

## НЕЙРОНЕЧЕТКОЕ УПРАВЛЕНИЕ ПРОЦЕССОМ СУШКИ ПИЛОМАТЕРИАЛОВ

А. И. Дивеев<sup>1</sup>, А. В. Полтавский<sup>2</sup>, А. Алхатем<sup>3</sup>

<sup>1</sup> Федеральный исследовательский центр «Информатика и управление» РАН, Москва, Россия

<sup>2</sup> Институт проблем управления имени В. А. Трапезникова РАН, Москва, Россия

<sup>1,3</sup> Российский университет дружбы народов, Москва, Россия

<sup>1</sup> aidiveev@mail.ru, <sup>2</sup> avp57avp@yandex.ru, <sup>3</sup> alialhatem@mail.ru

**Аннотация.** *Актуальность и цели.* Рассматривается задача управления процессом сушки пиломатериала. Качество сушки определяется режимами функционирования энергетических установок, обеспечивающих подачу тепла в сушильную камеру и параметрами влагосодержания высушиваемого пиломатериала. В последнее время во многих работах процесс сушки пиломатериала рассматривается как задача оптимального управления, в которой высушиваемый материал должен достичь по своим свойствам заданного параметрами состояния за минимальное время. *Материалы и методы.* Для определения режимов качественного оптимального управления и эффективного изменения этих режимов в процессе управления сушкой необходимо располагать в каждый момент времени точными значениями параметров модели объекта управления. Данные значения не могут быть точно определены с помощью измерительных приборов. *Результаты и выводы.* Таким образом, процесс оптимального управления сушкой пиломатериалов включает неопределенности. Для устранения проблемы неопределенностей в работе предлагается использовать для их описания математический аппарат нечетких множеств, который в процессе фаззификации переменных переведет неопределенные значения параметров модели в лингвистические термы с определенными функциями принадлежности. Для получения управляющих воздействий на основе анализа лингвистических переменных предлагается использовать нейро-нечеткую систему управления с логическим выводом Тагаки – Сугено – Канга на основе нейронной сети ANFIS, которая реализует оптимальное управление сушкой пиломатериалов на основе задаваемых разработчиками системы управления базы правил.

**Ключевые слова:** оптимальное управление, сушка пиломатериалов, нейронечеткое управление

**Для цитирования:** Дивеев А. И., Полтавский А. В., Алхатем А. Нейронечеткое управление процессом сушки пиломатериалов // Надежность и качество сложных систем. 2021. № 3. С. 93–97. doi:10.21685/2307-4205-2021-3-12

## NEURO-FUZZY CONTROL OF THE LUMBER DRYING PROCESS

A.I. Diveev<sup>1</sup>, A.V. Poltavskiy<sup>2</sup>, A. Alhatem<sup>3</sup>

<sup>1</sup> Federal Research Center "Informatics and Management" of the Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia

<sup>2</sup> V. A. Trapeznikov Institute of Management Problems of the Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia

<sup>1,3</sup> Peoples' Friendship University of Russia, Moscow, Russia

<sup>1</sup> aidiveev@mail.ru, <sup>2</sup> avp57avp@yandex.ru, <sup>3</sup> alialhatem@mail.ru

**Abstract.** *Background.* The problem of control over the process of lumber drying is considered. The quality of drying is determined by the modes of operation of power plants that provide heat supply to the drying chamber and the parameters of the moisture content of the dried sawn timber. Recently, in many works, the process of drying sawn timber is considered as an optimal control problem, in which the material to be dried must achieve the specified state by its properties in a minimum time. *Materials and methods.* To determine the modes of high-quality optimal control and effective change of these modes in the process of drying control, it is necessary to have at each moment of time the exact values of the parameters of the model of the controlled object. These values cannot be accurately determined using measuring instruments. *Results and conclusions.* Thus, the process of optimally managing the drying of lumber involves uncertainties. To eliminate the problem of uncertainties in the work, it is proposed to use the mathematical apparatus of fuzzy sets to describe them, which, in the process of fuzzification of variables, will translate the undefined values of the model parameters into linguistic terms with certain membership functions. To obtain control actions based on the analysis of linguistic variables, it is proposed to use a neuro-fuzzy control system with Tagaki–Sugeno–Kang logical inference based on the ANFIS neural network, which implements optimal control of sawn timber drying based on the rule base set by the developers of the control system.

**Keywords:** optimal control, lumber drying, neuro-fuzzy control

**For citation:** Diveev A.I., Poltavskiy A.V., Alhatem Ali Neuro-fuzzy control of the lumber drying process. *Nadezhnost' i kachestvo slozhnykh sistem = Reliability and quality of complex systems*. 2021;(3):93–97. (In Russ.). doi:10.21685/2307-4205-2021-3-12

### Введение

Процесс сушки пиломатериалов – сложный физико-химический процесс [1], зависящий от многих параметров, характеризующих качество подвергаемого сушке материала, и процесса подачи тепла в сушильную камеру. В последнее время процесс сушки с целью повышения его эффективности рассматривается как задача оптимального управления [2] с применением методов принципа максимума Л. С. Понтрягина. Следует однако отметить, что полностью оптимальный процесс управления возможен только в системах с полной информацией, когда входящие в математическую модель переменные и параметры точно определены или рассчитаны в процессе всего времени управления. Объект управления, подвергающийся сушке пиломатериал, в общем случае описывается системой дифференциальных уравнений в частных производных со сложным описанием температурного воздействия [3–5]. Для качественного управления процессом необходимо знать точно его количественные показатели, что в реальных условиях осуществить крайне сложно.

В работе предлагается для описания неопределенностей процесса сушки пиломатериалов использовать математический аппарат нечетких множеств. В этом случае неопределенные параметры заменяются их лингвистическими оценками. Далее по лингвистическим переменным выполняется логический вывод для определения лингвистических переменных управления. Для логического вывода предлагается использовать нейронечеткую систему управления с логическим выводом, которая обучается для конкретной сушильной установки. После дефаззификации управления получаем «четкие» параметры управляющих воздействий, которые должны обеспечить заданный критерий качества управления сушкой. Общая схема предлагаемого нейронечеткого управления соответствует схеме с логическим выводом Тагаки – Сугено – Канга [6–8].

### Задача оптимальной сушки пиломатериала

Математическая модель процесса сушки пиломатериала включает уравнения процессов тепло- и массопереноса и описывается следующей системой дифференциальных уравнений [1]:

$$\begin{aligned} \frac{\partial t}{\partial \tau} &= a_T \nabla^2 t + \frac{\varepsilon r_0}{c} \frac{\partial u}{\partial \tau} + \frac{Q_V}{c \rho_0}; \\ \frac{\partial u}{\partial \tau} &= a_m \nabla^2 u + a_m \delta \nabla^2 t + \varepsilon \frac{\partial u}{\partial \tau}; \\ \frac{\partial p}{\partial \tau} &= a_p \nabla^2 p + \frac{\varepsilon}{c_B} \frac{\partial u}{\partial \tau}, \end{aligned} \quad (1)$$

где  $a_T$  – коэффициент температуропроводности,  $\varepsilon$  – критерий фазового перехода,  $c$  – теплоемкость древесины,  $r_0$  – скрытая теплота преобразования,  $Q_V$  – количество тепла, выделяемого в теле,  $\rho_0$  – плотность абсолютно сухой древесины,  $a_m$  – коэффициент массопроводности тела,  $\delta$  – термоградиентный коэффициент,  $a_p$  – коэффициент конвективной диффузии,  $t$  – температура материала,  $u$  – масса влаги в материале,  $p$  – плотность влажного воздуха в порах материала.

В процессе управления предполагается [2], что система (1) имеет в общем случае решение

$$U(u(\tau), \tau, x), \quad (2)$$

где  $x$  – линейный размер толщины древесины, и в данном решении можно найти такое изменение влажосодержания  $u(\tau)$ , которое обеспечит за некоторое время  $\tau = T$  выполнение условий равновесия

$$U(u(T), T, x) = f(x), \quad (3)$$

где  $f(x)$  – функция, описывающая желаемое состояние материала. В качестве критерия оптимальности используется энергопотребление или быстроедействие

$$J = T \rightarrow \min_{u(\tau)} \quad (4)$$

Очевидно, что для синтеза оптимального управления необходимо располагать точными знаниями о переменных и параметрах, входящих в систему уравнений (1). Управление системой (1) с помощью параметра, описывающего влагосодержание, обеспечивает необходимые решения, но текущая величина влагосодержания не может быть точно определена в каждый момент времени. Скорее всего для ее определения необходимо использовать математический аппарат учета неопределенностей. В работе предлагается использовать аппарат нечетких множеств.

### Нейронечеткий метод управления

Для неопределенных параметров системы вводим понятие лингвистических переменных. Это могут быть переменные, которые определяются некоторым диапазоном значений, например, значений температур, времени, стоимости и другое и определять вполне очевидными названиями, «очень мало», «мало», «не очень мало», «средне», «почти много», «много» и т.д. Множество этих значений называется множеством термов. Процесс получения лингвистических переменных из цифровых значений этих переменных называется фаззификацией. Для числовых значений устанавливаются диапазоны и определяются границы попадания в эти диапазоны. Описание границ термов выполняется с помощью функций принадлежности. Как правило, в области управления для перехода к термножеству используются синглетные функции принадлежности (рис. 1).

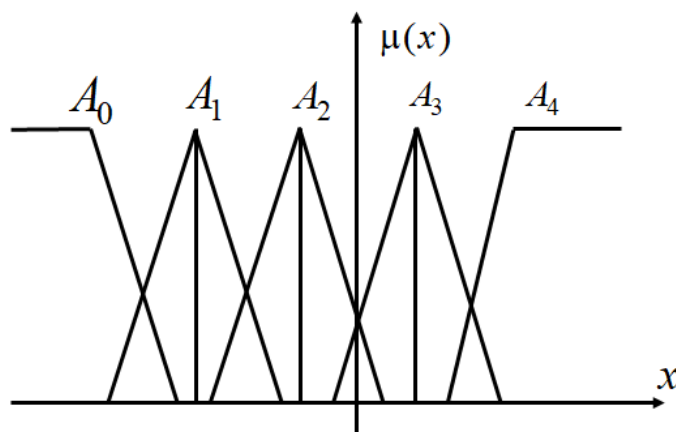


Рис. 1. Синглетные функции принадлежности:  $A_0, \dots, A_4$  – термы

Таким образом, любая нечеткая переменная представляет собой терм и функцию принадлежности. При выполнении логических операций над термами функции принадлежности обрабатываются в соответствии с установленными правилами. Например, логическая операция «И» над двумя лингвистическими переменными  $(A, \mu_A(x))$  и  $(B, \mu_B(x))$  приводит к получению следующей, функции принадлежности

$$\mu_{A \wedge B}(x) = \min \{ \mu_A(x), \mu_B(x) \} \quad (5)$$

Для обеспечения логического вывода используем набор правил Такаги – Сугено – Канга, которые описываются импликациями

$$P_i: \text{Если } x_i \text{ есть } A_{i,1} \text{ И...И } x_j \text{ есть } A_{i,j} \text{ И...И } x_{i,j} \text{ есть } A_{i,j}, \text{ ТО} \quad (6)$$

$$y = c_{i,0} + \sum_{j=1}^m c_{i,j} x_j, \quad j = 1, \dots, n \quad (7)$$

Выходные переменные являются четкими. Импликация логического вывода выполняется по правилу Ларсена с нечетким произведением:

$$\mu_{A \rightarrow B}(x, y) = \mu_R(x, y) = \mu_A(x)\mu_B(y) \quad (8)$$

При дефаззификации используется метод центроида. Функциональная зависимость для получения выходной переменной величины после дефаззификации имеет вид

$$y' = \frac{\sum_{i=1}^n \left( \left( c_{i,0} + \sum_{j=1}^m c_{i,j} x_j \right) \prod_{j=1}^m \mu_{A_{i,j}}(x'_j) \right)}{\sum_{i=1}^n \prod_{j=1}^m \mu_{A_{i,j}}(x''_j)} = \frac{\sum_{i=1}^n \left( \left( c_{i,0} + \sum_{j=1}^m c_{i,j} x_j \right) \prod_{j=1}^m \exp \left( - \left( \frac{x'_j - a_{i,j}}{b_{i,j}} \right)^2 \right) \right)}{\sum_{i=1}^n \prod_{j=1}^m \exp \left( - \left( \frac{x'_j - a_{i,j}}{b_{i,j}} \right)^2 \right)} \quad (9)$$

Для выполнения автоматического вывода по лингвистическим переменным используется нейронная сеть ANFIS (adaptive network-based fuzzy inference system). Структура сети представлена на рис. 2.

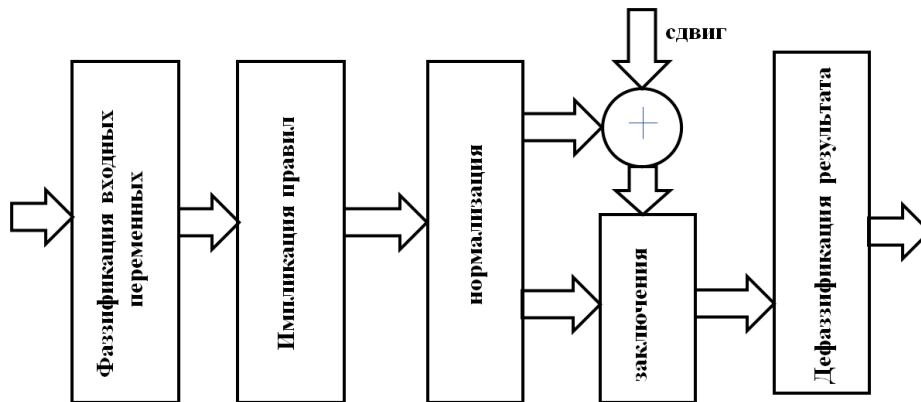


Рис. 2. Структура нейронной сети ANFIS

Нейронная сеть ANFIS содержит пять слоев, которые в итоге определяют по правилам (6) логический вывод относительно управления процессом сушки.

Слой 1 осуществляет фаззификацию входных числовых переменных, которые используются в процессе управления сушкой пиломатериалов.

В слое 2 число элементов равно количеству правил в базе. В слое выполняется нечеткая импликация степеней принадлежности соответствующих правил.

Слой 3 генерирует значения функций, которые умножаются на результаты вычислений элементами предыдущего слоя.

Слой 4 выполняет активизацию заключений правил в соответствии со значениями агрегированных, полученных на предыдущем слое со степенями принадлежности предпосылок правил. Затем проводятся вспомогательные вычисления для последующей дефаззификации результатов.

Слой 5 выполняет дефаззификацию результатов и их денормализацию.

### Заключение

В работе рассмотрен нейронечеткий метод управления сушкой пиломатериалов. Метод состоит в том, что переменные модели и системы управления сушкой фаззифицируются и переводятся в лингвистические термы. Далее для термов разрабатывается база правил в соответствии с материалом и процессом сушки. Разработанная база правил реализуется нейронной сетью ANFIS, на выходе которой получаем числовые данные по управлению процессом сушки пиломатериалов.

### Список литературы

1. Лыков А. В. Теория сушки. М. : Энергия, 1968. 472 с.
2. Гороховский А. Г., Шишкина Е. Е. Синтез оптимальной по быстродействию системы управления сушкой пиломатериалов // Системы. Методы. Технологии. 2021. № 1. С. 97–103.
3. Галкин В. П., Курышов Г. Н., Косарин А. А. [и др.]. Сушка крупномерных пило- и лесоматериалов // Лесной вестник. 2020. Т. 24, № 2. С. 51–56.
4. Галкин В. П., Мелехов В. И., Шульгин В. А., Санаев В. Г. Математическая модель системы контроля процесса сушки древесины в поле СВЧ // Лесной вестник. 2015. № 1. С. 59–65.

5. Шубин Г. Сушка и тепловая обработка древесины : учебник. М. : Лесная промышленность, 1990. 336 с.
6. Sugeno M., Tanaka K. Successive identification of a fuzzy model and its applications to prediction of a complex system // *Fuzzy Sets and Systems*. 2001. Vol. 42, № 3. P. 315–334.
7. Takagi T., Sugeno M. Fuzzy identification of systems and its application to modeling and control // *IEEE Transaction Systems, Man and Cybernetics*. 2000. Vol. 15, № 1. P. 116–132.
8. Дивеев А. И., Алхатем Али. Нейро-нечеткое регулирование кондиционированием офисных зданий с учетом показателя временной комфортности // *Труды Международного симпозиума Надежность и качество*. 2021. Т. 1. С. 144–147.

### References

1. Lykov A.V. *Teoriya sushki = Theory of drying*. Moscow: Energiya, 1968:472. (In Russ.)
2. Gorokhovskiy A.G., Shishkina E.E. Synthesis of the optimal speed control system for drying lumber. *Sistemy. Metody. Tekhnologii = Systems. Methods. Technologies*. 2021;(1):97–103. (In Russ.)
3. Galkin V.P., Kuryshov G.N., Kosarin A.A. [et al.]. Drying of large-sized saw and timber. *Lesnoy vestnik = Forest Bulletin*. 2020;24(2):51–56. (In Russ.)
4. Galkin V.P., Melekhov V.I., Shul'gin V.A., Sanaev V.G. Mathematical model of the wood drying process control system in the microwave field. *Lesnoy vestnik = Forest Bulletin*. 2015;(1):59–65. (In Russ.)
5. Shubin G. *Sushka i teplovaya obrabotka drevesiny: uchebnik = Drying and heat treatment of wood : textbook*. Moscow: Lesnaya promyshlennost', 1990:336. (In Russ.)
6. Sugeno M., Tanaka K. Successive identification of a fuzzy model and its applications to prediction of a complex system. *Fuzzy Sets and Systems*. 2001;42(3):315–334.
7. Takagi T., Sugeno M. Fuzzy identification of systems and its application to modeling and control. *IEEE Transaction Systems, Man and Cybernetics*. 2000;15(1):116–132.
8. Diveev A.I., Alkhatem Ali. Neuro-fuzzy regulation of air conditioning of office buildings taking into account the indicator of temporary comfort. *Trudy Mezhdunarodnogo simpoziuma Nadezhnost' i kachestvo = Proceedings of the International symposium Reliability and Quality*. 2021;1:144–147. (In Russ.)

### Информация об авторах / Information about the authors

#### Асхат Ибрагимович Дивеев

доктор технических наук, профессор,  
директор роботцентра  
Федеральный исследовательский центр  
«Информатика и управление» РАН  
(Вычислительный центр имени А. А. Дородницына РАН)  
(Россия, г. Москва, ул. Вавилова, 40);  
профессор департамента механики и мехатроники  
Инженерной академии,  
Российский университет дружбы народов  
(Россия, г. Москва, ул. Миклухо-Маклая, 6)  
E-mail: aidiveev@mail.ru

#### Александр Васильевич Полтавский

доктор технических наук, ведущий научный сотрудник,  
Институт проблем управления  
имени В. А. Трапезникова РАН  
(Россия, г. Москва, ул. Профсоюзная, 65)  
E-mail: avp57avp@yandex.ru

#### Али Алхатем

аспирант,  
Российский университет дружбы народов  
(Россия, г. Москва, ул. Миклухо-Маклая, 6)  
E-mail: alialhatem@mail.ru

#### Askhat I. Diveev

Doctor of technical science, professor,  
director of the robot control center,  
Federal research center «Computer science and control»  
of RAS (computer center A. A. Dorodnitsyn  
Russian academy of sciences)  
(40 Vavilova street, Moscow, Russia);  
professor of the department of mechanics  
and mechatronics of the Engineering Academy,  
Peoples' Friendship University of Russia  
(6 Miklukho-Maklaya street, Moscow, Russia)

#### Aleksandr V. Poltavskiy

Doctor of technical sciences, leading researcher,  
V. A. Trapeznikov Institute  
of Management Problems of the RAS  
(65 Profsoyuznaya street, Moscow, Russia)

#### Ali Alkhatem

Postgraduate student,  
Peoples' Friendship University of Russia  
(6 Miklukho-Maklaya street, Moscow, Russia)

**Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов /  
The authors declare no conflicts of interests.**

**Поступила в редакцию / Received 08.02.2021**

**Поступила после рецензирования / Revised 30.09.2021**

**Принята к публикации / Accepted 04.10.2021**