

*МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ПРОЦЕССА СТАБИЛИЗАЦИИ  
ТЕМПЕРАТУРЫ СУШКИ ЗЕРНА*

**Д.Л. ПИОТРОВСКИЙ, Н.К. БЕРЕСТИН**

*Кубанский государственный технологический университет,  
350072, Российская Федерация, г. Краснодар, ул. Московская, 2,  
электронная почта: piotrovsky2005@yandex.ru*

Сложность проходящих в технологических процессах сушки зерна химико-физико-биологических явлений предполагает преимущество экспериментальных методов исследований. Наиболее эффективными экспериментальными методами являются методы активного эксперимента, основанные на получении временных (разгонных или импульсных) характеристик. Эксперименты проводились в конце процесса сушки, так как основная нагрузка системы охлаждения приходится на конец сушки. Проведено усреднение экспериментальных данных на контрольных точках и построен график кривой разгона объекта управления по каналу: положение шибера на подаче воздуха высокого давления – температура агента сушки во второй зоне печи. Обработка кривой разгона по методу Симою позволила получить передаточную функцию объекта. Математическая модель объекта описывается передаточной функцией, имеющей чистое запаздывание и третью степень знаменателя передаточной функции, что усложняет анализ и синтез системы управления с заданными показателями качества переходного процесса, так как не позволяет получить аналитическое выражение переходной функции замкнутой системы. Дальнейшие исследования целесообразно проводить с полученной экспериментально передаточной функцией.

**Ключевые слова:** сушка зерна, передаточная функция, активный эксперимент, метод Симою.

Разработка системы управления процессом сушки зерна предполагает знание математической модели процесса стабилизации температуры сушки зерна. Её можно получить аналитически или на основании результатов активного или пассивного экспериментов [1].

Сложность проходящих в современных технологических процессах химико-физико-биологических явлений предполагает преимущество экспериментальных методов исследований [2].

Наиболее эффективными экспериментальными методами являются методы активного эксперимента, основанные на получении временных (разгонных или импульсных) характеристик [3].

Для получения передаточной функции линейной части используем метод Симою.

В процессе сушки зерна основная нагрузка системы охлаждения приходится на конец сушки, когда почти вся влага испарена и весь сушильный агент необходимо охлаждать до заданной температуры. В начале сушки основной поток энергии агента сушки уходит на испарение влаги. Поэтому, если система стабилизации будет хорошо работать на больших нагрузках, то она легко справится с малыми в начале сушки. Исходя из этих соображений эксперименты проводились в конце процесса сушки [4].

На основании экспериментальных данных, полученных путем осреднения результатов семи экспериментов построена кривая разгона в отклонениях от установившегося режима в абсолютных единицах. Ось абсцисс – в секундах, ординат – градусах Цельсия.

При экспериментальном определении значения  $\text{He}$  для  $t = 70$  с. получен статистический ряд с малым числом измерений (7), приведенных в таблице. Следует установить действительное значение  $\text{He}$ , погрешность результата и достоверный интервал при доверительной вероятности  $P = 0,97$ .

$$\begin{pmatrix} i & 0 & 1 & 2 & 3 & 4 & 5 & 6 \\ \text{He} & 3.97 & 4.0 & 3.99 & 4.02 & 4.02 & 3.95 & 4.05 \end{pmatrix}.$$

Среднее значение  $\text{He}_{\text{ср}} = 4$ .

Для проверки, подчиняются ли случайные погрешности нормальному закону распределения Гаусса, рекомендуется следующий простой метод [5]. Определяется дисперсия и среднеквадратическое отклонение по формуле Бесселя:

$$\sigma = .3366e-1.$$

и по формуле нормального распределения погрешностей:

$$\sigma_n = .3481e-1.$$

Погрешности отличаются друг от друга незначительно и подчиняются нормальному закону распределения.

Кривая разгона, полученная при 10 процентном закрытии шиберов на подаче охлаждающего воздуха, учитывает инерционность измерителя температуры во второй зоне (малоинерционного термометра сопротивления).

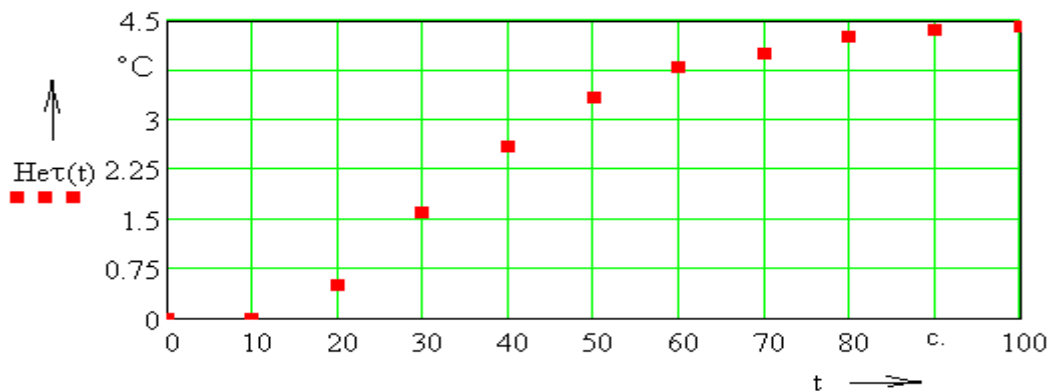


Рисунок 1- График экспериментальных точек кривой разгона по каналу изменение положения шиберов на подаче воздуха высокого давления во вторую зону – изменение температуры воздуха во второй зоне сушки.

Удалим звено чистого запаздывания и произведем аппроксимацию экспериментальных точек кривой разгона оставшейся части методом площадей.

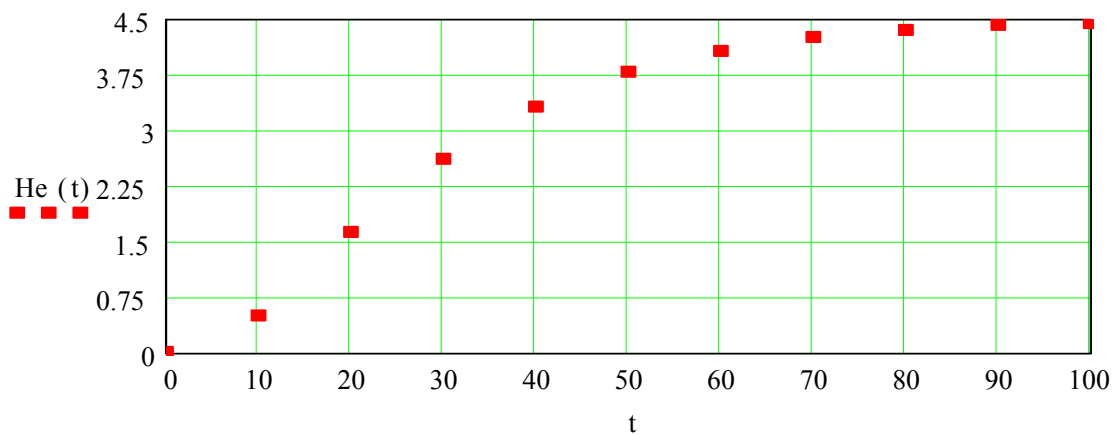


Рисунок 2 - График кривой разгона по каналу изменение положения шиберов на подаче воздуха высокого давления – изменение температуры воздуха во второй зоне сушки без учета чистого запаздывания.

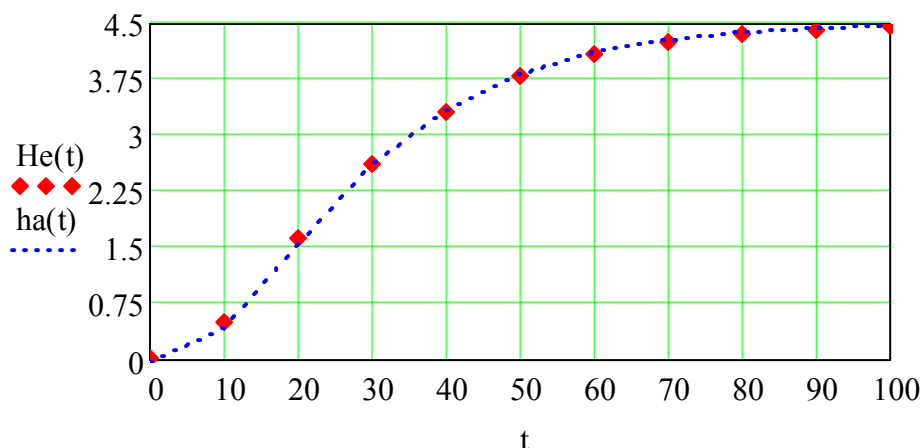


Рисунок 3 - Сравнительные графики экспериментальной кривой разгона He(t) и аппроксимирующей кривой ha(t) без учета эвена чистого запаздывания

Приведённая ошибка аппроксимации в процентах:

$$D(t) = \frac{(He(t) - ha(t)) \cdot 100}{4.5}$$

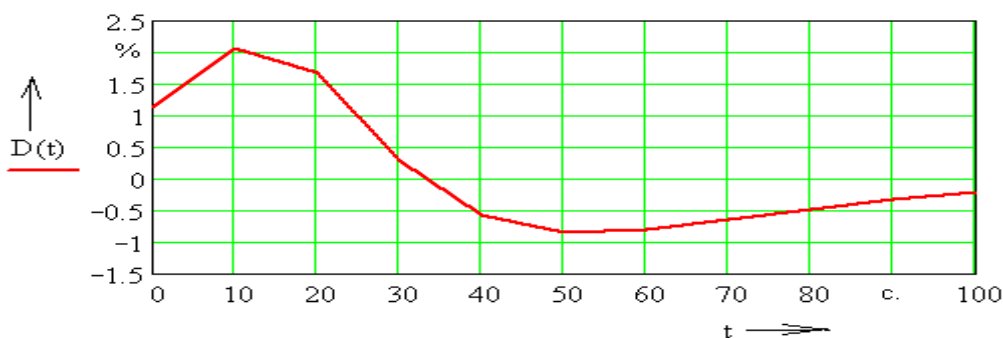


Рисунок 4 - График приведённой ошибки аппроксимации в процентах

Ошибка аппроксимации не превышает 2 %, что указывает на хороший результат.

Проводить анализ и синтез систем управления удобно в безразмерной форме. Поэтому, задав базисную величину рекомендуемого снижения температуры сушильного агента второй зоны с 70 до 40 °С с полуторным запасом по управляющему воздействию с учётом знака действия, результирующая передаточная функция объекта будет иметь вид:

$$W_o(p) = \frac{-1.5}{664.7 \cdot p^3 + 272.2 \cdot p^2 + 30.3 \cdot p + 1}$$

### Выводы по работе:

1. Используя экспериментальные данные, проведено их усреднение на контрольных точках и построен график кривой разгона объекта управления по каналу: положение шибера на подаче воздуха высокого давления – температура агента сушки во второй зоне печи

2. Обработка кривой разгона по методу Симою позволила получить передаточную функцию объекта. Аппроксимирующая функция, полученная по найденной передаточной функции, не отличается от экспериментальной кривой разгона более, чем на 2 процента, что указывает на хороший результат аппроксимации.

3. Математическая модель объекта описывается передаточной функцией, имеющей чистое запаздывание и третью степень знаменателя передаточной функции, что усложняет анализ и синтез системы управления с заданными показателями качества переходного процесса, так как не позволяет получить аналитическое выражение переходной функции замкнутой системы.

4. Звено чистого запаздывания можно аппроксимировать разложением в ряд Тейлора или Паде. Однако это будет уже приближение и, кроме того, степень полинома знаменателя передаточной функции объекта увеличится до пятой. Поэтому проведем исследования с полученной экспериментально передаточной функцией.

### 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. Оптимизация систем управления, обладающих астатизмом из-за сервомотора путем использования цифрового регулятора и двойным дифференцированием/В.И.Пугачев [и др.] // Политематический

сетевой электронный научный журнал Кубанского государственного аграрного университета. - 2013.- № 92.- С. 516-540.

4. Пиотровский Д.Л. Проблемы сушки зерна/ Д.Л. Пиотровский, Н.К. Берестин // Научные чтения имени профессора Н.Е. Жуковского Сборник научных статей V Международной научно-практической конференции. - 2015. - С. 194-197.

5. 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.Aasmaev, D.L.Piotrovskij - Krasnodar: izd-vo KubGTU, 2009.

2. Asmaev M.P. Avtomatizirovannoe upravlenie v tehniceskix sistemah: uchebnoe posobie/ M.P.Aasmaev, D.L.Piotrovskij, A.I.Rjabov - Krasnodar: izd-vo KubGTU, 2002.

3. Pugachev V.I. Optimizacija sistem upravlenija, obladajushhix astatizmom iz-za servomotora putem ispol'zovanija cifrovogo reguljatorf i dvojnym differencirovanijem/V.I.Pugachev [i dr.] // Politematicheskij setevoj jelektronnyj nauchnyj zhurnal Kubanskogo gosudarstvennogo agrarnogo universiteta. - 2013.- № 92.- S. 516-540.

4. Piotrovskij D.L. Problemy sushki zerna/ D.L. Piotrovskij, N.K. Be-restin // Nauchnye chtenija imeni professora N.E. Zhukovskogo Sbornik nauchnyh statej V Mezhdunarodnoj nauchno-prakticheskoj konferencii. - 2015. - S. 194-197.

5. 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.

*A MATHEMATICAL MODEL OF THE STABILIZATION PROCESS  
TEMPERATURE GRAIN DRYING*

**D.L. PIOTROVSKY, N.K. BERESTIN**

*Kuban State Technological University,  
2, Moskovskaya st., Krasnodar, Russian Federation, 350072,  
e-mail: piotrovsky2005@yandex.ru*

Passing the complexity in the technological processes of grain drying chemical-physical-biological phenomena suggests a hierarchy of experimental research methods. The most effective experimental methods are the active methods of experiment, based on receipt of temporary (or acceleration pulse) characteristics. The experiments were carried out at the end of the drying process, as the main load of the cooling system is at the end of drying. Conducted by averaging the experimental data at the control points and plot a curve of acceleration of the control object for the channel: the position of the damper at supply air of high pressure – temperature of drying agent in the second zone of the furnace. Processing of the acceleration curve by the method of Simoju allowed to obtain the transfer function of the object. A mathematical model of the object is described by transfer function with pure delay and the third degree of the denominator of the transfer function, complicating the analysis and synthesis of control systems with the specified quality indicators of the transition process, as it allows to obtain analytical expression of the transition function of the closed system. Further research is advantageously carried out with experimentally obtained transfer function. **Key words:** grain drying, transfer function, active experiment, the method Simoju.