

*А.И. РОГАЧЁВ*, д-р. техн. наук, профессор НТУ «ХПИ»  
*Н.А. ДЕНИСЕНКО*, ассистент НТУ «ХПИ»

## МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ СУШКИ КАПИЛЛЯРНО-ПОРИСТЫХ МАТЕРИАЛОВ В ПАКЕТЕ MATLAB/SIMULINK

В цій статті наводиться методика управління динамічними системами з застосуванням прогнозуючих моделей, та зображене практичне застосування для рішення конкретних прикладів систем, які задані диференціальними рівняннями.

In given article the technique of management by dynamic objects with use of predicting models is resulted, and its practical application in the decision of concrete examples of the systems given by the differential equations is shown.

**Введение.** В начале XXI века время произошёл стремительный прогресс в строительной отрасли, что требует увеличения количества и повышения качества материалов и деталей, которые после изготовления подвергаются предварительной сушке. К таким относятся капиллярно-пористые материалы – древесина, кирпич, бетон и многие другие. Одним из основных этапов сушки таких материалов является этап пропарки, заключающийся в доведении температуры и влажности высушиваемых изделий до заданных значений при сохранении постоянной психрометрической разности температур «сухого» и «влажного» термометров. При этом необходимо выполнить требования к качеству рассматриваемых материалов при предельно возможном сокращении времени пропарки и минимизации расхода теплоносителя.

**Постановка задачи исследования.** Требуется провести моделирование объекта управления – сушильной камеры периодического действия, в которой высушивают пиломатериалы в среде влажного воздуха с подведением тепла и удалением влаги конвективным способом. Регулируемой величиной является  $\theta$  – температура внутри материала.

**Решение задачи моделирования.** Исследовав переходные характеристики камеры [1], [2] можно составить структурную схему преобразованной системы (рис. 1).

При этом за основное воздействие принимается управление  $U_1$ , которое предназначено для организации прогрева – изменения температуры воздуха в камере [3].

При ограничении положений задвижек величины  $U_1$  и  $U_2$  также ограничены. Эти ограничения можно записать в виде:

$$0 \leq U_1 \leq U_{1\max}, \quad 0 \leq U_2 \leq U_{2\max}. \quad (1)$$

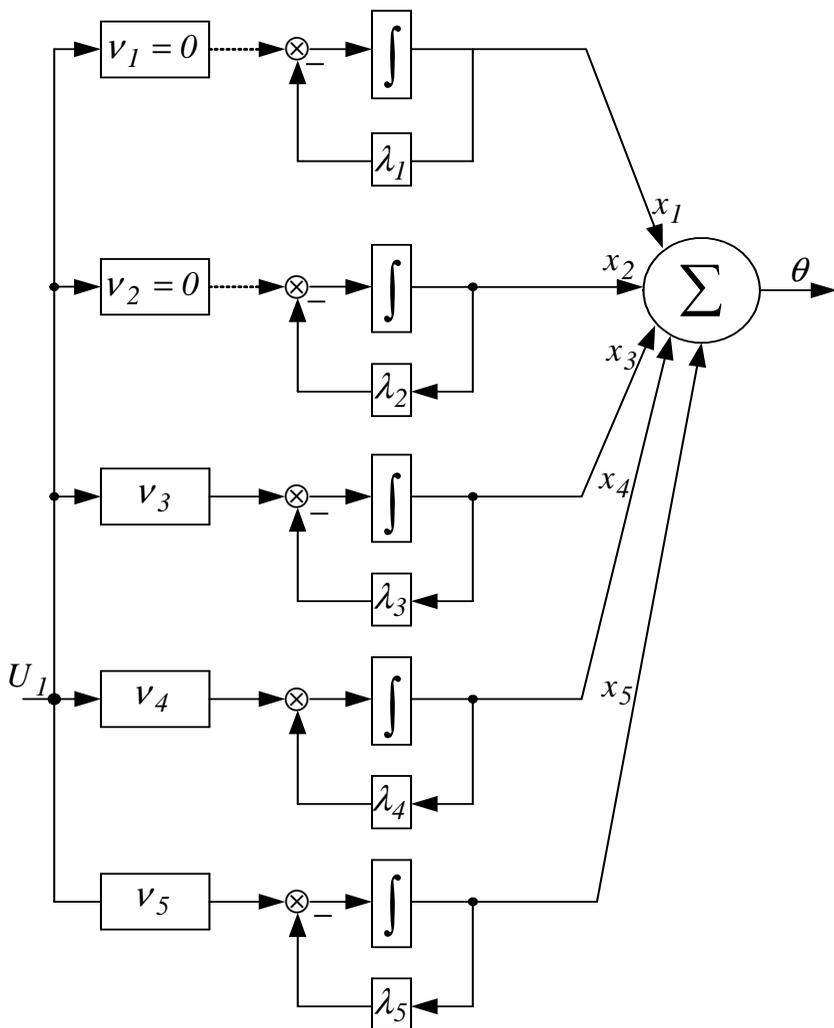


Рис. 1. Преобразованная схема объекта управления

Кроме того, ограничения должны быть наложены на скорости изменения температуры  $\theta_c$  и влажности  $W$  материала, так как слишком высокие градиенты этих параметров могут привести к повреждению материала. Эти ограничения представим в виде:

$$\left| \frac{d\theta}{dt} \right| \leq B_1, \quad \left| \frac{d\theta}{dt} \right| \leq B_2, \quad (2)$$

где  $B_1$  и  $B_2$  – заданные константы, величина которых зависит от вида материала, типа камеры и некоторых дополнительных технологических требований к процессу сушки [4].

Объект управления описывается системой линейных уравнений пятого порядка, в каждое из которых входит лишь одна фазовая переменная:

$$\left. \begin{aligned} \dot{x}_1(t) &= \lambda_1 x_1(t), \\ \dot{x}_2(t) &= \lambda_2 x_2(t), \\ \dot{x}_3(t) &= \lambda_3 x_3(t) + v_3 U_1(t), \\ \dot{x}_4(t) &= \lambda_4 x_4(t) + v_4 U_1(t), \\ \dot{x}_5(t) &= \lambda_5 x_5(t) + v_5 U_1(t). \end{aligned} \right\} \quad (3)$$

где  $\lambda_1 = -\frac{1}{T_1}$ ,  $\lambda_2 = -\frac{1}{T_2}$ ,  $\lambda_3 = -\frac{1}{T_3}$ ,  $\lambda_4 = -\frac{1}{T_4}$ ,  $\lambda_5 = -\frac{1}{T_{21}}$ , а также

$$T_{21} = \frac{k_5 T_2 - k_2 k_{mc} T_5}{k_2 - k_{mc} k_5}.$$

Коэффициенты  $v_i$  вычисляются из уравнений:

$$\left. \begin{aligned} v_1 &= v_2 = 0, \\ v_3 &= \frac{b_2}{(\lambda_3 - \lambda_4)(\lambda_3 - \lambda_5)}, \\ v_4 &= \frac{b_2}{(\lambda_4 - \lambda_3)(\lambda_4 - \lambda_5)}, \\ v_5 &= \frac{b_2}{(\lambda_5 - \lambda_3)(\lambda_5 - \lambda_4)}. \end{aligned} \right\} \quad (4)$$

$$b_2 = \frac{k_c}{T_1 \cdot T_3 \cdot T_{21}}, \quad k_c = \frac{k_1 k_2 k_3 k_5 (1 + k_{mc} k_{cm})}{k_5 - k_2 k_{mc}}. \quad (5)$$

Пусть заданы следующие коэффициенты передачи соответствующих звеньев:

$$k_1 = 130, \quad k_2 = 0.61, \quad k_3 = 1, \quad k_4 = 40, \quad k_5 = 2, \quad k_{mc} = 0.8, \quad k_{cm} = 0.75.$$

И постоянные времени (в часах):

$$T_1 = 1.12, \quad T_2 = 1.17, \quad T_3 = 2.33, \quad T_4 = 0.33, \quad T_5 = 0.83, \quad T_6 = 1.84, \quad T_{21} = 1.271.$$

Тогда находим коэффициенты  $\lambda_i, v_i$  и система дифференциальных уравнений запишется так:

$$\left. \begin{aligned} \dot{x}_1(t) &= -0.893 \cdot x_1(t), \\ \dot{x}_2(t) &= -0.855 \cdot x_2(t), \\ \dot{x}_3(t) &= -0.429 \cdot x_3(t) + 54.34 \cdot U_1(t), \\ \dot{x}_4(t) &= -3.03 \cdot x_4(t) + 8.67 \cdot U_1(t), \\ \dot{x}_5(t) &= -0.787 \cdot x_5(t) - 63.01 \cdot U_1(t). \end{aligned} \right\} \quad (6)$$

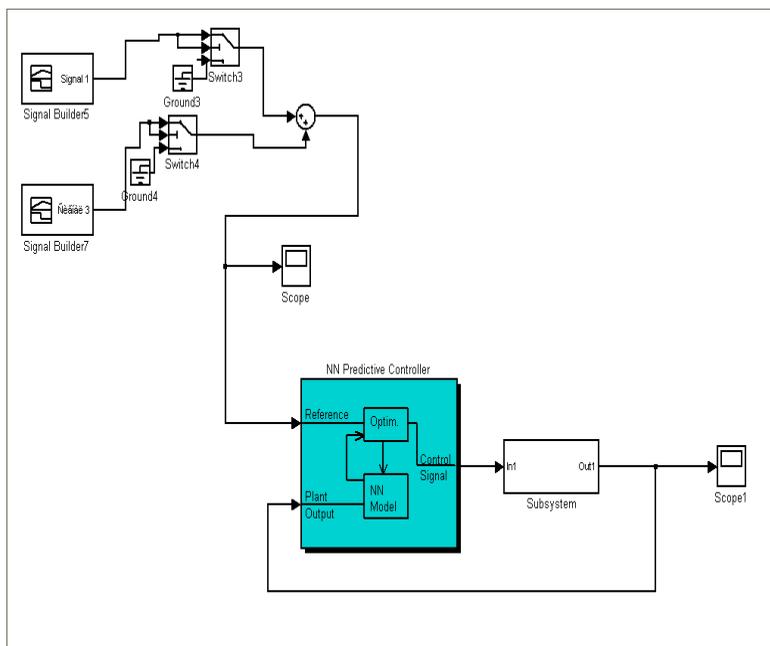
Для объекта управления в виде сушильной камеры будем использовать блок NN Predictive Controller Simulink системы MATLAB, соответствующий структурной схеме с прогнозированием рис.2.



Рис.2. Структурная схема с прогнозированием

Тогда общая схема для объекта управления с использованием блока NN Predictive Controller в Simulink будет выглядеть согласно рис. 3 [5].

Вид окна Plant Identification, т.е. «внутренние данные» блока NN Predictive Controller, показан на рис.4. Это окно универсально и может быть использовано для построения моделей для любого динамического объекта, который описан в Simulink. В рассмотренном случае такой моделью является сушильная камера.



**Рис.3. Вид структурной схемы с прогнозированием в Simulink**

Процедура идентификации требует задания следующих параметров [5]:  
**Size of Hidden Layer.** - Размер скрытого слоя - определяется количеством используемых нейронов. Зададим для использования 12 нейронов.

**Sampling Interval.** - Такт дискретности в секундах, определяет интервал между двумя последовательными моментами съёма данных. Задаётся 0.001 с.

**No. Delayed Plant Inputs.** - Количество элементов запаздывания на входе модели - равняется 2.

**No. Delayed Plant Outputs.** - Количество элементов запаздывания на выходе модели - равняется 5.

**Normalize Training Data.** - Окно контроля нормирования данных.

**Training Samples.** - Длина выборки (количество точек съёма информации). Задаётся равным 10 000.

**Maximum Plan Input.** - Максимальное значение входного сигнала - равняется 1.

**Minimum Plan Input.** - Минимальное значение входного сигнала - равняется 0.

**Maximum Interval Value (sec).** - Максимальный интервал идентификации в секундах, задаётся 0.1с.

**Minimum Interval Value (sec).** - Минимальный интервал идентификации в секундах, задаётся 0.01с.

### Plant Identification

Network Architecture

Size of Hidden Layer <input style="width: 50px;" type="text" value="12"/>	No. Delayed Plant Inputs <input style="width: 50px;" type="text" value="2"/>
Sampling Interval (sec) <input style="width: 50px;" type="text" value="0.001"/>	No. Delayed Plant Outputs <input style="width: 50px;" type="text" value="5"/>

Normalize Training Data

Training Data

Training Samples <input style="width: 50px;" type="text" value="10000"/>	<input checked="" type="checkbox"/> Limit Output Data
Maximum Plant Input <input style="width: 50px;" type="text" value="1"/>	Maximum Plant Output <input style="width: 50px;" type="text" value="120"/>
Minimum Plant Input <input style="width: 50px;" type="text" value="0"/>	Minimum Plant Output <input style="width: 50px;" type="text" value="0"/>
Maximum Interval Value (sec) <input style="width: 50px;" type="text" value="0.1"/>	Simulink Plant Model: <input type="button" value="Browse"/>
Minimum Interval Value (sec) <input style="width: 50px;" type="text" value="0.01"/>	<input style="width: 100%;" type="text" value="newsubsystem"/>

Training Parameters

Training Epochs <input style="width: 50px;" type="text" value="300"/>	Training Function <input style="width: 50px;" type="text" value="trainlm"/>
---	---

Use Current Weights  
  Use Validation Data  
  Use Testing Data

Generate or import data before training the neural network plant.

**Рис. 4. Окно Plant Identification идентификации управляемого объекта.**

Limit Output Data. – Окно контроля, позволяющее ограничить значения выходных данных.

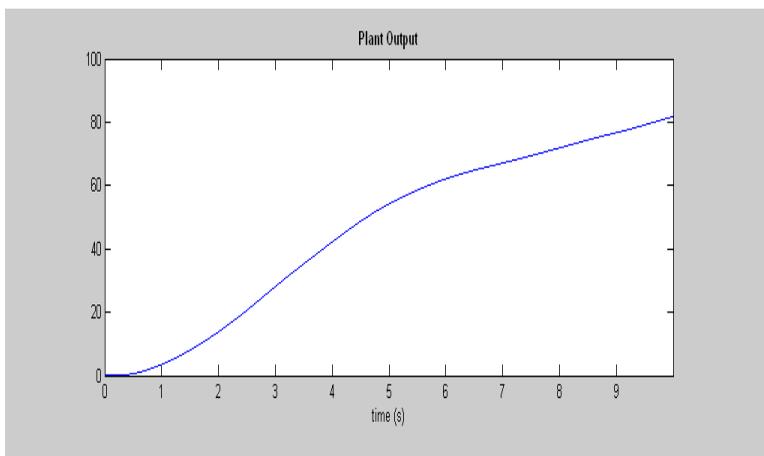
Maximum Plan Output. – Максимальное значение выходного сигнала – равняется 100.

Minimum Plan Output. – Минимальное значение выходного сигнала – равняется 0.

Simulink Plan Model. – Задание модели с указанием входных и выходных портов.

С помощью кнопки Browse выбирается модель объекта управления, соответствующая рис. 1.

Полученные результаты моделирования температуры от 0°C до 100°C внутри материала изображены на рис. 5:



**Рис. 5.** Графики моделирования температуры внутри материала

**Выводы.** Решение задачи минимизации расхода теплоносителя для процесса сушки капиллярно-пористых материалов позволило найти закон, минимизирующий расход теплоносителя на этапе прогрева высушиваемого материала при заданных ограничениях на управление и скорость прогрева. В дальнейшем предполагается провести моделирование аналогичной системы управления по оптимизации затрат теплоносителя.

**Список литературы:** 1. Воронов В.Г., Гонн А.Ю. «Синтез оптимального управления режимами теплофизической обработки» //Локальные автоматизированные системы автоматики и вычислительной техники – Киев, «Наукова думка» -1976. - с.10-36. 2. Рогачёв А.И., Денисенко Н.А. Энергосберегающее управление процессом пропарки при сушке капиллярно-пористых материалов. // Вестник НТУ «ХПИ» 2007. - №36. - с. 9-15. 3. Рогачёв А.И. Минимизация расхода теплоносителя в объекте с вырожденной передаточной функцией //Интегрированные технологии и энергосбережение. – Харьков: НТУ “ХПИ”, 2003. -№1. – с.11-14. 4. Атанс М.А., Фалб П.Л. Оптимальное управление. М., «Машиностроение», 1968. 5. Медведев В.С., Потёмкин В.Г. Нейронные сети. MATLAB6 М.: Диалог-Мифи, 2002. – 496с.

*Поступила в редакцию 03.06.2010*