УДК 631.362.6

ИССЛЕДОВАНИЕ ШАХТНОЙ ЗЕРНОСУШИЛКИ КАК ОБЪЕКТА УПРАВЛЕНИЯ

Андрианов Н.М.

Новгородский Государственный Университет, В. Новгород, Россия

Моделирование и разработка систем автоматического управления основаны на информации о статических и динамических характеристиках объектов управления. С целью её получения выполнены экспериментальные исследования зерносушилки СЗШ-8.

Для измерения температуры и влажности зерна сушильную камеру снабдили преобразователями температуры и пробоотборниками, которые разместили в семи зонах по её высоте. Поддержание температуры теплоносителя и экспозиции сушки на постоянном уровне осуществили автоматическими регуляторами.

Методом типовых возмущений получили реализации переходных процессов по каналам управляющих воздействий сушильной камеры, *рис. 1*. Приняты следующие обозначения: W_0, W – начальная и конечная влажность зерна; $\vartheta_{ç0}$ и $\vartheta_ç$ - начальная и конечная температура зерна; ϑ_T - температура теплоносителя; ω - частота колебаний выгрузного аппарата.

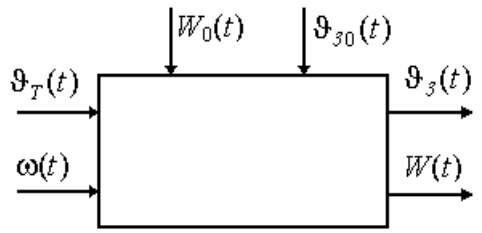

Рис. 1. Схема сушильной камеры

На *рис. 2* представлен вид переходного процесса по каналу $\vartheta_T - W$ и показан результат его аппроксимации уравнениями динамических звеньев первого и второго порядка. Погрешность аппроксимации, оценили по максимальному относительному отклонению экспериментальных данных от моделируемых. Для звена первого порядка она составила 18–22 %, для звена второго порядка – 6–9 %. Дальнейшее усложнение аппроксимирующего выражения не привело к существенному уменьшению погрешности, поэтому уравнение звена второго порядка с запаздыванием использовали как основное аппроксимирующее выражение.

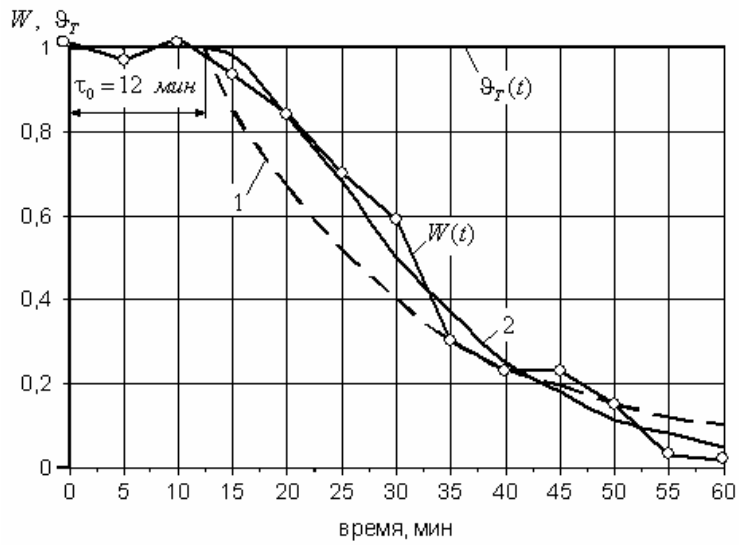

Рис. 2 Переходный процесс по каналу $\vartheta_T - W$ для 15-го ряда коробов и его аппроксимация уравнениями динамических звеньев: 1 – первого порядка; 2 – второго порядка

Динамические свойства по каналам передачи возмущающих воздействий $W_0 - W$, $W_0 - \vartheta_ç$ и $\vartheta_{ç0} - \vartheta_ç$ аппроксимировали уравнением усилительного динамического звена с чистым запаздыванием.

В результате исследований определили вид и значения параметров передаточных функций сушильной камеры по прямым и перекрестным каналам передачи управляющих и возмущающих воздействий, *табл. 1*.

Таблица 1. Передаточные функции сушилки СЗШ-8

Канал передачи сигнала	Передаточная функция	
	2–4 ряд коробов	6–15 ряд коробов
$\vartheta_T - \vartheta_Ç$	$\frac{K_{\vartheta_T\vartheta_Ç} \cdot e^{-\tau_{01} \cdot p}}{T_2^2 \cdot p^2 + T_1 \cdot p + 1}$	$\frac{K_{\vartheta_T\vartheta_Ç} \cdot e^{-\tau_{01} \cdot p}}{T_2^2 \cdot p^2 + T_1 \cdot p + 1}$
$\omega - W$	$\frac{K_{\omega W} \cdot e^{-\tau_{02} \cdot p}}{T_2^2 \cdot p^2 + T_1 \cdot p + 1}$	$\frac{K_{\omega W} \cdot e^{-\tau_{02} \cdot p}}{T_2^2 \cdot p^2 + T_1 \cdot p + 1}$
$\vartheta_T - W$	$\frac{K_{\vartheta_T W} \cdot e^{-\tau_{03} \cdot p}}{T_2^2 \cdot p^2 + T_1 \cdot p + 1}$	$\frac{K_{\vartheta_T W} \cdot e^{-\tau_{03} \cdot p}}{T_2^2 \cdot p^2 + T_1 \cdot p + 1}$
$\omega - \vartheta_Ç$	$\frac{K_{\omega\vartheta_Ç}}{T_2^2 \cdot p^2 + T_1 \cdot p + 1}$	$\frac{K_{\omega\vartheta_Ç}(T'' \cdot p^2 + T' \cdot p + 1)}{T_3^3 \cdot p^3 + T_2^2 \cdot p^2 + T_1 \cdot p + 1}$
$W_0 - \vartheta_Ç$	$K_{W_0\vartheta_Ç} \cdot e^{-\tau \cdot p}$	$K_{W_0\vartheta_Ç} \cdot e^{-\tau \cdot p}$
$W_0 - W$	$K_{W_0 W} \cdot e^{-\tau \cdot p}$	$K_{W_0 W} \cdot e^{-\tau \cdot p}$
$\vartheta_{Ç0} - \vartheta_Ç$	$K_{\vartheta_{Ç0}\vartheta_Ç} \cdot e^{-\tau \cdot p}$	–

Из данных таблицы следует, что динамические свойства различных по высоте сушильной камеры зон описываются передаточными функциями различного вида. Такое различие динамической структуры объекта по высоте обусловлено качественными отличиями процессов, протекающих в указанных зонах. Приведенные данные отражают многосвязность сушильной камеры как объекта управления и наличие в ней внутренних перекрестных связей между отдельными каналами передачи сигналов.

Пределы изменения параметров передаточных функций представлены в *табл. 2*, а статических коэффициентов передачи в *табл. 3*.

Таблица 2. Постоянные времени передаточных функций

Постоянная времени	Пределы изменения по каналам передачи, мин			
	$\vartheta_T - W$	$\vartheta_T - \vartheta_Ç$	$\omega - W$	$\omega - \vartheta_Ç$
T_1	14,38–32,32	10,06–19,53	15,19–31,93	-25,83–(-14,24)
T_2	6,66–15,36	4,49–9,23	6,76–15,56	7,69–14,39
T_3	–	–	–	-7,98–(- 4,61)
T'	–	–	–	-2,19–68,21
T''	–	–	–	69,14–46,12
τ_0	11,3–12,9	3,7–5,1	6,7–16,7	–

Таблица 3. Статические коэффициенты передачи

Канал передачи	Единица измерения	Пределы изменения
$\vartheta_T - \vartheta_Ç$	$^oC/^oC$	0,035–0,351
$\omega - W$	%/мин$^{-1}$	- 0,034–0,349
$\vartheta_T - W$	%/^oC	0,007–0,05
$\omega - \vartheta_Ç$	^oC/мин$^{-1}$	- 1,13–0,785
$W_0 - \vartheta_Ç$	^oC/%	-1,769–1,009
$W_0 - W$	%/%	0,507–0,932

Установлено, что постоянные времени передаточных функций изменяются по высоте сушильной камеры, что характеризует её как распределенный динамический объект. На *рис. 3* представлены зависимости изменения постоянных времени для канала ϑ_T – $\vartheta_Ç$. Из протекания зависимостей видно, что в направлении увеличения ряда коробов постоянные времени возрастают. Этим подтверждается их зависимость от экспозиции сушки.

Выявлена зависимость параметров передаточных функций от характеристик обрабатываемого зернового вороха и режима сушки. На *рис. 3* показана зависимость постоянных времени от начальной влажности W_0 зерна, а на *рис. 4* – от частоты ω колебаний выпускного аппарата. Из них видно, что большим значениям W_0 и ω соответствуют меньшие значения постоянных времени, что указывает на то, что слой более влажного и быстро перемещающегося зерна нагревается быстрее. Это объясняется уменьшением объемной теплоемкости подвижного слоя зерна при увеличении его влажности и скорости перемещения по сушильной камере.

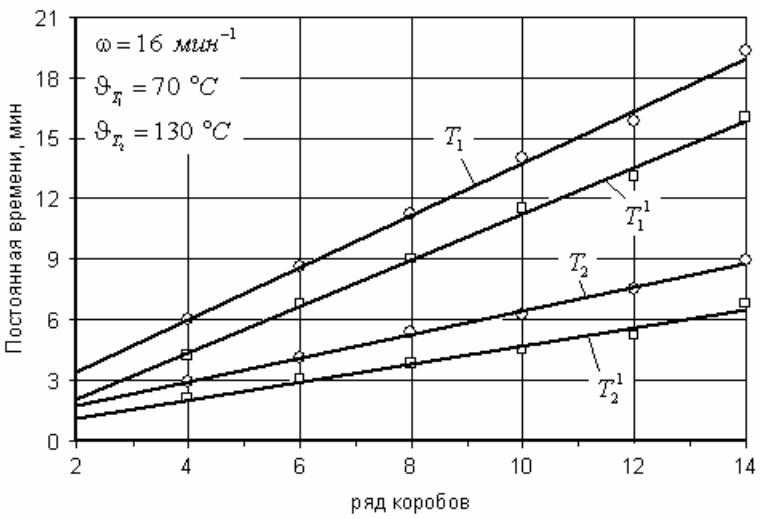

Рис. 3. Изменение постоянных времени по высоте сушильной камеры для канала $\vartheta_T - \vartheta_Ç$ при различных W_0: T_1, T_2 – при W_0=18 %, T_1^1, T_2^1 – при W_0=26 %

Изменение числовых значений постоянных времени под влиянием W_0 и ω в пределах их возможных изменений достигает 20 % и более.

Между процессами нагрева и изменения влажности зерна в сушильной камере заметна связь, учитывая которую переходный процесс изменения температуры $\vartheta_Ç$ зерна при возмущении по температуре ϑ_T теплоносителя можно интерпретировать следующим образом, *рис. 5*. После возмущения переходный процесс протекает в два периода. Первый характеризуется интенсивным повышением температуры $\vartheta_Ç$ зерна. Скорость изменения температуры в этом периоде определяется только теплоинерционными свойствами зернового слоя, так как изменение его влажности W из-за большой инерционности невелико и практически не влияет на приращение температуры $\vartheta_Ç$. Продолжительность периода составляет 20–25 минут.

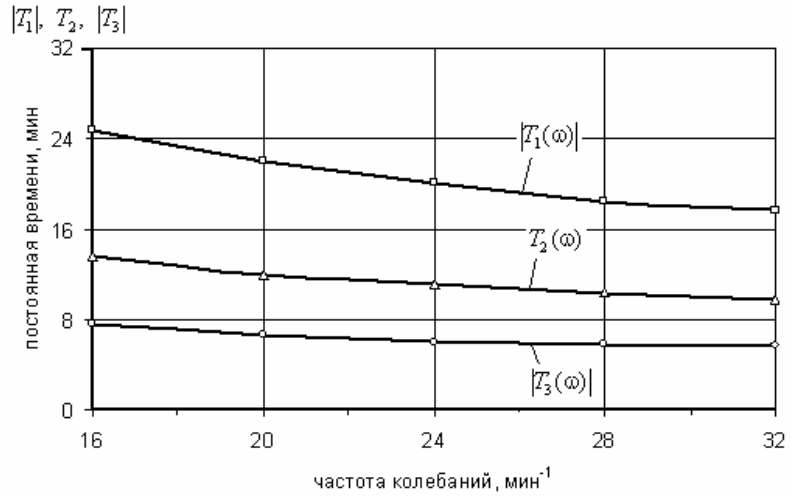

Рис. 4. Зависимость постоянных времени по каналу $\omega - \vartheta_Ç$ от ω для 15-го ряда коробов: $W_0 = 26$ %, $\vartheta_T = 100$ °C

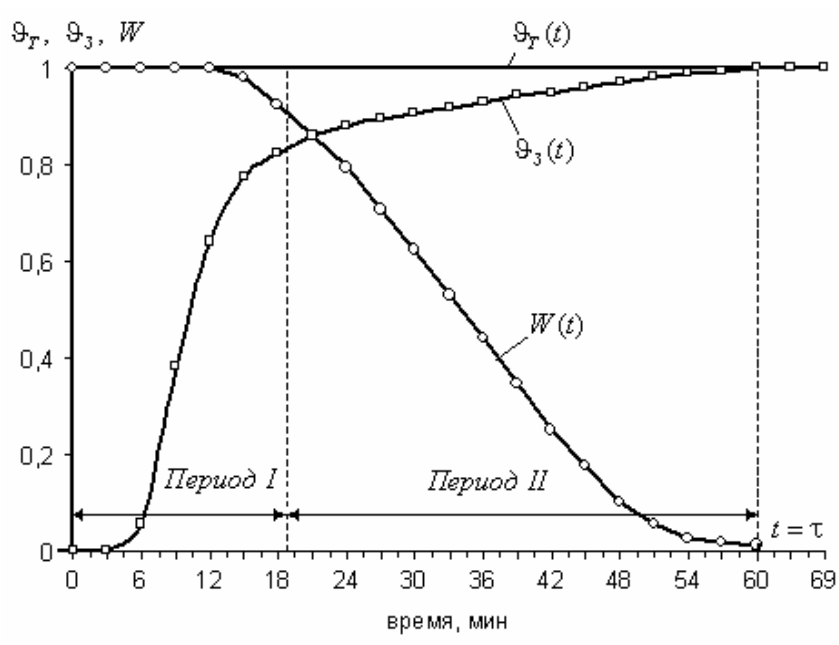

Рис. 5. Переходные процессы по каналам $\vartheta_T - \vartheta_Ç$ и $\vartheta_T - W$ для 15-го ряда коробов при $W_0 = 22$ %, $\omega = 24$ *ìèí* $^{-1}$, $\vartheta_{T_1} = 70$ °*C*, $\vartheta_{T_2} = 130$ °*C*

Во втором периоде начинается интенсивное изменение влажности *W*, что приводит к постепенному перераспределению составляющих теплового баланса процесса сушки. Доля теплоты затрачиваемой на испарение влаги из зерна возрастает, поэтому процесс его нагрева существенно замедляется. Дальнейшее изменение температуры $\vartheta_Ç$ зерна полностью определяется инерционностью поля его влагосодержания и характером взаимной связи процессов тепло- и массопереноса. Поэтому, время окончания переходных процессов по каналам $\vartheta_T - \vartheta_Ç$ и $\vartheta_T - W$ практически одинаково и определяется экспозицией сушки τ.

Для разработки систем автоматического регулирования температуры зерна важно правильно оценить инерционные свойства сушильной камеры по каналу регулирования $\vartheta_T - \vartheta_Ç$. Расчет регулятора по завышенным данным ведет к снижению быстродействия системы, а необоснованное занижение – к потере устойчивости. Применительно к каналу $\vartheta_T - \vartheta_Ç$ обоснованным, с точки зрения максимального быстродействия системы, является выбор постоянных времени передаточной функции на основе информации о времени затухания переходных процессов, обусловленных теплоинерционными свойствами зернового слоя. На основе полученных данных постоянные времени можно принять изменяющимися в диапазоне T_1=4,9–6,1 мин, T_2=2,3–3,1 мин. Причем, их меньшие значения соответствуют большим влажностям ($W_0 \geq 22$ %) и скоростям перемещения ($\omega \geq 24$ *ìèí* $^{-1}$) зерна по сушильной камере.

Анализ переходных процессов, *рис. 6*, по каналу $\omega - \vartheta_Ç$ также подтверждает существование связи между процессами изменения температуры и влажности зерна. При скачкообразном изменении ω изменение $\vartheta_Ç$ протекает в два периода. В первом причиной изменения $\vartheta_Ç$ является резкое изменение состояния подвижного зернового слоя. Так увеличение ω ведет к разуплотнению и снижению аэродинамического сопротивления подвижного слоя зерна. Это вызывает увеличение подачи теплоносителя в сушильную камеру и, при постоянстве его температуры, ведет к увеличению количества теплоты, подводимой к зерну. Вследствие этого увеличивается его температура. Влажность *W* зерна из-за большой инерционности в этом периоде практически не меняется и не влияет на процесс нагрева.

Инерционность переходного процесса по каналу $\omega - \vartheta_Ç$ в первом периоде определяется теплоинерционными свойствами слоя зерна. Это предположение подтверждается близостью продолжительностей первых периодов переходных процессов по каналам $\vartheta_T - \vartheta_Ç$, *рис. 5*, и $\omega - \vartheta_Ç$, *рис. 6*.

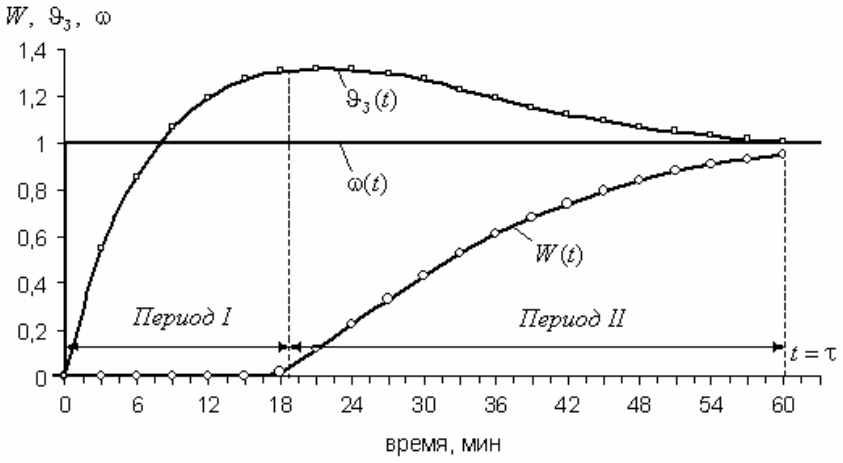

Рис. 6. Переходные процессы по каналам $\omega - W$ и $\omega - \vartheta_Ç$ для 10-го ряда коробов: $W_0 = 22$ %, $\vartheta_T = 100$ °*C*, $\omega_1 = 16$ *ìèí* $^{-1}$, $\omega_2 = 32$ *ìèí* $^{-1}$

Во втором периоде заметно меняется влажность W зерна, что приводит к постепенному перераспределению составляющих теплового баланса процесса сушки и изменению температуры $\vartheta_Ç$ зерна. С увеличением влажности температура зерна постепенно понижается. Продолжительность переходных процессов по каналам $\omega - \vartheta_Ç$ и $\omega - W$ одинакова и равна экспозиции сушки τ.

Увеличение частоты ω сопровождается кратковременным повышением температуры зерна в начальном периоде процесса. Превышение температуры $\vartheta_Ç$ для практически встречающихся режимов сушки может достигать 2–8 °С и – стать опасным для семенных и продовольственных качеств зерна. Причем большие значения превышений $\vartheta_Ç$ соответствуют большим значениям влажности W и скорости (ω) перемещения зерна по сушильной камере.

Существенное влияние на характер протекания переходных процессов по каналу $\omega - \vartheta_Ç$ оказывает влажность W_0 зерна. На *рис. 7* представлены переходные процессы соответствующие различным влажностям W_0. Из их протекания видно, что при высоких влажностях ($W_0 > 24$ %) установившаяся температура зерна в конце переходного процесса может быть выше начальной, а при меньших ($W_0 < 22$ %) – меньше. Это является следствием знакопеременности статического коэффициента передачи сушильной камеры по каналу $\omega - \vartheta_Ç$, *табл. 3*.

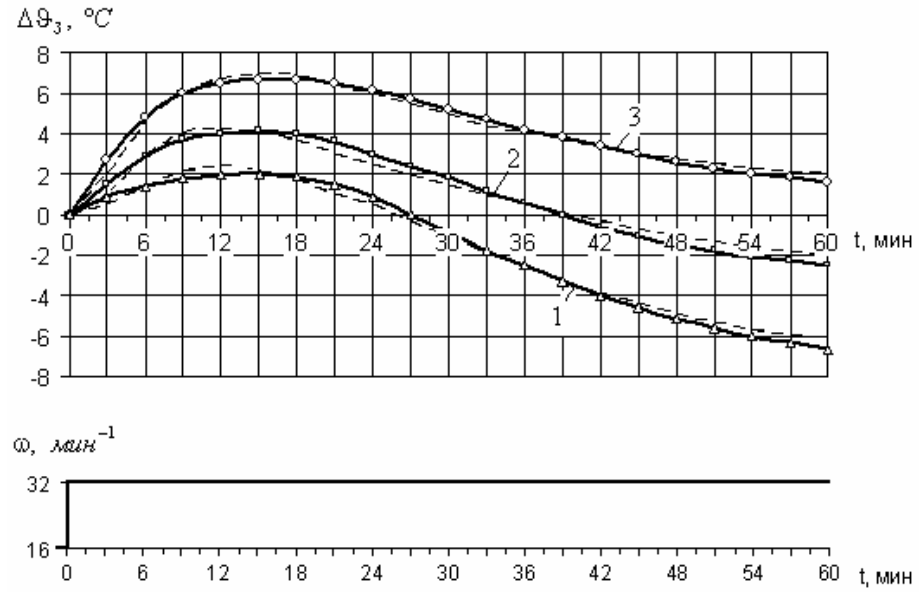

Рис. 7. Переходные процессы по каналу $\omega - \vartheta_Ç$ для 15-го ряда коробов при различных W_0 и их аппроксимация уравнением динамического звена третьего порядка: $\vartheta_T = 100$ °*C*, $1 - W_0 = 18$ %, $2 - W_0 = 22$ %, $3 - W_0 = 26$ %

Неоднозначные приращения температуры $\Delta\vartheta_Ç$ зерна при изменениях частоты ω свидетельствуют о невозможности использования переменной ω в качестве управляющего воздействия по каналу управления температурой зерна в сушильной камере.

Динамические свойства сушильной камеры по каналу $\omega - \vartheta_{ç}$ аппроксимированы уравнением динамического звена третьего порядка с погрешностью 8–12 %.

Таким образом, полученные данные характеризуют сушильную камеру как сложный распределенный динамический объект с переменной структурой по высоте и наличием внутренних перекрестных связей между каналами передачи сигналов. Параметры её передаточных функций зависят от характеристик зерна и режимов его обработки, а значения постоянных времени и времени запаздывания подтверждают её значительную инерционность как объекта управления.