

УДК 631.36-52

UDC 631.36-52

РЕКОМЕНДАЦИИ ПО СОЗДАНИЮ СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ ПРОЦЕССОМ ПОДОГРЕВА ВОЗДУХА ДЛЯ СУШКИ СЕМЯН

RECOMMENDATIONS FOR THE ESTABLISHMENT OF PROCESS CONTROL SYSTEMS FOR HEATING AIR DRYING OF SEEDS

Пугачев Василий Иванович
к.т.н., доцент
Петриченко Виктория Гурьяновна
студент магистратуры кафедры АПП

Pugachev Vasilii Ivanovich
Cand.Tech.Sci., associate professor
Petrichenko Victoria Gurjanovna
student of a magistracy of APP chair

Кубанский государственный технологический университет, Краснодар, Россия

Kuban State University of Technology, Krasnodar, Russia

В статье приведены рекомендации по созданию системы управления процессом подогрева воздуха для сушки семян. Рассмотрена задача выбора параметра управляющего устройства. Проведен расчет переходных функций замкнутой САУ. Найдены оптимальные коэффициенты усиления регулятора. Разработан алгоритм адаптации системы управления

The article presents the recommendations for a process control system of heated air for drying seeds. The problem of selecting a control device is solved. The calculations of transfer functions of the closed ACS are made. The optimal controller gains are found. The algorithm for adapting the control system is created

Ключевые слова: СУШКА СЕМЯН, ВОЗДУХОНАГРЕВАТЕЛЬ, ОПТИМИЗАЦИЯ, МОДЕЛИРОВАНИЕ, ПЕРЕХОДНАЯ ФУНКЦИЯ

Keywords: DRY SEEDS, AIR, OPTIMIZATION, MODELING, TRANSITION FUNCTION

Задачи дальнейшего совершенствования производства и его эффективности требуют более совершенных систем управления. Многие технические объекты изменяют свои свойства в широких пределах, что не позволяет их эксплуатацию при постоянных настройках управляющего устройства. Такие объекты требуют адаптации управляющего устройства к изменению параметров объекта. К таким объектам относится воздухонагреватель.

Таким образом, задача выбора параметров управляющего устройства состоит из двух составляющих:

- 1) Оптимизация параметров управляющего устройства при постоянных параметрах объекта;
- 2) Адаптация параметров управляющего устройства при изменении параметров объекта.

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

$$W_{01}(p) = \frac{T_2 K_2 p + K_2}{T_1 T_2 p^2 + (T_1 + K_1 T_2) p + (K_1 - 1)},$$

где T_1 – величина времени нагрева воздуха топочного устройства;

T_2 – величина времени нагрева стенки топочного устройства;

K_1 и K_2 – коэффициенты дифференциального уравнения.

В установившемся режиме управляющее воздействие должно компенсировать возмущающее воздействие с определенным запасом (20-40 %). Нагрузка на печь может изменяться в 4 раза. В два раза может изменяться расход воздуха из за различного гидравлического сопротивления продукта (мелкое или крупное зерно) и в два раза из за изменения температуры наружного воздуха (-20 ÷ +30 °C).

Таким образом, при минимальной нагрузке управляющее воздействие будет в 4,8 раза больше необходимого для поддержания заданного значения температуры. Возникает вопрос, а будет ли динамика системы управления обеспечивать заданное качество переходного процесса при изменении нагрузки в 4 раза.

Вычислить коэффициент нагрузки Z можно по формуле:

$$Z = \frac{P(q_0 - q)}{2P_0 * 100},$$

где P - давление, создаваемое трубке Пито при максимальном расходе воздуха;

P_0 - давление, создаваемое трубке Пито при минимальном расходе воздуха;

q - температура наружного воздуха;

q_0 - температура нагретого воздуха.

Легко видеть, что при нагреве воздуха от 30 до 80 градусов и $P=P_0$ получим $z = 0,25$, при нагреве воздуха от -20 до +80 градусов и $P=2P_0$, $z=1$.

Перемещение регулирующего органа на подаче топлива осуществляется с помощью сервомотора постоянной скорости, например МЭО-25/60 с временем поворота вала на 90 градусов – 15 секунд.. Поскольку кратковременное включение исполнительного механизма, обеспечивающее его перемещение, не может быть меньше 0,1 секунды, то следует выбрать постоянную времени сервомотора не менее 10 секунд.

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

При реализации законов управления в системах с сервомотором постоянной скорости сервомотор относят к регулятору, реализующему интегральную составляющую, обеспечивающую исключение статической ошибки регулирования. При этом, отнеся сервомотор к объекту управления, можно найти оптимальный коэффициент усиления пропорционального 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) [2].

При максимальной нагрузке передаточная функция объекта имеет вид:

$$W_{o1}(p) = \frac{12 \cdot p + 1.2}{2 \cdot p^2 + 11.2 \cdot p + 1}$$

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

Будем считать исполнительный механизм интегрирующим звеном с постоянной времени 10 с. и передаточной функцией

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

Измеритель является апериодическим звеном с постоянной времени 20 с. и передаточной функцией

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

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

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

Расчет проведем с использованием пакета Mathcad [3].

$$W_o(p) \left| \begin{array}{l} \text{expand} \\ \text{float,4} \end{array} \right. \rightarrow \frac{1.200 \cdot p + .1200}{40. \cdot p^4 + 226. \cdot p^3 + 31.20 \cdot p^2 + 1. \cdot p}$$

Обратная передаточная функция объекта:

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

$$W_{ob}(p) \left| \begin{array}{l} \text{expand} \\ \text{float,4} \end{array} \right. \rightarrow \frac{400. \cdot p^4 + 2260. \cdot p^3 + 312. \cdot p^2 + 10. \cdot p}{12. \cdot p + 1.200}$$

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

$$\underline{W_{ob}}(i, w) = \frac{A(i, w) + B(i, w) + D(i, w)}{C(i, w)},$$

где:

$$\underline{A}(i, w) = .3898e5 \cdot w^4 \cdot i^4 - .1143e6 \cdot w^4 \cdot i^3 + .1256e6 \cdot w^4 \cdot i^2 + .2203e6 \cdot w^3 \cdot i^3$$

$$B(i, w) = -.4842e6 \cdot w^3 \cdot i^2 - .6136e5 \cdot w^4 \cdot i + .3549e6 \cdot w^3 \cdot i + .1124e5 \cdot w^4$$

$$D(i, w) = -.8669e5 w^3 + .3041e5 w^2 \cdot i^2 - .4458e5 w^2 \cdot i + .1633e5 w^2 + 974.6 w \cdot i - 714.4 w$$

$$C(i, w) = 1170. \cdot w \cdot i - 857.1 \cdot w + 117.0$$

Выделим мнимую часть обратной РАФХ.

$$\text{Im}(Wob(i, w)) := \frac{.4282e8 w^5 - .5743e9 w^4 + .7043e8 w^3 - .5215e7 w^2 + .1140e6 w}{.2104e7 w^2 - .2006e6 w + .1369e5}$$

Приравняв числитель мнимой обратной РАФХ нулю, найдем частоту, при которой обратная РАФХ первый раз пересекает отрицательную вещественную часть комплексной плоскости.

$$G(w) = .4282e8 \cdot w^5 - .5743e9 \cdot w^4 + .7043e8 \cdot w^3 - .5215e7 \cdot w^2 + .1140e6 \cdot w$$

$$G(w) \left| \begin{array}{l} \text{solve, w} \\ \text{float, 4} \end{array} \right. \rightarrow \left(\begin{array}{c} 0 \\ .3219e-1 \\ .4545e-1 - .6449e-1 \cdot i \\ .4545e-1 + .6449e-1 \cdot i \\ 13.29 \end{array} \right)$$

$$w=0,003219 \text{ рад./с.}$$

Оптимальный коэффициент усиления пропорционального регулятора, обеспечивающий требуемую относительную степень затухания равен:

$$K_p = -\text{Re}(Wob(i, .3219e-1)) \text{ float, 4} \rightarrow .2730$$

$$K_{pp} = .2730$$

Легко проверить полученный аналитическим путем результат графоаналитическим методом, найдя графически точку пересечения обратной РАФХ с отрицательной осью комплексной плоскости.

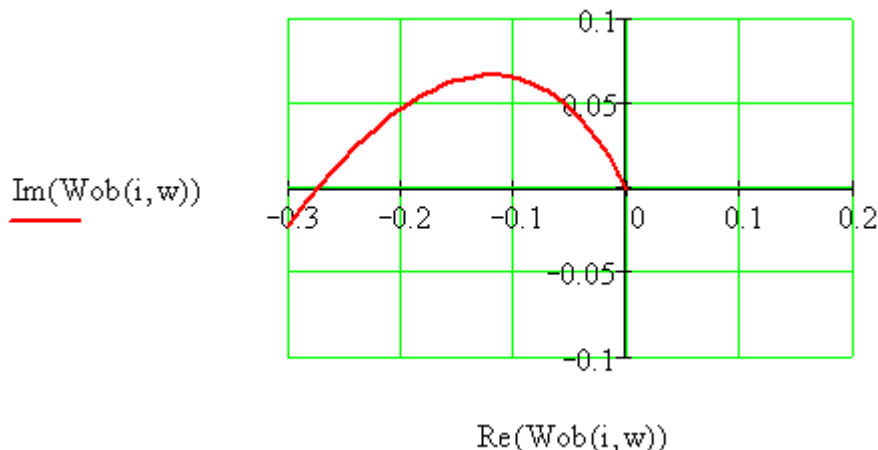


Рисунок 1 – Вид обратной РАФХ объекта управления

$$K_{pp} = 0.273$$

Для проверки правильности результатов расчета построим переходную функцию замкнутой системы по каналу задание – регулируемая величина.

$$W_{zp}(p) = \frac{W_o(p) \cdot K_{pp}}{1 + W_o(p) \cdot K_{pp}}$$

$$W_{zp}(p) = \frac{.3276 \cdot p + .3276e-1}{40 \cdot p^4 + 226 \cdot p^3 + 31.20 \cdot p^2 + 1.328 \cdot p + .3276e-1}$$

$$H_{zp}(p) = \frac{W_{zp}(p)}{p}$$

$$H_{zp}(p) = \frac{.3276 \cdot p + .3276e-1}{(40 \cdot p^4 + 226 \cdot p^3 + 31.20 \cdot p^2 + 1.328 \cdot p + .3276e-1) \cdot p}$$

Найдя обратное преобразование Лапласа, получаем:

$$H_{zp}(t) := 1 - .493e - 4 \cdot e^{(-5.51)t} - .186e - 1 \cdot e^{(-.932e-1)t} - \blacksquare$$

$$-.981 \cdot e^{(-.236e-1)t} \cdot \cos(.322e-1 \cdot t) - .782 \cdot e^{(-.236e-1)t} \cdot \sin(.322e-1 \cdot t)$$

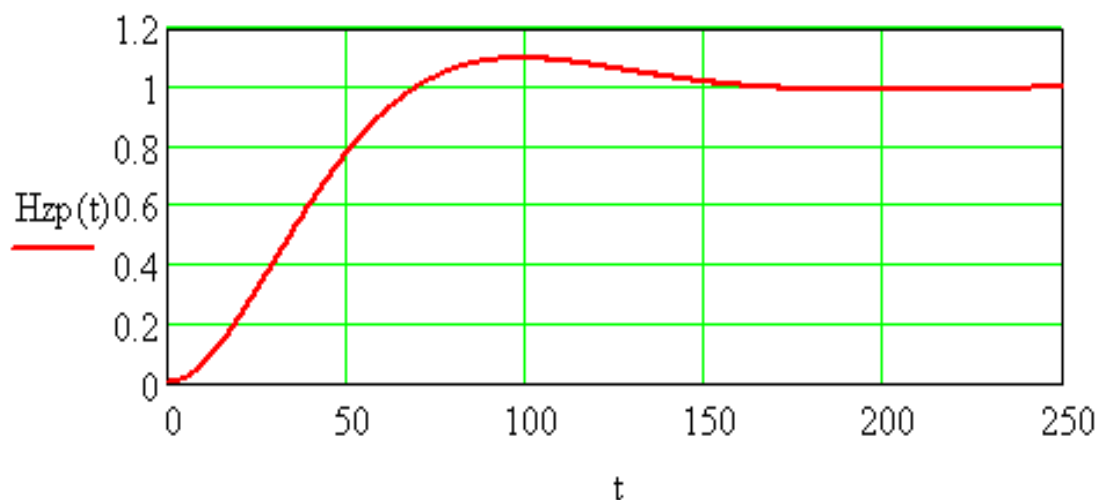


Рисунок 2 – График переходной функции замкнутой САУ с оптимальным коэффициентом усиления регулятора.

Как видно из графика, переходный процесс полностью соответствует заданным условиям.

Рассмотрим возможность использования полученного коэффициента усиления регулятора для случая уменьшения нагрузки в 4 раза.

$$W_c(p) = \frac{1}{10 \cdot p}, \quad W_{o1}(p) = \frac{48 \cdot p + 4.8}{2 \cdot p^2 + 11.2 \cdot p + 1}, \quad W_{iz}(p) = \frac{1}{20 \cdot p + 1}.$$

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

$$W_o(p) \left| \begin{array}{l} \text{expand} \\ \text{float}, 4 \end{array} \right. \rightarrow \frac{4.800 \cdot p + .4800}{40. \cdot p^4 + 226. \cdot p^3 + 31.20 \cdot p^2 + 1. \cdot p}.$$

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

$$W_{ob}(p) \left| \begin{array}{l} \text{expand} \\ \text{float}, 4 \end{array} \right. \rightarrow \frac{400. \cdot p^4 + 2260. \cdot p^3 + 312. \cdot p^2 + 10. \cdot p}{48. \cdot p + 4.800}.$$

$$K_{pp} = 0.273, \quad W_{zp}(p) = \frac{W_o(p) \cdot K_{pp}}{1 + W_o(p) \cdot K_{pp}}$$

$$W_{zp}(p) = \frac{1.310 \cdot p + .1310}{40 \cdot p^4 + 226 \cdot p^3 + 31.20 \cdot p^2 + 2.310 \cdot p + .1310}$$

$$H_{zp}(p) = \frac{W_{zp}(p)}{p}$$

$$H_{zp}(p) = \frac{1.310 \cdot p + .1310}{(40 \cdot p^4 + 226 \cdot p^3 + 31.20 \cdot p^2 + 2.310 \cdot p + .1310) \cdot p}$$

$$H_{zp}(t) := 1 - .197e^{-3t} - .219e^{-.961e-1t} - .978 \cdot e^{-.218e-1t} \cdot \cos(.756e-1 \cdot t) - .324 \cdot e^{-.218e-1t} \cdot \sin(.756e-1 \cdot t)$$

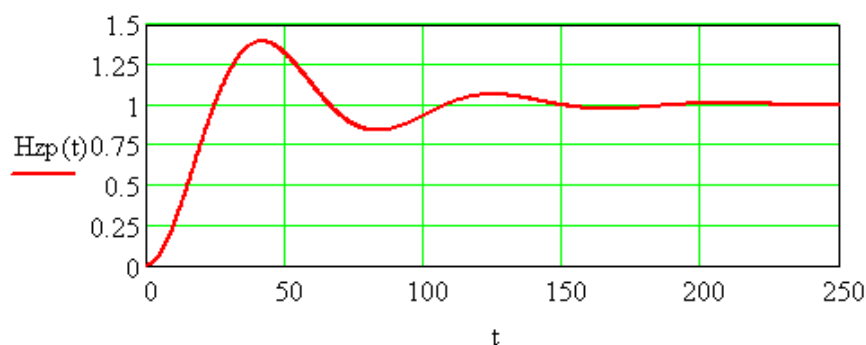


Рисунок 3 – График переходной функции замкнутой САУ с оптимальным коэффициентом усиления для максимальной нагрузки.

Как видно из рисунка, динамический заброс составляет 40 процентов, что недопустимо.

Можно сделать вывод о том, что для получения требуемого качества управления при изменении нагрузки объекта следует изменять коэффициент усиления регулятора.

Проведем расчет переходной функции замкнутой САУ с оптимальным коэффициентом усиления регулятора для минимальной нагрузки объекта.

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

$$W_{o1}(p) = \frac{48 \cdot p + 4.8}{2 \cdot p^2 + 11.2 \cdot p + 1},$$

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

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

$$W_o(p) \left| \begin{array}{l} \text{expand} \\ \text{float}, 4 \end{array} \right. \rightarrow \frac{4.800 \cdot p + .4800}{40. \cdot p^4 + 226. \cdot p^3 + 31.20 \cdot p^2 + 1. \cdot p},$$

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

$$W_{ob}(p) \left| \begin{array}{l} \text{expand} \\ \text{float}, 4 \end{array} \right. \rightarrow \frac{400. \cdot p^4 + 2260. \cdot p^3 + 312. \cdot p^2 + 10. \cdot p}{48. \cdot p + 4.800}.$$

$$\underline{W_{ob}}(i, w) = \frac{A(i, w) + B(i, w) + D(i, w)}{C(i, w)}$$

$$\underline{A}(i, w) = .3898e5 \cdot w^4 \cdot i^4 - .1143e6 \cdot w^4 \cdot i^3 + .1256e6 \cdot w^4 \cdot i^2 + .2203e6 \cdot w^3 \cdot i^3,$$

$$\underline{B}(i, w) = -.4842e6 \cdot w^3 \cdot i^2 - .6136e5 \cdot w^4 \cdot i + .3549e6 \cdot w^3 \cdot i + .1124e5 \cdot w^4,$$

$$\underline{D}(i, w) = -.8669e5w^3 + .3041e5w^2 \cdot i^2 - .4458e5w^2 \cdot i + .1633e5w^2 + 974.6w \cdot i - 714.4w,$$

$$\underline{C}(i, w) = 4678. \cdot w \cdot i - 3428. \cdot w + 467.8.$$

$$\text{Im}(\underline{W_{ob}}(i, w)) = \frac{.1711e9 w^5 - .2296e10 w^4 + .2817e9 w^3 - .2085e8 w^2 + .4559e6 w}{.3363e8 w^2 - .3207e7 w + .2188e6}$$

$$G(w) = .1711e9 \cdot w^5 - .2296e10 \cdot w^4 + .2817e9 \cdot w^3 - .2085e8 \cdot w^2 + .4559e6 \cdot w$$

$$G(w) \left| \begin{array}{l} \text{solve, w} \\ \text{float, 4} \end{array} \right. \rightarrow \begin{pmatrix} 0 \\ .3221e-1 \\ .4546e-1 - .6445e-1 \cdot i \\ .4546e-1 + .6445e-1 \cdot i \\ 13.30 \end{pmatrix}$$

$$Kp = -\text{Re}(Wob(i, .3221e-1)) \text{ float, 4} \rightarrow .6833e-1, \quad Kpp = .6833e-1.$$

$$Wzp(p) = \frac{Wo(p) \cdot Kpp}{1 + Wo(p) \cdot Kpp}$$

$$Kpp = .6832e-1$$

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

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

$$Wo(p) \left| \begin{array}{l} \text{expand} \\ \text{float, 4} \end{array} \right. \rightarrow \frac{4.800 \cdot p + .4800}{40 \cdot p^4 + 226 \cdot p^3 + 31.20 \cdot p^2 + 1 \cdot p}$$

$$Wzp(p) = \frac{Wo(p) \cdot Kpp}{1 + Wo(p) \cdot Kpp}$$

$$Wzp(p) = \frac{.3360 \cdot p + .3360e-1}{40 \cdot p^4 + 226 \cdot p^3 + 31.20 \cdot p^2 + 1.336 \cdot p + .3360e-1}$$

$$Hzp(p) = \frac{Wzp(p)}{p}$$

$$H_{zp}(p) = \frac{.3360 \cdot p + .3360e-1}{(40 \cdot p^4 + 226 \cdot p^3 + 31.20 \cdot p^2 + 1.336 \cdot p + .3360e-1) \cdot p}$$

$$H_{zp1}(t) := 1 - .493e-4 \cdot e^{(-5.51)t} - .186e-1 \cdot e^{(-.932e-1)t} -$$

$$-.981 \cdot e^{(-.236e-1)t} \cdot \cos(.328e-1 \cdot t) - .766 \cdot e^{(-.236e-1)t} \cdot \sin(.328e-1 \cdot t)$$

$$H_{zp}(t) := 1 - .506e-4 \cdot e^{(-5.51)t} - .187e-1 \cdot e^{(-.933e-1)t} -$$

$$-.981 \cdot e^{(-.236e-1)t} \cdot \cos(.322e-1 \cdot t) - .782 \cdot e^{(-.236e-1)t} \cdot \sin(.322e-1 \cdot t)$$

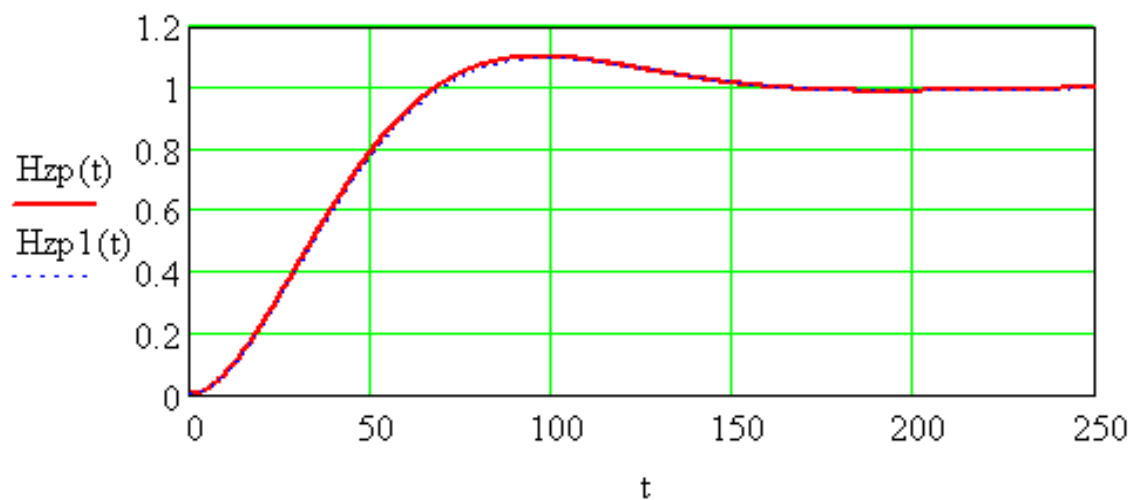


Рисунок 4 – Сравнительные графики переходных функций в замкнутых САУ при оптимальном для каждой нагрузки коэффициенте усиления

Как видно из графиков, они практически одинаковы, следовательно, изменяя коэффициент усиления регулятора при изменении нагрузки можно добиться желаемой динамики САУ во всем рабочем диапазоне нагрузок.

Найдем оптимальные коэффициенты усиления регулятора при нагрузках 0,5 и 0,75 от максимальной и запишем эти соотношения. Оптимальный коэффициент усиления для нагрузки, равной максимальной, уже найден (0,273), для минимальной (0,06832).

$$z = \begin{pmatrix} 0.25 \\ 0.5 \\ 0.75 \\ 1.0 \end{pmatrix}, \quad Kp(z) = \begin{pmatrix} .6832e-1 \\ .9112e-1 \\ .1365 \\ 0.273 \end{pmatrix}, \quad F(z) := \begin{pmatrix} 1 \\ z \\ z^2 \\ z^3 \end{pmatrix}.$$

Аналитическое выражение, аппроксимирующее расчетные данные зависимости оптимального коэффициента усиления от нагрузки.

$$S = \begin{pmatrix} -4.4 \times 10^{-4} \\ 0.458 \\ -0.916 \\ 0.731 \end{pmatrix},$$

$$S_{\text{lin}} = \text{linfit}(z, Kp(z), F),$$

$$Kp_{\text{lin}}(z) = -4.4 \times 10^{-4} + 0.458 \cdot z - 0.916 \cdot z^2 + 0.731 \cdot z^3$$

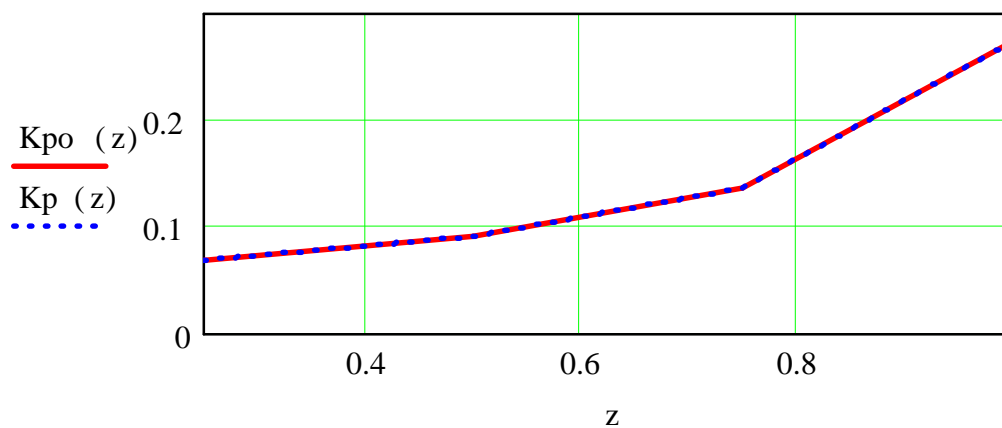


Рисунок 5 – Сравнительные зависимости расчетных данных $K_p(z)$ и аппроксимирующей кривой $K_{po}(z)$

Приведенная ошибка аппроксимации:

$$O(z) = \frac{(K_p(z) - K_{po}(z)) \cdot 100}{0.3}$$

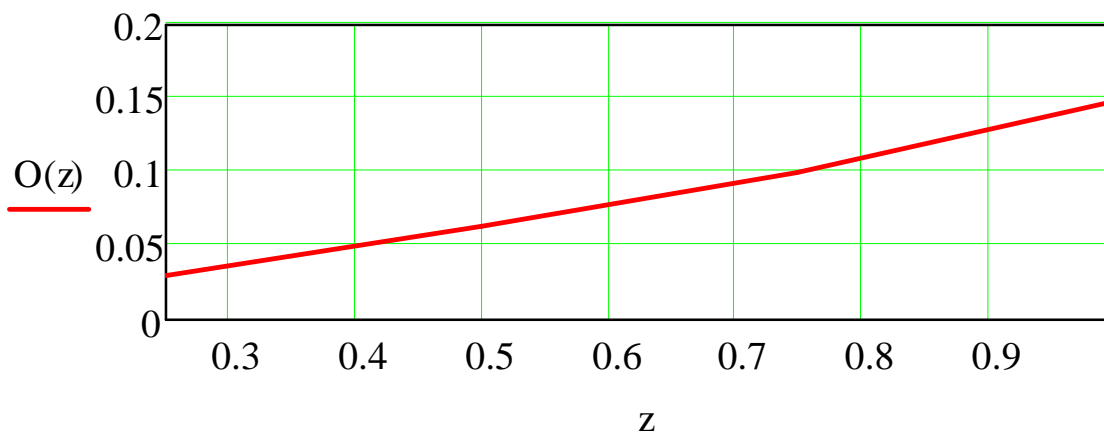


Рисунок 6 – График приведенной ошибки аппроксимации расчетных данных.

Как видно из графика, ошибка аппроксимации не превышает 0,2 % .

Как указывалось ранее, нагрузка теплогенератора состоит из двух составляющих.

Первая составляющая – изменение расхода воздуха при изменении размера зерна. Она может быть определена путем измерения скорости воздуха с помощью трубки Пито.

Вторая составляющая зависит от температуры наружного воздуха, измеряемого термометром сопротивления.

Выводы

1. Изменение нагрузки теплогенератора существенно изменяет динамику системы стабилизации температуры горячего воздуха, что может отрицательно сказаться на процессе сушки зерна.

2. Измеряя расход воздуха и его температуру перед подогревом, вычисляют нагрузку теплогенератора и в зависимости от ее величины корректируют коэффициент усиления регулятора.

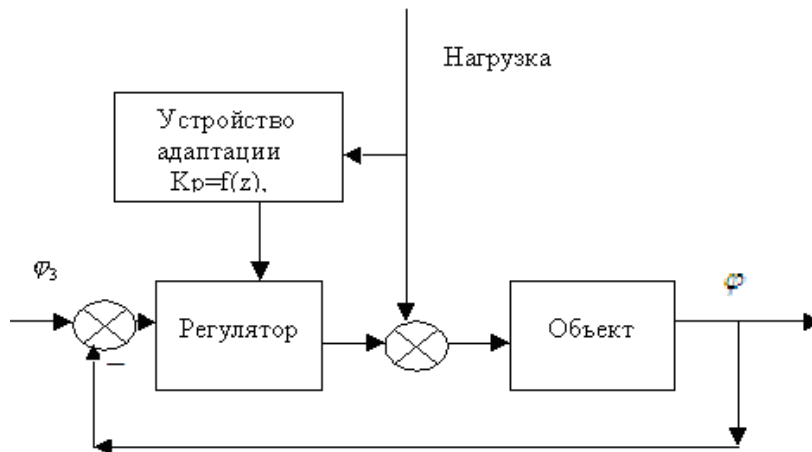


Рисунок 7 - Принципиальная схема система адаптивной системы управления

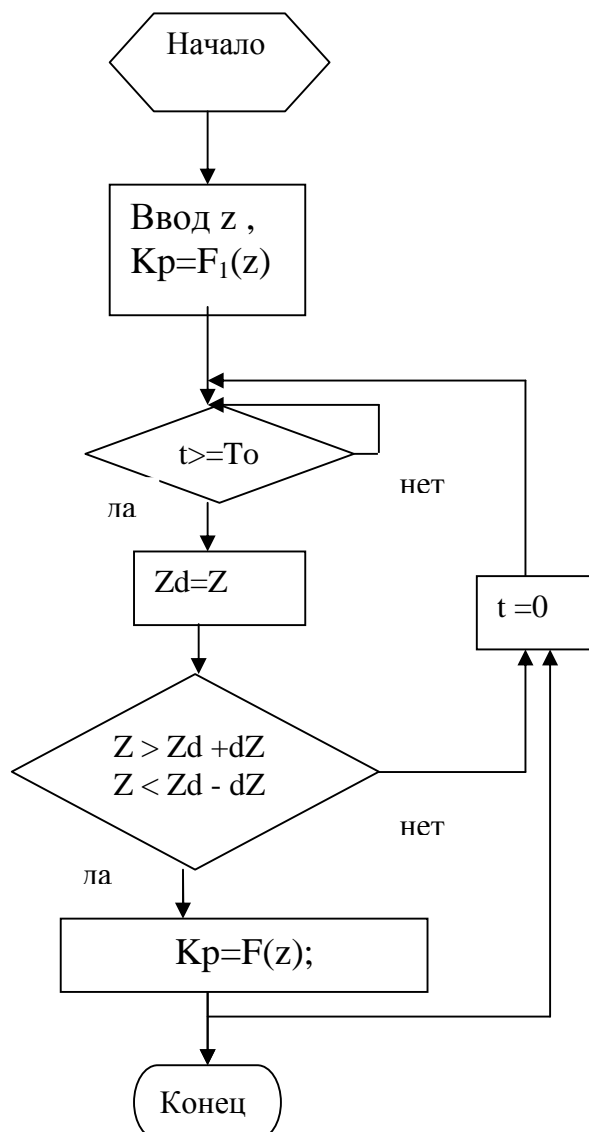


Рисунок 8 - Алгоритм адаптации системы управления

Литература

1. Пугачев В.И., Петриченко В.Г. Разработка математической модели процесса подогрева воздуха для сушки зерна. // Научн. журнал КубГАУ, № 75(01), 2012.
2. Стефани Е.П. Основы расчета настройки регуляторов теплоэнергетических процессов. - М.: Энергия, 1972. - 376 с.
3. Пугачев В.И. Теория автоматического управления (использование Mathcad при анализе и синтезе систем управления): учеб. пособие / Изд. КубГТУ, 2006 – 140 с.