

УДК 681.5.015.2

UDC 681.5.015.2

05.00.00 Технические науки

Technical science

**ПАРАМЕТРИЧЕСКАЯ ИДЕНТИФИКАЦИЯ ПРОЦЕССА СУШКИ ГОФРОКАРТОНА**

**PARAMETRIC IDENTIFICATION OF THE PROCESS OF DRYING CORRUGATED BOARD**

Черный Роман Романович  
*КВВАУЛ «Краснодарское высшее авиационное училище летчиков», Краснодар, Россия*

Cherny Roman Romanovich  
*Krasnodar higher military aviation school of pilots, Krasnodar, Russia*

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 определены неизвестные параметры передаточных функций управляющих и возмущающих каналов объекта управления. Для этого проведена обработка результатов экспериментов. Показано, что наблюдается не только динамическая, но и статическая нелинейность объекта управления, выражающаяся в физически меньшей инерционности процессов увеличения давления при увеличении открытия регулирующего парового клапана по сравнению с обратными процессами

The article identifies the unknown parameters of the transfer functions of governing and operating channels of the control object. To do this, we have carried out processing of results of experiments. It is shown that there is not only dynamic but also static nonlinearity of the control object, expressed in physically less persistence processes increase the pressure by increasing the opening of the steam regulating valve compared with the opposite processes

Ключевые слова: СУШКА ГОФРОКАРТОНА, СТРУКТУРНАЯ ИДЕНТИФИКАЦИЯ, КАНАЛЫ ВОЗДЕЙСТВИЯ, МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ

Keywords: DRYING OF CORRUGATED CARDBOARD, STRUCTURAL IDENTIFICATION, CHANNELS OF INFLUENCE, MATHEMATICAL MODEL

**Doi: 10.21515/1990-4665-125-016**

В [1] была проведена структурная идентификация технологического процесса сушки гофрокартона и построена его структурная схема как объекта автоматизации. Следующим этапом является его параметрическая идентификация, то есть определение неизвестных параметров передаточных функций управляющих и возмущающих каналов объекта управления.

Любая математическая модель технологического процесса сушки гофрокартона носит приближенный и ограниченный характер. Попытки идентификации связей могут носить лишь качественный характер, на основе теоретических предпосылок можно строить математические модели качественно отражающие происходящие в ходе технологического

процесса явления. Попытки параметрической идентификации явлений посредством этих моделей приводят к значительным отклонениям рассчитанных посредством этих математических моделей значений контролируемых параметров технологического процесса от измеренных реальных параметров. Отклонения редко когда удается уменьшить до хотя бы 20...40% [2]. Стоит также учесть, что примитивная линейная модель иногда в большей степени соответствует требованиям, необходимым для построения системы управления, чем глобальная ее модель, основанная на физических закономерностях процесса, что объясняется тем, что чем проще модель, тем проще сделать на его основе количественные и качественные выводы [3]. Поэтому для построения функциональной схемы технологического процесса были использованы в [4] уравнения равновесных процессов и была построена статическая модель технологического процесса. Статическая модель описывает технологический процесс в предположении, что переходные процессы во всех каналах системы завершены и система находится в уравновешенном состоянии. При этом передаточные функции каналов стремятся к постоянным передаточным коэффициентам, то есть динамическая модель при установлении переходных процессов стремится к статической модели. По статической модели в [4] была построена структурная схема технологического процесса. Однако не были определены не только параметры передаточных функций, но и их требуемое количество. Кроме того, следует отметить возможную нелинейность объекта управления, передаточные функции линейных моделей, описывающих с достаточной степенью приближения нелинейный канал объекта могут зависеть от величины сигнала на входе, его знака и начального состояния системы (канала), а также от состояния других каналов системы. Поэтому при проведении экспериментальных определений передаточных функций управляющих каналов (каналов управления) методом активного

эксперимента были подобраны входные сигналы (положение штока регулирующего клапана) 15, 50 и 100% от максимального значения.

Полученные результаты каждой серии экспериментов обрабатываются следующим образом:

1). Кривые разгона приводятся к нулевому входному сигналу. Плиты секции сушильного стола описываются уравнением линейным дифференциальным с постоянными коэффициентами:

$$a_n \frac{d^n \sigma}{dt^n} + a_{n-1} \frac{d^{n-1} \sigma}{dt^{n-1}} + \dots + a_1 \frac{d\sigma}{dt} + \sigma = b_m \frac{d^m \lambda}{dt^m} + b_{m-1} \frac{d^{m-1} \lambda}{dt^{m-1}} + \dots + b_1 \frac{d\lambda}{dt} + \lambda \quad (1)$$

где  $a_n, a_{n-1}, \dots, a_1, b_m, b_{m-1}, \dots, b_1$  – постоянные коэффициенты;

$\sigma$  – приведенное к единице отклонение регулируемой температуры контрольной плиты секции сушильного стола в безразмерном виде;

$\lambda$  – приведенное к единице управляющего воздействия в безразмерном виде.

Величины  $\sigma$  и  $\lambda$  вычисляются по формулам:

$$\sigma = \frac{\Delta\theta(t)}{\Delta\theta(\infty)} \quad (2)$$

$$\lambda = \frac{\Delta m(t)}{\Delta m(\infty)} \quad (3)$$

где  $\Delta\theta(t)$  – временная зависимость изменения температуры контрольной плиты секции сушильного стола, °С;

$\Delta\theta(\infty)$  – изменение температуры контрольной плиты секции сушильного стола после окончания переходного процесса, °С;

$\Delta m(t)$  – временная зависимость изменения положения штока регулирующего клапана (управляющий сигнал), ед;

$\Delta m(\infty)$  – изменение положения штока регулирующего клапана после завершения переходного процесса, ед.

Передаточная функция канала управления сушильного стола, описывается этим уравнением, может быть представлена в следующем виде:

$$K(p) = \frac{b_m p^m + \dots + b_1 p + 1}{a_n p^n + \dots + a_1 p + 1} \quad (4)$$

Передаточная функция канала управления сушильного стола в общем виде представляется как произведение:

$$W_{\theta_i}(p) = k_{\theta_i} K_i(p) \quad (5)$$

где  $k_{\theta_i}$  – передаточный коэффициент  $i$ -го канала управления сушильным столом «изменение положения штока регулирующего клапана – изменение температуры контрольной плиты  $i$ -й секции сушильного стола», °С;

$K_i(p)$  – приведенная передаточная функция по каналу «изменение положения штока регулирующего клапана – изменение температуры контрольной плиты  $i$ -й секции сушильного стола», °С.

Передаточный коэффициент при этом определяется по формуле:

$$k_{\theta_i} = \frac{\Delta\theta_i(\infty)}{\Delta m_i(\infty)} \quad (6)$$

где  $\Delta\theta_i(\infty)$  – изменение температуры контрольной плиты  $i$ -й секции сушильного стола после окончания переходного процесса, °С.

$\Delta m_i(\infty)$  – изменение положения штока клапана  $i$ -го парового контура после завершения переходного процесса, ед. начальному значению. Для этого из всех измеренных точек кривой разгона вычисляется ее начальное значение (измеренное в начальный момент времени).

2) Кривые разгона приводятся к единичному входному сигналу. Для этого значения кривой разгона, измеренные в каждый момент времени, делятся на значения входного сигнала, при котором эти кривые разгона получены.

3) Значения кривых разгона в каждый момент времени, полученные в серии экспериментов для трех различных значений входного сигнала



Приведенное время вычисляется по формуле:

$$Q = \frac{t}{F_i} \quad (13)$$

Сначала вычисляются коэффициенты  $F_i$  до тех пор пока  $F_i > 0$ .

Затем из системы уравнений (7) находятся коэффициенты  $a_1, a_2, \dots, a_n, b_1, b_2, \dots, b_m$ .

Передаточный коэффициент определяется по формуле (6) значение  $\sigma$  для каждого момента времени – по формуле (2)

В результате проведенных расчетов были получены передаточные функции каналов управления сушильным столом.

При положительном ступенчатом сигнале по каналу «положение штока регулирующего клапана парового контура первой секции сушильного стола – температура рабочей поверхности контрольной плиты I сушильного стола» была получена кривая разгона, аппроксимируемая затем передаточной функцией:

$$W_{\sigma_1}^+(p) = k_{\sigma_1}^+ \frac{b_1 p}{a_2 p^2 + a_1 p + 1} \quad (14)$$

где  $b_1, a_2, a_1$  – временные коэффициенты;

$k_{\sigma_1}^+$  – передаточный коэффициент, °С.

Временные коэффициенты соответствуют значениям:

$$a_2 = 771,25 \text{ мин}^2;$$

$$a_1 = 74,20 \text{ мин}^2;$$

$$b_1 = 57,05 \text{ мин}^2.$$

Передаточный коэффициент соответственно:  $k_{\sigma_1}^+ = 130,66$  °С.

При положительном ступенчатом сигнале на канале «положение штока регулирующего клапана парового контура первой секции сушильного стола – давление пара после регулирующего клапана» была получена кривая разгона, аппроксимированная затем передаточной функцией:

$$W_{p_1}(p) = \frac{k_{p_1}^*}{a_{p_1}p + 1} \quad (15)$$

где  $a_{p_1}$  – временной коэффициент, мин;

$k_{p_1}^*$  – передаточный коэффициент, Мпа.

Передаточный коэффициент определяется соответственно как:

$$k_{p_1}^* = 1,175 \text{ Мпа.}$$

Относительная ошибка аппроксимации вычисляется по формулам:

$$\% \quad (16)$$

где  $\varepsilon_{\theta}(t_i)$  – ошибка аппроксимации (относительная), в момент времени  $t_i$ , %;

– расчетное значение изменения температуры контрольной плиты в момент времени  $t_i$ , %;

$\Delta\theta(t_i)$  – экспериментальное значение изменения температуры контрольной плиты в момент времени  $t_i$ , %;

$\Delta\theta^{(c)}$  – установившееся значение кривой разгона изменения температуры, °С.

$$(17)$$

где  $\varepsilon_p(t_i)$  – относительная ошибка аппроксимации, в момент времени  $t_i$ , %;

– расчетное значение изменения давления пара после регулирующего клапана в момент времени  $t_i$ , Мпа.

$\Delta P(t_i)$  – экспериментальное значение изменения давления пара после регулирующего клапана в момент времени  $t_i$ , Мпа.

$\Delta P^{(c)}$  – установившееся значение кривой разгоны изменения давления пара после регулирующего клапана, Мпа.

При отрицательном ступенчатом сигнале по каналу «положение штока регулирующего клапана парового контура первой секции сушильного стола– температура рабочей поверхности контрольной плиты I

сушильного стола» была получена кривая разгона, аппроксимируемая затем передаточной функцией:

$$W_{\theta_1}^-(p) = k_{\theta_1}^- \frac{b_3^* p^3 + b_2^* p^2 + b_1^* p + 1}{a_3^* p^3 + a_2^* p^2 + a_1^* p + 1} \quad (18)$$

где  $b_3^*, b_2^*, b_1^*, a_3^*, a_2^*, a_1^*$  – временные коэффициенты;

$k_{\theta_1}^-$  – передаточный коэффициент, °С.

Временные коэффициенты определяются соответственно как:

$$a_3^* = 37620 \text{ мин}^3; \quad b_3^* = -342,05 \text{ мин}^3;$$

$$a_2^* = 3593 \text{ мин}^2; \quad b_2^* = 795,25 \text{ мин}^2;$$

$$b_1^* = 106,25 \text{ мин}; \quad b_1^* = 30,23 \text{ мин}.$$

Передаточный коэффициент соответственно:  $k_{\theta_1}^- = -129,43^\circ\text{С}$ .

При отрицательном ступенчатом сигнале по каналу «положение штока регулирующего клапана парового контура первой секции сушильного стола – давление пара после регулирующего клапана» была получена кривая разгона, аппроксимированная затем передаточной функцией:

$$W_{p_1}^-(p) = \frac{k_{p_1}^- (b_{p_1}^* p + 1)}{a_{p_2}^* p^2 + a_{p_1}^* p + 1} \quad (19)$$

где  $b_{p_1}^*, a_{p_2}^*, a_{p_1}^*$  – временные коэффициенты;

$k_{p_1}^-$  – передаточный коэффициент, МПа.

Временные коэффициенты определяются соответственно как:

$$a_{p_2}^* = 37620 \text{ мин}^2;$$

$$a_{p_1}^* = 3593 \text{ мин};$$

$$b_{p_1}^* = 106,25 \text{ мин};$$

Передаточный коэффициент соответственно:  $k_{p_1}^- = -1,0145 \text{ МПа}$ .

Вторая секция сушильного стола в конструктивном исполнении и по своим первоначальным техническим характеристикам является полным аналогом первой секции. Отличия в передаточных характеристиках по



каналам управления и каналам давления (канал «положение штока клапана – температура контрольной плиты» и канал «положение штока клапана – давление пара») объясняются различными режимами работы.

При отрицательном ступенчатом сигнале по каналу «положение штока регулирующего клапана парового контура третьей (четвертой) секции сушильного стола – температура рабочей поверхности контрольной плиты III сушильного стола» была получена кривая разгона, аппроксимируемая затем передаточной функцией:

$$W_{\theta_3}^+(p) = k_{\theta_3}^+ \frac{b_3 p + 1}{a_6 p^3 + a_5 p^2 + a_4 p + 1} \quad (20)$$

где  $b_3, a_6, a_5, a_4$  – временные коэффициенты;

$k_{\theta_3}^+$  – передаточный коэффициент, °С.

Временные коэффициенты определяются соответственно как:

$$a_6 = 134,5 \text{ мин}^3; \quad b_3 = 57,05 \text{ мин};$$

$$a_5 = 297,77 \text{ мин}^2; \quad a_4 = 66,49 \text{ мин};$$

Передаточный коэффициент соответственно:  $k_{\theta_3}^+ = 125,3^\circ\text{С}$ .

При положительном ступенчатом сигнале по каналу «положение штока регулирующего клапана парового контура третьей (четвертой) секции сушильного стола – давление пара после регулирующего клапана» была получена кривая разгона, аппроксимированная затем передаточной функцией:

$$W_{p_3}^+(p) = k_{p_3}^+ \frac{1}{a_{p_3} + 1} \quad (21)$$

где  $a_{p_3}$  – временной коэффициент, мин;

$k_{p_3}^+$  – передаточный коэффициент, МПа;

Временной коэффициент определяется соответственно как:

$$a_{p_3} = 47,67 \text{ мин};$$

Передаточный коэффициент соответственно:  $k_{p_3}^+ = 1,175 \text{ МПа}$ .

Следует отметить, что в третьей (четвертой) секции сушильного стола греющие плиты соединены попарно последовательно, что увеличивает интенсивность процесса конденсатообразования, так как увеличивается поверхность теплообмена. Однако увеличивается и инерционность системы, так как увеличивается суммарный объем парового пространства в плитах и их суммарная масса.

При отрицательном ступенчатом сигнале по каналу «положение штока регулирующего клапана парового контура третьей (четвертой) секции сушильного стола – температура рабочей поверхности контрольной плиты III сушильного стола» была получена кривая разгона, аппроксимируемая затем передаточной функцией:

$$W_{\Theta_3}^-(p) = k_{\Theta_3}^- \frac{b_7'p^4 + b_6'p^3 + b_5'p^2 + b_4'p + 1}{a_{10}'p^4 + a_9'p^3 + a_8'p^2 + a_7'p + 1} \quad (22)$$

где  $b_7, b_6, b_5, b_4, a_{10}, a_9, a_8, a_7$  – временные коэффициенты;

$k_{\Theta_3}^-$  – передаточный коэффициент, °С.

Временные коэффициенты определяются соответственно как:

$$a_{10}' = 1,111 \cdot 10^7 \text{ мин}^4; \quad b_7' = -1,463 \cdot 10^4 \text{ мин}^4;$$

$$a_9' = 9,258 \cdot 10^5 \text{ мин}^3; \quad b_6' = 2,909 \cdot 10^5 \text{ мин}^3;$$

$$a_8' = 2,660 \cdot 10^4 \text{ мин}^2; \quad b_5' = 1,585 \cdot 10^4 \text{ мин}^2;$$

$$a_7' = 283,08 \text{ мин}; \quad b_4' = 230,30 \text{ мин}.$$

Передаточный коэффициент соответственно:  $k_{\Theta_3}^- = 110^\circ\text{С}$ .

При отрицательном ступенчатом сигнале по каналу «положение штока регулирующего клапана парового контура третьей (четвертой) секции сушильного стола – давление пара после регулирующего клапана» была получена кривая разгона, аппроксимированная затем передаточной функцией:

$$W_{p_3}^-(p) = k_{\Theta_1}^- \frac{b_{p_2}'p + 1}{a_{p_5}'p^3 + a_{p_4}'p^2 + a_{p_3}'p + 1} \quad (23)$$

где  $b'_{p2}, a'_{p3}, a'_{p4}, a'_{p5}$  – временные коэффициенты;

$k'_{p3}$  – передаточный коэффициент, МПа.

Временные коэффициенты определяются как:

$$a'_{p5} = 209,360 \text{ мин}^3;$$

$$a'_{p4} = 52,893 \text{ мин}^2;$$

$$a'_{p3} = 94,524 \text{ мин};$$

$$b'_{p2} = -0,088 \text{ мин}$$

Передаточный коэффициент соответственно:  $k'_{p3} = 1,085$  МПа.

По результатам эксперимента можно сделать вывод о том, что наблюдается не только динамическая, но и статическая нелинейность объекта управления, выражающаяся в физически меньшей инерционности процессов увеличения давления (уменьшения влажности гофрокартона) при увеличении открытия регулирующего парового клапана по сравнению с обратными процессами, что объясняется тем, что скорость увеличения давления пара определяется в основном процессом нагнетания пара, а скорость уменьшения давления – условиями конденсатообразования. При увеличении давления пара скорость подъема температуры сушильной плиты определяется условиями теплопередачи от пара к стенке плиты. В случае уменьшения давления изменяются и условия теплопередачи от пара к стенке плиты.

### Литература

1. Пиотровский Д.Л. Моделирование процесса сушки гофрокартона в первой секции сушильного стола/ Д.Л.Пиотровский, В.Г.Кротов //Политематический сетевой элект-ронный научный журнал Кубанского государственного аграрного университета. 2012. - № 77. - С. 84-93.
2. Пиотровский Д.Л. Определение передаточных функций сушильного стола для процесса сушки гофрокартона/Д.Л.Пиотровский В.Г.Кротов//Научные труды SWorld. 2009.- Т. 2. № 4 - С. 47-48.
3. Пиотровский Д.Л. Результаты экспериментальных исследований процессов сушки гофрокартона на сушильном столе (1 стадия)/ Д.Л.Пиотровский, Р.Р.Черный, С.В.Вешкин //Научные чтения имени профессора Н.Е. Жуковского. Сборник научных

статей VI Международной научно-практической конференции. Министерство обороны Российской Федерации, КВВАУЛ им. А.К. Серова. 2016. - С. 100-103.

4. Пиотровский Д.Л. Математическая модель статики процесса сушки гофрокартона/ Д.Л. Пиотровский, В.Г. Кротов// Научные труды SWorld. 2010. - Т. 3. № 2. - С. 92-93.

### References

1. Piotrovskij D.L. Modelirovanie processa sushki gofrokartona v pervoj sekcii sushil'nogo stola/ D.L.Piotrovskij, V.G.Krotov //Politematicheskij setevoj jelektronnyj nauchnyj zhurnal Kubanskogo gosudarstvennogo agrarnogo universiteta. 2012. - № 77. - S. 84-93.

2. Piotrovskij D.L. Opredelenie peredatochnyh funkcij sushil'nogo stola dlja processa sushki gofrokartona/D.L.Piotrovskij V.G.Krotov//Nauchnye trudy SWorld. 2009.- Т. 2. № 4 - S. 47-48.

3. Piotrovskij D.L. Rezul'taty jeksperimental'nyh issledovanij processov sushki gofrokartona na sushil'nom stole (1 stadija)/ D.L.Piotrovskij, R.R.Chernyj, S.V.Veshkin //Nauchnye chtenija imeni professora N.E. Zhukovskogo. Sbornik nauchnyh statej VI Mezhdunarodnoj nauchno-prakticheskoj konferencii. Ministerstvo oborony Rossijskoj Federacii, KVVAUL im. A.K. Serova. 2016. - S. 100-103.

4. Piotrovskij D.L. Matematicheskaja model' statiki processa sushki gofrokartona/ D.L. Piotrovskij, V.G. Krotov// Nauchnye trudy SWorld. 2010. - Т. 3. № 2. - S. 92-93.