УДК 631.365.22+621.317

С.И. Осадчий, д-р техн. наук, М.А. Федотова, асист., И.А. Скрынник, канд. техн. наук
Кировоградский национальный технический университет

Упредитель Смита как средство компенсации запаздываний зерносушилки каскадного типа с кипящим слоем

В этой работе впервые использована методика расчёта структуры и параметров упредителя Смита на примере матрицы передаточных функций объекта с запаздыванием – зерносушилки с кипящим слоем каскадного типа.
кипящий слой, каскады-решета, запаздывание, упредитель Смита, матрица передаточных функций, уравнения состояний, многомерный объект с запаздываниями

С.И. Осадчий, д-р техн. наук, М.А. Федотова, асист., И.А. Скрынник, канд. техн. наук
Кировоградский национальный технический университет
Упредитель Смита как средство компенсации запаздываний зерносушилки каскадного типа с кипящим слоем

В этой работе впервые использована методика расчёта структуры и параметров упредителя Смита на примере матрицы передаточных функций объекта с запаздыванием – зерносушилки с кипящим слоем каскадного типа.
кипящий слой, каскады-решета, запаздывание, упредитель Смита, матрица передаточных функций, уравнения состояний, многомерный объект с запаздываниями

Вступление. Кипящий слой используется во многих отраслях производства, в частности в области сушки свежесобранного урожая зерновых. В установках, в основе которых положен принцип кипящего состояния, процесс сушки происходит во много раз быстрее, чем в обычных зерносушилках. Это объясняется тем, что во взвешенном состоянии дисперсный материал омывается теплоносителем со всех сторон, что в значительной степени ускоряет процесс отдачи влажности в виде пара, то есть увеличивается скорость сушки при минимальной её экспозиции.

Качественно управлять быстротечными процессами возможно только при наличии автоматических систем, разработка которых для такого рода объектов представляет некоторые трудности.

Постановка задачи. Анализ конструкции и динамических характеристик новой зерносушилки, внешний вид которой показан на рис. 1 показал, что она относится к классу многомерных объектов с распределёнными параметрами и чистым запаздыванием. Большинство алгоритмов [2] синтеза оптимальных систем автоматического управления такими объектами в частотной области не имеют возможности оперировать матрицами, элементы которых имеют вид $\boldsymbol{A \cdot e^{-\tau s}}$. Поэтому, перед тем как использовать те или иные алгоритмы синтеза, возникла потребность в компенсации этих самых запаздываний. Одним из эффективных способов компенсации является метод расчёта структуры и параметров матрицы передаточных функций упредителя Смита **R(s)**, который применяется в случае, если динамика объекта задана в виде уравнений состояния (УС).

Рисунок 1 – Внешний вид новой конструкции зерносушилки с кипящим слоем

Цель работы. Целью данной работы является получение структуры и параметров упредителя Смита, который скомпенсирует чистое запаздывание в объекте, что задан в виде матрицы передаточных функций (МПФ), а не УС.

Решение задачи. Пусть зерносушилка с кипящим слоем (рис. 1) описывается матрицею передаточных функций вида $W_{ОБ}$(s), у которой входными сигналами является изменение положения шибера S_h, что регулирует загрузку сушильной камеры, и вариация температуры агента сушки T; выходными параметрами – высота кипящего слоя на каскадах h и конечная влажность высушенной продукции $\boldsymbol{\omega}$:

$$W_{ОБ}(\mathrm{s}) = \begin{bmatrix} \dfrac{\alpha_1(\mathrm{s}+\beta_1)}{\mathrm{s}+\beta_2}e^{-\tau_1 s} & 0 \\ \dfrac{\alpha_2(\mathrm{s}-\varphi)}{\mathrm{s}+p_2}e^{-\tau_2 s} & \dfrac{\alpha_3(\mathrm{s}+\varphi)}{\mathrm{s}+p_2}e^{-\tau_3 s} \end{bmatrix}, \tag{1}$$

где τ_1, τ_2, τ_3 – запаздывания по каналам $S_h – h$, $S_h – \omega$, $T – \omega$ соответственно;

α_i, φ, β_i, p_2 – коэффициенты;

s – оператор Лапласа.

Тогда, согласно [2], нужно найти такую структуру и параметры компенсатора $R(s)$, параллельное соединение которого с объектом $W_{ОБ}$(s) исключит его запаздывания.

Расчёт компенсатора будем производить по такой формуле:

$$R(s) = \sum_{i=0}^{l} C_i e^{-\tau_i s}(sE_n - \sum_{i=0}^{l} A_i e^{-\tau_1 s})^{-1} \cdot (\sum_{j=0}^{r} B_j - \sum_{j=0}^{r} B_j e^{-\tau_2 s}) + (\sum_{j=0}^{r} D_j - \sum_{j=0}^{r} D_j e^{-\tau_3 s})), \tag{2}$$

где E_n – единичная матрица размерностью nxn;

A_i числовая матрица размерностью nxn;

B_j – числовая матрица размерностью nxm;

C_l – числовая матрица размерностью mxn;

D_j – числовая матрица размерностью mxm.

С другой стороны МПФ (1) зерносушилки можна разложить на произведение матриц P^{-1} и М так, чтобы $W_{ОБ}(s)=P^{-1}M$,

$$\text{где } P^{-1}=\begin{bmatrix} p_{11} & p_{12} \\ p_{21} & p_{22} \end{bmatrix}, \tag{3}$$

$$M=\begin{bmatrix} M_{11}e^{-\tau_1 s} & M_{12}e^{-\tau_3 s} \\ M_{21}e^{-\tau_2 s} & M_{22}e^{-\tau_3 s} \end{bmatrix} \quad . \tag{4}$$

Представим матрицу М в виде суммы трёх:

$$M=M_1+M_2+M_3,$$

где в общем виде

$$M_1=\begin{bmatrix} m_1 & 0 \\ m_4 & 0 \end{bmatrix}e^{-\tau_1 s}, \quad M_2=\begin{bmatrix} m_2 & 0 \\ m_5 & 0 \end{bmatrix}e^{-\tau_2 s}, \quad M_3=\begin{bmatrix} 0 & m_3 \\ 0 & m_6 \end{bmatrix}e^{-\tau_3 s}.$$

Тогда МПФ объекта приобретёт следующее описание:

$$W_{ОБ}(s)=P^{-1}M=P^{-1}(M_1+M_2+M_3)=P^{-1}M_1+P^{-1}M_2+P^{-1}M_3$$

Для использования алгоритма [2] преобразуем МПФ (1) в уравнения состояния, в результате чего зерносушилка будет представлена в дифференциальной форме:

МПФ $P^{-1}M_1$ $\quad \begin{matrix} sx_1=A_1x_1+B_1u \\ y_1=C_1x_1+D_1u \end{matrix};$

МПФ $P^{-1}M_2$ $\quad \begin{matrix} sx_2=A_2x_2+B_2u \\ y_2=C_2x_2+D_1u \end{matrix};$

МПФ $P^{-1}M_3$ $\quad \begin{matrix} sx_3=A_3x_3+B_3u \\ y_3=C_3x_3+D_3u \end{matrix}.$

где u – вектор входных переменных;

x –фазовый вектор объекта управления;

y – вектор выходных переменных.

Тогда система дифуравнений для суммы матриц будет следующей:

$$sx_1=A_1x_1+O_nx_2+O_nx_3+B_1u(t-\tau_1)$$
$$sx_2=O_nx_1+A_2x_2+O_nx_3+B_2u(t-\tau_2)$$
$$sx_3=O_nx_1+O_nx_2+A_3x_3+B_3u(t-\tau_3)$$

где O_n – нулевая матрица размерностью *nxn*.

А переменные состояния такие:

$$\dot{x}=\begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \\ x_3 \end{bmatrix} \qquad \begin{matrix} y=[y_1+y_2+y_3]=C_1x_1+C_2x_2+C_3x_3+D_1u(t-\tau_1)+D_2u(t-\tau_2)+D_3u(t-\tau_3) \\ y=Cx+D_1u(t-\tau_1)+D_2u(t-\tau_2)+D_3u(t-\tau_3) \\ C=[C_1,C_2,C_3] \end{matrix}$$

$$\dot{x}=Ax+B_1u(t-\tau_1)+B_2u(t-\tau_2)+B_3u(t-\tau_3), \text{ де } A=\begin{bmatrix} A_1 & O_n & O_n \\ O_n & A_2 & O_n \\ O_n & O_n & A_3 \end{bmatrix}$$

Пример. Исходя из обработки экспериментально снятых динамических характеристик [3], зерносушилка с кипящим слоем (рис. 1) описывается дробно-рациональной матрицей вида:

$$W_{ОБ}(s)=\begin{bmatrix} 0.5137\dfrac{s+0.09}{s+0.026}e^{-\tau_1 s} & 0 \\ 0.6441\dfrac{s-0.07}{s+0.01}e^{-\tau_2 s} & 0.1795\dfrac{s+0.07}{s+0.01}e^{-\tau_3 s} \end{bmatrix}.$$

Тогда для упрощения расчётов преобразуем МПФ в УС воспользовавшись встроенной функцией «ss» в ПП MatLab и получим, что для

$$P^{-1}M_1=\begin{bmatrix} p_{11}m_1+p_{12}m_4 & 0 \\ p_{21}m_1+p_{22}m_4 & 0 \end{bmatrix}e^{-\tau_1 s}$$

$$A_1=-0.026 \qquad B_1=\begin{bmatrix}0.1813 & 0\end{bmatrix}; \tag{5}$$

$$C_1=\begin{bmatrix}0.1813\\0\end{bmatrix} \qquad D_1=\begin{bmatrix}0.5137 & 0\\0 & 0\end{bmatrix}$$

$$P^{-1}M_2=\begin{bmatrix} p_{11}m_2+p_{12}m_5 & 0 \\ p_{21}m_2+p_{22}m_5 & 0 \end{bmatrix}e^{-\tau_2 s}$$

$$A_2=-0.01 \qquad B_2=\begin{bmatrix}0.227 & 0\end{bmatrix}\ ; \tag{6}$$

$$C_2=\begin{bmatrix}0\\0.227\end{bmatrix} \qquad D_2=\begin{bmatrix}0 & 0\\0.6441 & 0\end{bmatrix}$$

$$P^{-1}M_3=\begin{bmatrix} 0 & p_{11}m_3+p_{12}m_6 \\ 0 & p_{21}m_3+p_{22}m_6 \end{bmatrix}e^{-\tau_3 s}$$

$$A_3=-0.01 \qquad B_3=\begin{bmatrix}0 & 0.1038\end{bmatrix}\ . \tag{7}$$

$$C_3=\begin{bmatrix}0\\0.1038\end{bmatrix} \qquad D_3=\begin{bmatrix}0 & 0\\0 & 0.1795\end{bmatrix}$$

Теперь проверим правильность перехода, для этого воспользуемся формулой (8):

$$W(s)=C(sE_n-A)^{-1}\sum_{i=1}^{3}B_i e^{-\tau_i s}+\sum_{j=1}^{3}D_j e^{-\tau_j s} \tag{8 }$$

Для нашего случая исходными выражениями станут:

$$C=\left[C_1,C_2,C_3\right]=\begin{bmatrix}0.1813 & 0 & 0\\ 0 & -0.227 & 0.1038\end{bmatrix}$$

$$A=\begin{bmatrix}A_1 & 0 & 0\\ 0 & A_2 & 0\\ 0 & 0 & A_3\end{bmatrix}=\begin{bmatrix}-0.026 & 0 & 0\\ 0 & -0.01 & \\ 0 & 0 & -0.01\end{bmatrix},$$

$$\sum_{i=1}^{3}B_i e^{-\tau_i s}=e^{-\tau_1 s}\begin{bmatrix}0.1813 & 0\end{bmatrix}+e^{-\tau_2 s}\begin{bmatrix}0.227 & 0\end{bmatrix}+e^{-\tau_3 s}\begin{bmatrix}0 & 0.1038\end{bmatrix}=\begin{bmatrix}0.1813e^{-\tau_1 s}+0.227e^{-\tau_2 s} & 0.1038e^{-\tau_3 s}\end{bmatrix}$$

$$\sum_{j=1}^{3}D_i e^{-\tau_j s}=e^{-\tau_1 s}\begin{bmatrix}0.51317 & 0\\ 0 & 0\end{bmatrix}+e^{-\tau_2 s}\begin{bmatrix}0 & 0\\ 0.6441 & 0\end{bmatrix}+e^{-\tau_3 s}\begin{bmatrix}0 & 0\\ 0 & 0.1795\end{bmatrix}=\begin{bmatrix}0.51317e^{-\tau_1 s} & 0\\ 0.6441e^{-\tau_2 s} & 0.1795e^{-\tau_3 s}\end{bmatrix}$$

Подставив вышенайденные выражения в формулу (8), получим конечную матрицу, полностью идентичную МПФ объекта (1). Переход сделан верно. Тогда, согласно (2), структура упредителя Смита будет найдена поэтапно:

$$(\sum_{j=0}^{r} B_j - \sum_{j=0}^{r} B_j e^{-\Theta_j s}) = \begin{bmatrix} 0{,}1813 & 0 \\ 0{,}227 & 0 \\ 0 & 0{,}1038 \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} 0{,}1813e^{-\tau_1 s} & 0 \\ 0{,}227e^{-\tau_2 s} & 0 \\ 0 & 0{,}1038e^{-\tau_3 s} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0{,}1813(1-e^{-\tau_1 s}) & 0 \\ 0{,}227(1-e^{-\tau_2 s}) & 0 \\ 0 & 0{,}1038(1-e^{-\tau_3 s}) \end{bmatrix}$$

$$(\sum_{j=0}^{r} D_j - \sum_{j=0}^{r} D_j e^{-\Theta_j s}) = \begin{bmatrix} 0.5137(1-e^{-\tau_1 s}) & 0 \\ 0.6441(1-e^{-\tau_2 s}) & 0.1795(1-e^{-\tau_3 s}) \end{bmatrix},$$

$$\sum_{i=0}^{l} C_i e^{-\tau_i s}(sE_n - \sum_{i=0}^{l} A_i e^{-\tau_j s})^{-1} \cdot (\sum_{j=0}^{r} B_j - \sum_{j=0}^{r} B_j e^{-\Theta_j s}) = \begin{bmatrix} \dfrac{0{,}1813^2(1-e^{-\tau_1 s})}{s+0.026} & 0 \\ \dfrac{-0.227^2(1-e^{-\tau_2 s})}{s+0.01} & \dfrac{0{,}1038^2(1-e^{-\tau_3 s})}{s+0.01} \end{bmatrix}.$$

Конечна сумма соответствующих элементов, что и будет МПФ компенсатора, получит вид:

$$R(s) = \begin{bmatrix} 0.5137 \cdot \dfrac{s+0.09}{s+0.026}(1-e^{-\tau_1 s}) & 0 \\ 0.6441 \cdot \dfrac{s-0.07}{s+0.01}(1-e^{-\tau_2 s}) & 0.1795 \cdot \dfrac{s+0.07}{s+0.01}(1-e^{-\tau_3 s}) \end{bmatrix}. \qquad (9)$$

А если найденный компенсатор (9) присоединить к объекту (1) параллельно, то получим звено системы, уже не содержащий запаздываний в своей структуре:

$$W_{ОБ}(s) + R(s) = \begin{bmatrix} 0.5137\dfrac{s+0.09}{s+0.026}e^{-\tau_1 s} & 0 \\ 0.6441\dfrac{s-0.07}{s+0.01}e^{-\tau_2 s} & 0.1795\dfrac{s+0.07}{s+0.01}e^{-\tau_3 s} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0.5137\dfrac{s+0.09}{s+0.026}(1-e^{-\tau_1 s}) & 0 \\ 0.6441\dfrac{s-0.07}{s+0.01}(1-e^{-\tau_2 s}) & 0.1795\dfrac{s+0.07}{s+0.01}(1-e^{-\tau_3 s}) \end{bmatrix} =$$

$$= \begin{bmatrix} 0.5137 \cdot \dfrac{s+0.09}{s+0.026} & 0 \\ 0.6441 \cdot \dfrac{s-0.07}{s+0.01} & 0.1795 \cdot \dfrac{s+0.07}{s+0.01} \end{bmatrix}$$

Вывод. Как видно, при параллельном соединении рассчитанного компенсатора к объекту, запаздывания в системе компенсируются, что, в значительной степени, упрощает один с этапов динамического проектирования –факторизацию дробно-рациональных выражений.

Список литературы

1. Азарсков В.Н. Методология конструирования оптимальных систем стохастической стабилизации / Азарсков В.Н., Блохин Л.Н., Житецкий Л.С.– Киев: Книжное издательство Национального авиационного университета, 2006.– С. 438.
2. Решение задачи синтеза системы автоматического управления многосвязным обьектом с запаздываниями / А.З. Асанов, В.С. Каримов // Вестник УГАТУ, Управление, ВтиИ.– Уфа: УГАТУ, 2009.– т.13, №2(35).– С. 24-35.
3. Визначення структури і параметрів математичної моделі зерносушильної установки з киплячим шаром в реальних експлуатаційних умовах/ С.І. Осадчий, М.О. Калита, І.О. Скриннік // Збірник наукових праць КНТУ.– Кіровоград: КНТУ, 2008.– С. 345-349.

Sergey Osadchy, Marianna Fedotova, Ivan Skrynnik

Kirovohrad national technical university

Predictor smith as a means of compensating lags grain dryers cascade type with a boiling layer

In the result of structure-parametric identification of a dryer cascade type fluidized bed was obtained it, the transfer function matrix, elements of which are present lag, which greatly complicates one of the following stages dynamic design in the synthesis of the optimal regulator - factorization.

Therefore, this article shows how you can compensate unnecessary delay. For this, on the basis of the received model of a dryer cascade type of boiling layer was calculated structure and parameters of special compensatory lag device to the Smith predictor and proved that parallel to its accession to the object will cover the transport delay.
boiling layer, channels, lag, the Smith predictor, the transfer function matrix, the equation of state

Одержано 01.04.14

УДК 62-356

І.А. Швець, викл.
Первомайський політехнічний інститут національного університету кораблебудування імені адмірала Макарова, Первомайськ

Математичне моделювання процесів що відбуваються в робочій порожнині електромеханічного актуатору подачі палива

В статті описані процеси що відбуваються в робочій порожнині електромеханічного актуатору подачі палива (ЕМАПП), який є основним складовим елементом імпульсної фазованої системи подачі газового палива. Представлено математичні залежності, що описують характер протікання зазначених процесів, а також наведено результати отримані на основі їх обрахунку.
баланс маси, стиснення палива, температурне розширення, актуатор, газовий потік, швидкість потоку, перепад тиску

И.А. Швец, препод.
Первомайский политехнический институт национального университет имени адмирала Макарова, Первомайск
Математическое моделирование процессов происходящих в рабочей полости электромеханического актуатора подачи топлива.

В статье описаны процессы, происходящие в рабочей полости электромеханического актуатора подачи топлива (ЕМАПП), который является основным составляющим элементом импульсной фазированной системы подачи газового топлива. Представлены математические зависимости, описывающие характер протекания указанных процессов, а также приведены результаты, полученные на основе их расчета.
баланс массы, сжатие топлива, температурное расширение, актуатор, газовый поток, скорость потока, перепад давления

Вступ. Переробка сировини (лузга, тирса, солома та т.і.) для отримання альтернативних видів палива таких як біогаз, чадний газ та інших в сільській місцевості, дозволить значно розширити можливості застосування мобільних електростанцій малої та середньої циліндрової потужності для забезпечення власних потреб фермерського господарства. Переведення двигунів внутрішнього згоряння для машин сільськогосподарського призначення, головним чином тракторних та комбайнових з рідкого палива на газове, дозволить значно знизити матеріальні витрати на паливо-мастильні матеріали під час посівних та збиральних робіт.