Kp, Ti) := \frac{(a_k)^2}{a_{k-1} \cdot a_{k+1}} - \left( \frac{n - k + 1}{n - k} \right)$$

$$k = 1, \quad Ay1(Kp) = \frac{514.7 - 26.67 \cdot Kp}{13. + 20. \cdot Kp}, \quad Ay1(Kp) \left| \begin{array}{l} \text{solve, } Kp \\ \text{float, } 4 \end{array} \right. \rightarrow 19.30$$

$$Kp1(Ti) = 19.30$$

$$k = 2, \quad Ay2(Kp, Ti) = \frac{14.04 \cdot Ti + 30.27 \cdot Kp \cdot Ti + 50.97 \cdot Ti \cdot Kp^2 - 360.}{5. \cdot Ti + 240. + 24. \cdot Kp \cdot Ti}$$

Решив  $Ay(Kp, Ti) = 0$  относительно  $Kp$ , получим:

$$K_{p2}(Ti) = \frac{-1}{3398} \cdot \frac{1009 \cdot Ti - [(-Ti) \cdot (2162447 \cdot Ti - 81552000)]^{\frac{1}{2}}}{Ti},$$

$$K_{p3}(Ti) = \frac{-1}{3398} \cdot \frac{1009 \cdot Ti + [(-Ti) \cdot (2162447 \cdot Ti - 81552000)]^{\frac{1}{2}}}{Ti}.$$

$k_w = 3,$

$$Ay3(Kp, Ti) = \frac{Ti^2 - 203.5 \cdot Ti + 9.600 \cdot Kp \cdot Ti^2 + 2304. + 23.04 \cdot Kp^2 \cdot Ti^2}{149.8 \cdot Ti + 230.4 \cdot Kp \cdot Ti}.$$

Аналогично предыдущему получаем:

$$K_{p4}(Ti) = \frac{-5}{48} \cdot \frac{2 \cdot Ti - (814 \cdot Ti - 9216)^{\frac{1}{2}}}{Ti},$$

$$K_{p5}(Ti) = \frac{-5}{48} \cdot \frac{2 \cdot Ti + (814 \cdot Ti - 9216)^{\frac{1}{2}}}{Ti}.$$

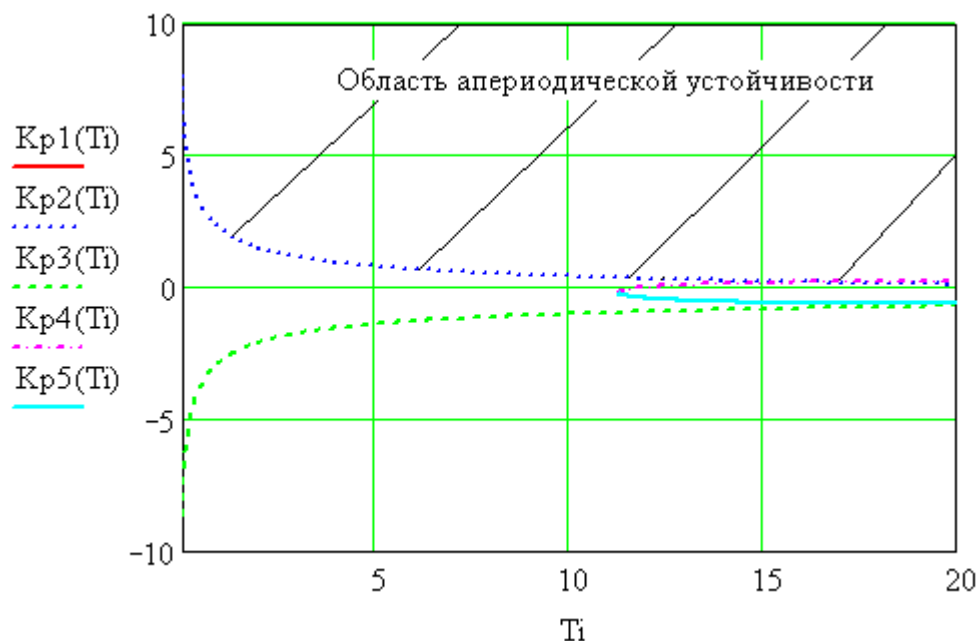


Рисунок 1 – График области параметров управляющего устройства,

обеспечивающих апериодический переходный процесс

Выберем параметры регулятора из области апериодической устойчивости:  $K_p = 5$ ,  $T_i = 10$  с..

Проверим выбранную точку на условие апериодичности:

$$Ay1(K_p) \text{ float,4} \rightarrow 3.375, Ay2(K_p, T_i) \text{ float,4} \rightarrow 9.420,$$

$$Ay3(K_p, T_i) \text{ float,4} \rightarrow 4.822.$$

Как показывают расчеты, условия апериодичности выполняются.

Построим переходную функцию замкнутой САУ по каналу:  $\varphi_3 \rightarrow \varphi$ .

$$W_r(p) = K_p + \frac{1}{T_i \cdot p}, \quad W_{1z}(p) = \frac{W_{o1}(p) \cdot W_r(p)}{1 + W_{o1}(p) \cdot W_r(p)}.$$

$$W_{1z}(p) = \frac{240 \cdot p^2 + 28.80 \cdot p + .4800}{40 \cdot p^4 + 226 \cdot p^3 + 271.2 \cdot p^2 + 29.80 \cdot p + .4800}.$$

$$H_{z1}(p) = \frac{W_{1z}(p)}{p}.$$

$$H_{z1}(p) = \frac{240 \cdot p^2 + 28.80 \cdot p + .4800}{(40 \cdot p^4 + 226 \cdot p^3 + 271.2 \cdot p^2 + 29.80 \cdot p + .4800) \cdot p}.$$

$$H_{z1}(t) = 1 + .606 \cdot e^{(-4.00)t} - 1.59 \cdot e^{(-1.53)t} + .594e^{-2} \cdot e^{(-.101)t} - .245e^{-1} \cdot e^{(-.195e^{-1})t}$$

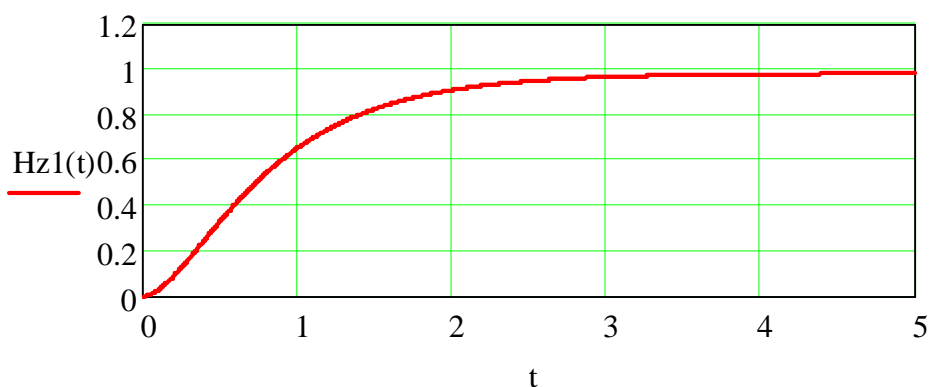


Рисунок 2 – График переходной функции замкнутой

САУ по каналу  $\varphi_3 \rightarrow \varphi$

Построим переходную функцию замкнутой САУ по каналу  $\lambda \rightarrow \varphi$ .

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

$$Wz1\lambda(p) = \frac{48 \cdot p^2 + 4.800 \cdot p}{40 \cdot p^4 + 226 \cdot p^3 + 271.2 \cdot p^2 + 29.80 \cdot p + .4800},$$

$$Hz1\lambda(p) = \frac{Wz1\lambda(p)}{p}$$

$$Hz1\lambda(p) = \frac{48 \cdot p^2 + 4.800 \cdot p}{(40 \cdot p^4 + 226 \cdot p^3 + 271.2 \cdot p^2 + 29.80 \cdot p + .4800) \cdot p}$$

$$Hz1\lambda(t) = .122 \cdot e^{(-4.00)t} - .322 \cdot e^{(-1.53)t} + .148e-2 \cdot e^{(-.101)t} + .198 \cdot e^{(-.195e-1)t}$$

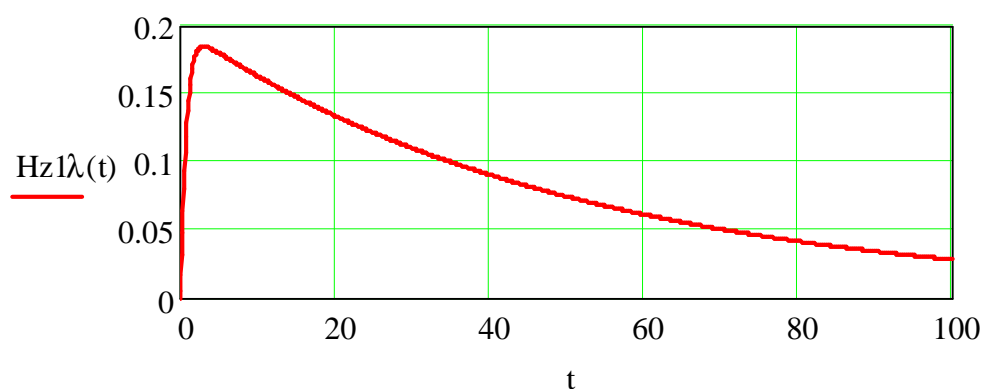


Рисунок 3 – График переходной функции замкнутой САУ по каналу  $\lambda \rightarrow \varphi$

Найдем аналогично область аperiodичности для максимальной нагрузки.

$$W_{\text{max}}(p) = \frac{12 \cdot p + 1.2}{2 \cdot p^2 + 11.2 \cdot p + 1}, \quad W_{\text{o2}}(p) = W_{\text{max}}(p) \cdot W_{\text{iz}}(p).$$

$$W_{\text{o2}}(p) = \frac{12 \cdot p + 1.200}{40 \cdot p^3 + 226 \cdot p^2 + 31.20 \cdot p + 1}.$$

$$W_{\text{r}}(p) = K_{\text{p}} + \frac{1}{T_{\text{i}} \cdot p}, \quad W_{\text{z2}}(p) = \frac{W_{\text{o2}}(p) \cdot W_{\text{r}}(p)}{1 + W_{\text{o2}}(p) \cdot W_{\text{r}}(p)}.$$

$$W_{\text{z2}}(p) = \frac{12 \cdot p^2 \cdot K_{\text{p}} \cdot T_{\text{i}} + 12 \cdot p + 1.200 \cdot K_{\text{p}} \cdot T_{\text{i}} \cdot p + 1.200}{K(p) + L(p)}$$

$$K(p) = 40 \cdot T_{\text{i}} \cdot p^4 + 226 \cdot T_{\text{i}} \cdot p^3 + 31.20 \cdot T_{\text{i}} \cdot p^2 + T_{\text{i}} \cdot p$$

$$L(p) = 12 \cdot p^2 \cdot K_{\text{p}} \cdot T_{\text{i}} + 12 \cdot p + 1.200 \cdot K_{\text{p}} \cdot T_{\text{i}} \cdot p + 1.200$$

$$X_2(p) = 40 \cdot p^4 \cdot T_{\text{i}} + 226 \cdot p^3 \cdot T_{\text{i}} + 31.20 \cdot p^2 \cdot T_{\text{i}} + T_{\text{i}} \cdot p + \blacksquare + 12 \cdot K_{\text{p}} \cdot p^2 \cdot T_{\text{i}} + 12 \cdot p + 1.200 \cdot K_{\text{p}} \cdot p \cdot T_{\text{i}} + 1.200.$$

$$X_2(p) \text{ coeffs, } p \rightarrow \begin{pmatrix} 1.200 \\ T_{\text{i}} + 12 \cdot p + 1.200 \cdot K_{\text{p}} \cdot T_{\text{i}} \\ 31.20 \cdot T_{\text{i}} + 12 \cdot K_{\text{p}} \cdot T_{\text{i}} \\ 226 \cdot T_{\text{i}} \\ 40 \cdot T_{\text{i}} \end{pmatrix} \mathbf{b} = \begin{pmatrix} 1.200 \\ T_{\text{i}} + 12 \cdot p + 1.200 \cdot K_{\text{p}} \cdot T_{\text{i}} \\ 31.20 \cdot T_{\text{i}} + 12 \cdot K_{\text{p}} \cdot T_{\text{i}} \\ 226 \cdot T_{\text{i}} \\ 40 \cdot T_{\text{i}} \end{pmatrix}.$$

$$a = \begin{pmatrix} b_4 \\ b_3 \\ b_2 \\ b_1 \\ b_0 \end{pmatrix}, \quad a \rightarrow \begin{pmatrix} 40 \cdot Ti \\ 226 \cdot Ti \\ 31.20 \cdot Ti + 12 \cdot Kp \cdot Ti \\ Ti + 12 + 1.200 \cdot Kp \cdot Ti \\ 1.200 \end{pmatrix}$$

$$X2(p) = a_0 \cdot p^4 + a_1 \cdot p^3 + a_2 \cdot p^2 + a_3 \cdot p + a_4$$

$$n = 4$$

$$Ay(Kp, Ti) := \frac{(a_k)^2}{a_{k-1} \cdot a_{k+1}} - \left( \frac{n - k + 1}{n - k} \right)$$

$$k = 1$$

$$Ay1(Kp) = \frac{514.7 - 6.667 \cdot Kp}{13 + 5 \cdot Kp}, \quad Ay1(Kp) \left| \begin{array}{l} \text{solve, } Kp \\ \text{float, } 4 \end{array} \right. \rightarrow 77.20$$

$$k = 2$$

$$Ay2(Kp, Ti) = \frac{14.04 \cdot Ti + 7.566 \cdot Kp \cdot Ti + 3.186 \cdot Ti \cdot Kp^2 - 90}{5 \cdot Ti + 60 + 6 \cdot Kp \cdot Ti}$$

$$k := 3$$

$$Ay3(Kp, Ti) = \frac{.3472 \cdot Ti^2 - 17.67 \cdot Ti + .8333 \cdot Kp \cdot Ti^2 + 50 + .5000 \cdot Kp^2 \cdot Ti^2}{13 \cdot Ti + 5 \cdot Kp \cdot Ti}$$

$$Kp1(Ti) = 77.20$$

$$Kp2(Ti) = (-1.187) + \frac{.9416e-3}{Ti} \cdot \left[ (-.3380e7) \cdot Ti^2 + .3186e8 \cdot Ti \right]^{\frac{1}{2}}$$

$$Kp3(Ti) = (-1.187) - \frac{.9416e-3}{Ti} \cdot \left[ (-.3380e7) \cdot Ti^2 + .3186e8 \cdot Ti \right]^{\frac{1}{2}}$$



$$K_{p4}(Ti) = (-.833) + \frac{.100e-3}{Ti} \cdot \left[ (-.111e4) \cdot Ti^2 + .353e10 \cdot Ti - .100e11 \right]^{\frac{1}{2}}$$

$$K_{p5}(Ti) = (-.833) - \frac{.100e-3}{Ti} \cdot \left[ (-.111e4) \cdot Ti^2 + .353e10 \cdot Ti - .100e11 \right]^{\frac{1}{2}}$$

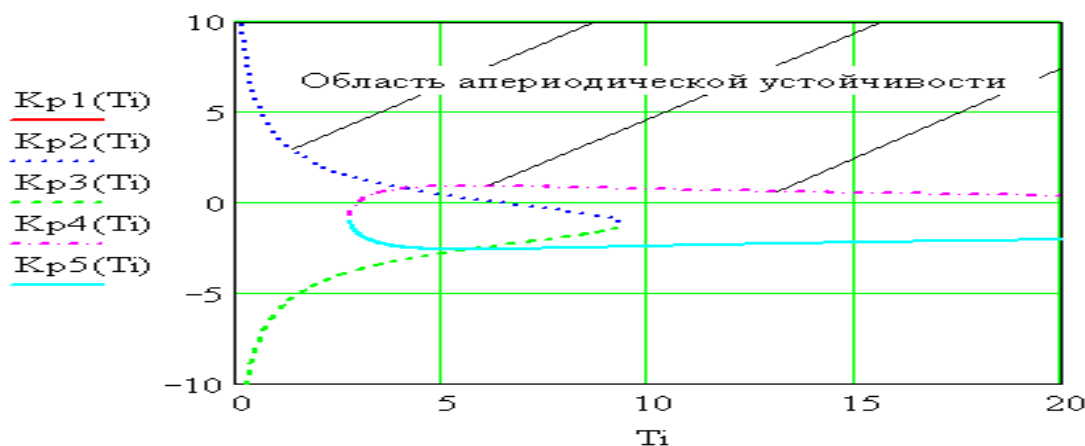


Рисунок 4 – График области параметров управляющего устройства, обеспечивающих аperiodический переходный процесс

Выберем параметры управляющего устройства из области аperiodичности

$$K_p = 5, \quad T_i = 10.$$

$$Ay1(K_p) \text{ float},4 \rightarrow 12.67, \quad Ay2(K_p, T_i) \text{ float},4 \rightarrow 2.988,$$

$$Ay3(K_p, T_i) \text{ float},4 \rightarrow 4.144.$$

$$W_r(p) = K_p + \frac{1}{T_i \cdot p}, \quad W_{z2}(p) = \frac{W_{o2}(p) \cdot W_r(p)}{1 + W_{o2}(p) \cdot W_r(p)}.$$

$$W_{z2}(p) = \frac{60 \cdot p^2 + 7.200 \cdot p + .1200}{40 \cdot p^4 + 226 \cdot p^3 + 91.20 \cdot p^2 + 8.200 \cdot p + .1200}.$$

$$Hz2(p) = \frac{Wz2(p)}{p}$$

$$Hz2(p) = \frac{60 \cdot p^2 + 7.200 \cdot p + .1200}{(40 \cdot p^4 + 226 \cdot p^3 + 91.20 \cdot p^2 + 8.200 \cdot p + .1200) \cdot p}$$

$$Hz2(t) = 1 + .585e-1 \cdot e^{(-5.22)t} - .998 \cdot e^{(-.308)t} + .389e-1 \cdot e^{(-.103)t} - .994e-1 \cdot e^{(-.181e-1)t}$$

$$Hz1(t) = 1 + .606 \cdot e^{(-4.00)t} - 1.59 \cdot e^{(-1.53)t} + .594e-2 \cdot e^{(-.101)t} - .245e-1 \cdot e^{(-.195e-1)t}$$

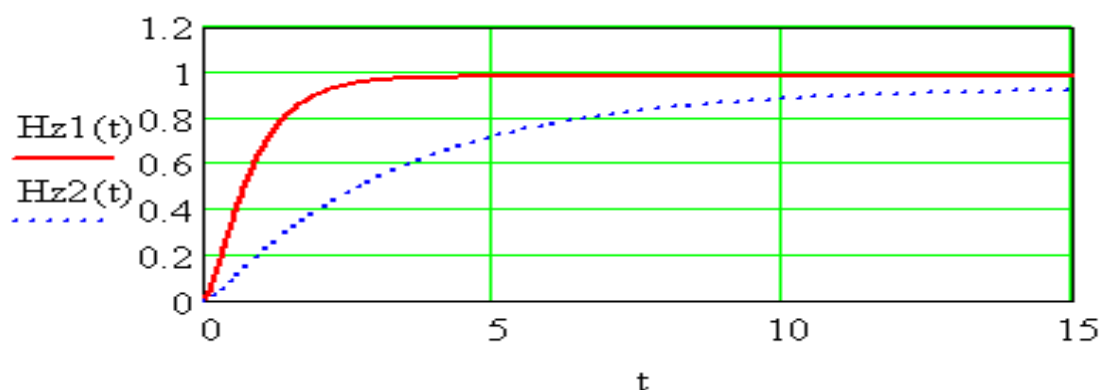


Рисунок 5 – Сравнительные графики переходных функций при различных нагрузках объекта: Hz1(t) – минимальная, Hz2(t) - максимальная

Проверим динамику систем управления для случая единичного воздействия по нагрузке. Это самое тяжелое возмущение, которое практически невозможно в реальных условиях, поскольку она изменяется сравнительно медленно случайным образом.

Как видно из рисунка 6, динамика систем управления при максимальной и минимальной нагрузках вполне удовлетворительна, изменяется незначительно.

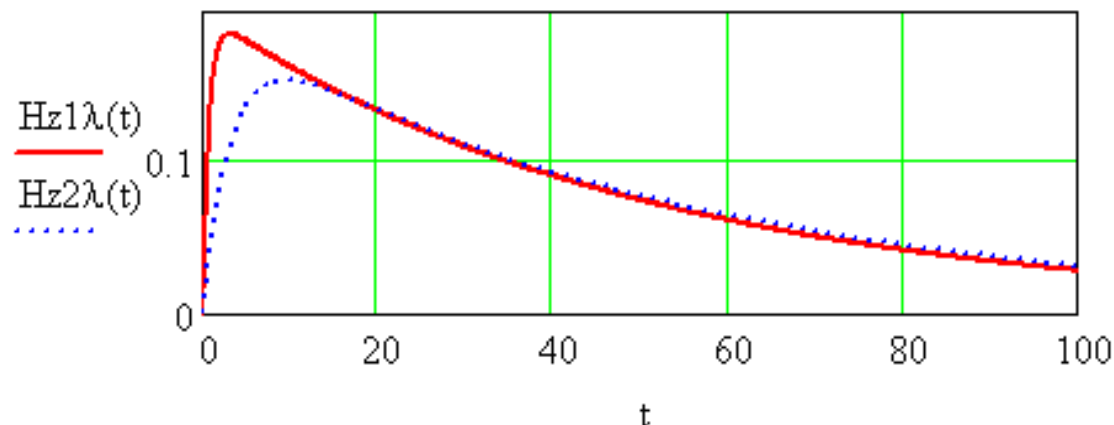


Рисунок 6 – Сравнительные графики переходных функций по каналу  $\lambda \rightarrow \varphi$  при различных нагрузках объекта:  $H_{z1}\lambda(t)$  – минимальная,  $H_{z2}\lambda(t)$  – максимальная

Поскольку в расчетах сервомотор не учитывался для исключения астатизма второго порядка [2], то будем считать, что он позволяет реализовать интегральную составляющую ПИ –закона управления.

Передаточную функцию управляющего устройства запишем так:

$$K_p + \frac{1}{T_{ip}} = \frac{K_p T_{ip} + 1}{T_{ip}}$$

Поскольку  $T_i = T_c$ , то отнесем интегральную составляющую к объекту, а регулятор будет реализовать пропорционально – дифференциальный закон:

$$W_{rpd}(p) = 1 + T_d \cdot p,$$

где  $T_d = K_p T_i = 50$ .

Покажем, что использование ПД- регулятора не изменяет динамику системы.

$$W_c(p) = \frac{1}{10 \cdot p}, \quad W_{o2}(p) = \frac{12 \cdot p + 1.2}{2 \cdot p^2 + 11.2 \cdot p + 1}, \quad W_{iz}(p) = \frac{1}{20 \cdot p + 1}$$

$$W_o(p) = W_{o2}(p) \cdot W_{iz}(p) \cdot W_c(p).$$

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

$$W_z(p) = \frac{W_o(p) \cdot W_{rpd}(p)}{1 + W_o(p) \cdot W_{rpd}(p)}$$

$$W_z(p) = \frac{60 \cdot p^2 + 7.200 \cdot p + .1200}{40 \cdot p^4 + 226 \cdot p^3 + 91.20 \cdot p^2 + 8.200 \cdot p + .1200}$$

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

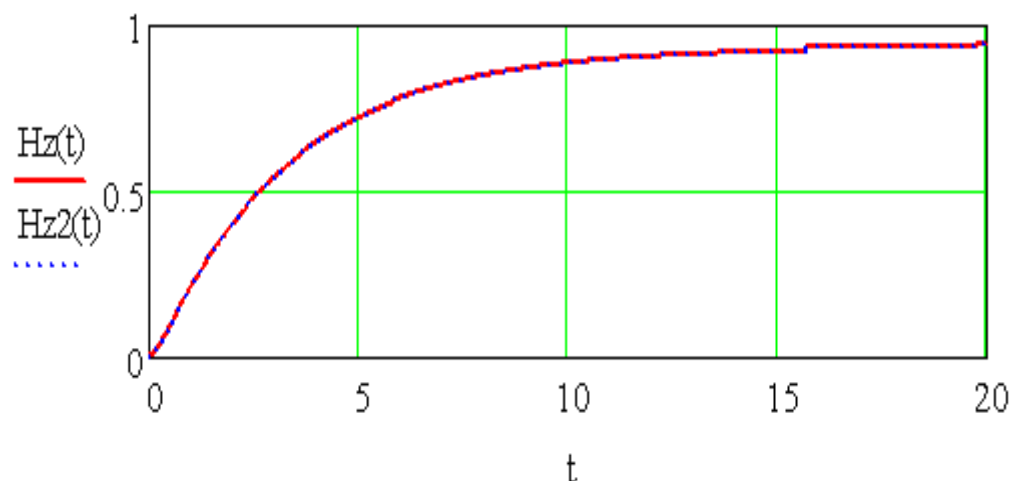


Рисунок 7 – Сравнительные графики переходных функций замкнутых САУ с ПИ и ПД – регуляторами.

**Выводы.**

1. Выбранные из области апериодичности параметры обеспечивают хорошее качество переходных процессов. Изменение времени переходного процесса не имеет практического значения, поскольку реальные возмущения не являются скачкообразными, а процесс сушки длится часами.

2. Систему управления можно реализовать на общепромышленных устройствах автоматики. ПД – закон управления легко реализуется с помощью ПИД – закона, когда  $T_i$  равно бесконечности.

### Литература

1. Пугачев В. И., Петриченко В. Г. Рекомендации по созданию адаптивной системы управления процессом подогрева воздуха для сушки семян. Научный журнал КубГАУ, №78 (04), 2012 год.
2. 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.
3. 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.

### References

1. Pugachev V. I., Petrichenko V. G. Rekomendacii po sozdaniju adaptivnoj sistemy upravlenija processom podogreva vozduha dlja sushki semjan. Nauchnyj zhurnal KubGAU, №78 (04), 2012 god.
2. Pugachev V. I. Metod rascheta i optimizacii parametrov sistemy upravlenija s servomotorom postojannoju skorosti. Zhurnal nauchnyh publikacij aspirantov i doktorantov № 5, Kursk, maj 2010 g.
3. 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.