

Жбанова Н.Ю.,  
Липецкий государственный технический университет

**ПОСТРОЕНИЕ И НАСТРОЙКА ПЕРЕКЛЮЧАЕМОЙ  
НЕЙРОНЕЧЁТКОЙ СИСТЕМЫ ДЛЯ МОДЕЛИРОВАНИЯ  
ПРОЦЕССА ВАРКИ САХАРА**

научный руководитель профессор, д. ф.-м. наук Блюмин С. Л.

ТМШ-5

Плакат 1.

## Нечёткие модели и нейронечёткие системы

Нечёткие и нейронечёткие модели нашли широкое применение в задачах моделирования технологических процессов. Существуют два основных типа нечётких моделей: модели Мамдани и модели Такаги-Сугено (TS).

### *Нечёткие модели Такаги-Сугено*

Нечёткие модели Такаги-Сугено типа MISO (multiple input, single output) представляют собой совокупность правил (1):

$$R^l : \text{If } u_1 \text{ is } A_1^l, \dots \text{ and } u_m \text{ is } A_m^l \text{ then } y = \sum_{i=1}^m a_i^l u_i + b^l. \quad (1)$$

Здесь  $l$  – номер правила,  $A_i^l$  – входные нечеткие множества,  $a_i^l$ ,  $b^l$  – параметры функций заключений правил,  $i=1, \dots, m$  – количество входов. Выход такой модели определяется по формуле:

$$y = \frac{\sum_{l=1}^N \alpha^l \left( \sum_{i=1}^m a_i^l u_i + b^l \right)}{\sum_{l=1}^N \alpha^l}. \quad (2)$$

Здесь  $\alpha^l$  – уровень истинности условия правила  $R^l$ ,  $\alpha^l = \prod_{i=1}^m \mu_i^l$ , где  $\mu_i^l$  – степень принадлежности входа  $u_i$  нечеткому множеству  $A_i^l$ . Для наиболее распространённых нечётких множеств гауссовского типа степень принадлежности вычисляется по формуле для гауссовского «колокола».

## Нечёткие модели и нейронечёткие системы

Гибридные нейронечёткие структуры были призваны объединить достоинства нейронных сетей и нечётких моделей. Вид комбинирования нечётких моделей и нейронных сетей, нашедший наиболее широкую область применения – нейронечёткая система (ННС).

### Нейронечёткие системы типа ANFIS

Нейронечёткая система типа ANFIS – это нечёткая TS-модель, представленная в виде нейронной сети (рис. 1). Такие системы функционально эквивалентны TS-моделям, но их параметры задаются не вручную, а настраиваются на обучающем множестве.

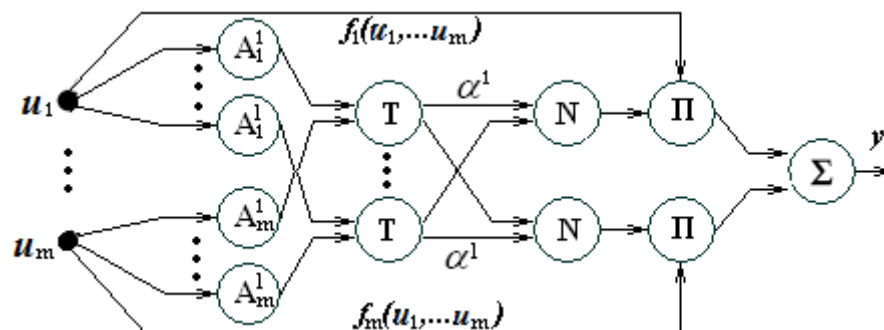


Рис. 1. Нейронечёткая система типа ANFIS.

Параметры ННС определяются оптимизацией на основании обучающего множества. Функция, реализуемая ННС, задается формулой (2). Тогда функция ошибки имеет вид:

$$E = \frac{1}{2} \sum_{i=1}^k (y^i - \tilde{y}^i)^2.$$

Здесь  $\tilde{y}^i$  – выход ННС при входе из обучающего множества  $u^i = (u_1^i, \dots, u_m^i)$ . Функция ошибки минимизируется подбором параметров ННС.

## Нечёткие модели и ННС с переключениями

Модели с переключениями применяются в двух случаях:

- когда присутствуют изменения в структуре или параметрах моделируемого объекта, возникающие из-за изменений в окружающей среде или подсистемах;
- когда для достижения устойчивости необходимо переключающееся управление.

### *Нечёткие и нейронечёткие переключаемые модели*

Нечёткая модель с переключениями состоит из нескольких классических нечётких подмоделей и переключающего сигнала. Переключаемая нечёткая TS-модель описывается совокупностью правил вида (3):

$$R_{\sigma}^l: \text{If } u_1 \text{ is } A_{\sigma 1}^l, \dots \text{ and } u_m \text{ is } A_{\sigma m}^l, \text{ then } y = (\mathbf{a}_{\sigma}^l) \mathbf{u}^T + b_{\sigma}^l. \quad (3)$$

Здесь  $l = 1, \dots, N_{\sigma}$  – количество правил в каждой подмодели,  $A_{\sigma i}^l$  – входные нечёткие множества,  $\mathbf{u} = \{u_1, \dots, u_m\}$  – входы модели,  $\mathbf{a}_{\sigma}^l, b_{\sigma}^l$  – параметры функций заключений правил,  $\sigma \in S = \{1, 2, \dots, s\}$  – переключающий сигнал.

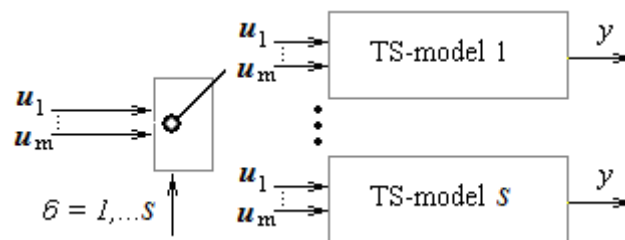


Рис. 2. Нечёткая модель Такаги-Сугено с переключением.

Нейронечёткая модель с переключениями аналогична нечёткой и отличается от неё возможностью автоматической настройки параметров.

Плакат 4.

## Разностные нечёткие модели

Большими по сравнению с нечёткими моделями (1) возможностями обладают разностные TS-модели, база правил которых имеет вид (4).

$$R^l : \text{If } \mathbf{U} \text{ is } A^l \text{ then } y(t+1) = \mathbf{a}^l \mathbf{U} \mathbf{b}^l + c^l. \quad (4)$$

Здесь  $\mathbf{U} = [\mathbf{u}_1, \dots, \mathbf{u}_m]^T \in R^{m \times n}$ ,  $\mathbf{u}_i = [u_i(t), \dots, u_i(t-n+1)]$  – входы модели.

В модели (4) учитываются не только текущие входные значения, но и входные значения за несколько предыдущих моментов времени. Её основное преимущество состоит в более точном отражении действительности благодаря расширенному набору предпосылок.

Правила нечёткой модели (4) развернутом виде такие

$$\begin{aligned} R^l : \text{If } u_1(t) \text{ is } A_{11}^l, \dots, \text{and } u_1(t-n+1) \text{ is } A_{1n}^l, \dots, \text{and} \dots \\ \text{and } u_m(t) \text{ is } A_{m1}^l, \dots, \text{and } u_m(t-n+1) \text{ is } A_{mn}^l \\ \text{then } y(t+1) = \mathbf{a}^l \mathbf{U} \mathbf{b}^l + c^l. \end{aligned} \quad (5)$$

Однако большое количество входов в модели (4) приводит к необходимости задания большого числа параметров входных нечётких множеств. Это усложняет идентификацию модели.

Плакат 5.

## Фаззификация в разностной нечёткой модели

Для снижения числа настраиваемых параметров модели (4) предлагается использовать трёхмерные гауссовские функции принадлежности.

Степень принадлежности входа стандартному гауссовскому нечёткому множеству вычисляется по формуле (6). Множества такого типа представлены на рис. 3 слева.

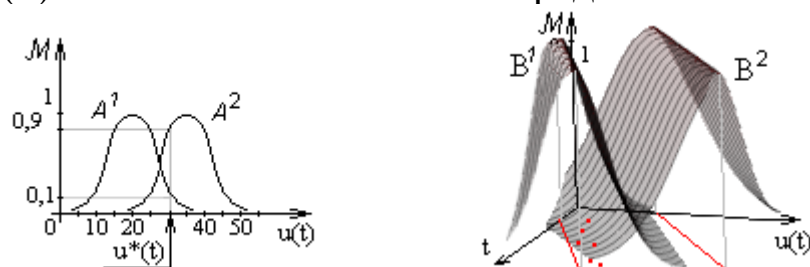


Рис. 3. Стандартная гауссовская функция принадлежности и предлагаемая функция принадлежности.

$$\mu_i^l = \exp \left[ -\frac{1}{2} \left( \frac{u_i - g_i^l}{h_i^l} \right)^2 \right]. \quad (6)$$

Предлагаемая функция принадлежности оценивает близость входного вектора  $\mathbf{u}_i = [u_i(t), \dots, u_i(t-n+1)]$  к центру нечёткого множества (рис. 3 справа). Степень принадлежности нечёткому множеству вычисляется по формуле:

$$\mu_i^l = \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n \exp \left[ -\frac{1}{h_i^l} \left( (t-j+1) + \frac{g_{li}^l - u_i(t-j+1)}{g_{0i}^l} \right)^2 \right]. \quad (7)$$

Плакат 6.

## Разностная нечёткая или нейронечёткая модель с переключениями

При использовании предложенных функций принадлежности правила разностной нечёткой Такаги-Сугено модели будут иметь вид:

$$R^l : \text{If } \mathbf{u}_1 \text{ is } B_1^l, \dots \text{and } \mathbf{u}_m \text{ is } B_m^l \text{ then } y(t+1) = \mathbf{a}^l \mathbf{U} \mathbf{b}^l + c^l. \quad (8)$$

Здесь  $\mathbf{u}_i = [u_i(t), \dots, u_i(t-n+1)]$  – входы модели.

Заметим, что большое число входов, повышая точность разностной модели, в то же время является её недостатком: увеличивается количество параметров, требующих идентификации. Предложенные функции принадлежности сокращают количество настраиваемых параметров предпосылок правил в  $2n/3$  раз.

Введём в разностную нечёткую модель переключения. Правила будут иметь вид:

$$R_\sigma^l : \text{If } \mathbf{u}_1 \text{ is } B_{\sigma 1}^l, \dots \text{and } \mathbf{u}_m \text{ is } B_{\sigma m}^l \text{ then } y(t+1) = \mathbf{a}_\sigma^l \mathbf{U} \mathbf{b}_\sigma^l + c_\sigma^l. \quad (9)$$

Добавив в модель (9) возможность настройки параметров заключений правил и параметров входных функций принадлежности, получим разностную нечёткую ANFIS-модель с переключениями. Такой моделью был описан процесс варки сахара.

Плакат 7.

## Настройка разностной нейронечёткой модели с переключениями

Традиционный для нейронечётких моделей способ настройки – из условия минимизации функции ошибки – зачастую дает не очень хорошие результаты, особенно в случаях большого количества входов модели.

Для повышения точности настройки ННС можно использовать альтернативный способ, заключающийся в отдельной настройке параметров заключений и предпосылок.

Параметры заключений настраиваются традиционным способом. Параметры предпосылок в случае использования трёхмерных функций принадлежности могут быть настроены с помощью алгоритма, представленного на плакате 8.

Отдельная настройка существенно повышает точность моделирования.

Таблица 1. Сравнение результатов обучения. Модель с тремя входами и одним выходом.

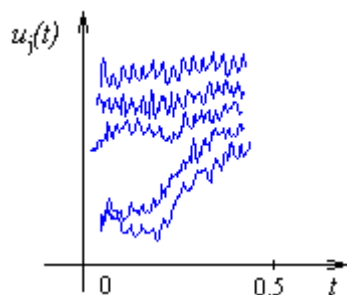
	Настройка по всем параметрам	Отдельная настройка
Число настр. параметров	20	8
Число шагов	30	30
Ошибка	21.62	1.87
Относительная ошибка, %	27.02	2.33



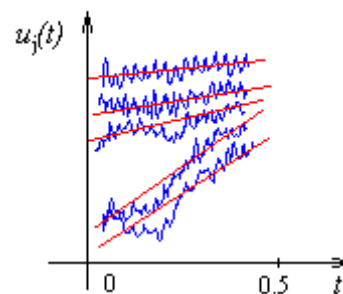
Плакат 8.

## Настройка нейронечеткой разностной модели с переключениями

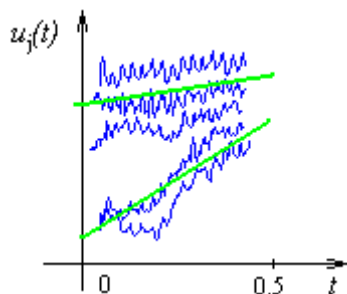
При отдельной настройке нейронечеткой модели трёхмерные входные функции принадлежности (7) можно идентифицировать с помощью следующего алгоритма.



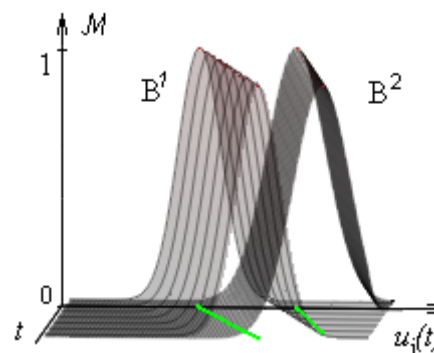
*Шаг 1.* Рассмотрим вход  $u_j$ . Пусть обучающее множество состоит из 5 векторов.



*Шаг 2.* С помощью МНК построим прямые по каждому входному вектору.



*Шаг 3.* Усредним получившиеся на предыдущем шаге прямые, получим центры трехмерных функций принадлежности.



*Шаг 4.* Ширину ФП примем равной  $1/3$  расстояния между центрами.

Плакат 9.

## Моделирование процесса варки сахара разностной переключаемой нейронечёткой системой

Моделирование процесса варки сахара сводится к правильному подбору законов, по которым изменяются параметры варки.

Контролируемые параметры варки:

- L – уровень сиропа в вакуум-аппарате;
- V – разрежение в вакуум-аппарате;
- P – давление пара;
- D – плотность сиропа.

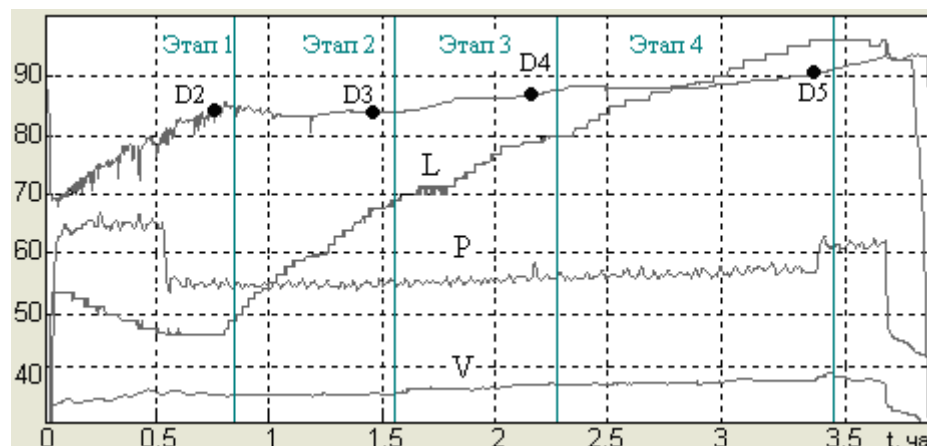


Рис. 4. Графики параметров варки сахара.

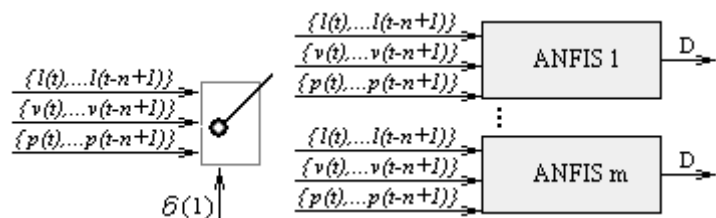


Рис. 5. Переключаемая ННС, моделирующая процесс варки.

На разных этапах процесса варки связи между параметрами меняются. Лучше всего для описания такого процесса подходит разностная нейронечёткая модель с переключениями, состоящая из нескольких подмоделей. Каждая подмодель соответствует своему этапу варки.

Плакат 10.

## Результаты моделирования процесса варки сахара

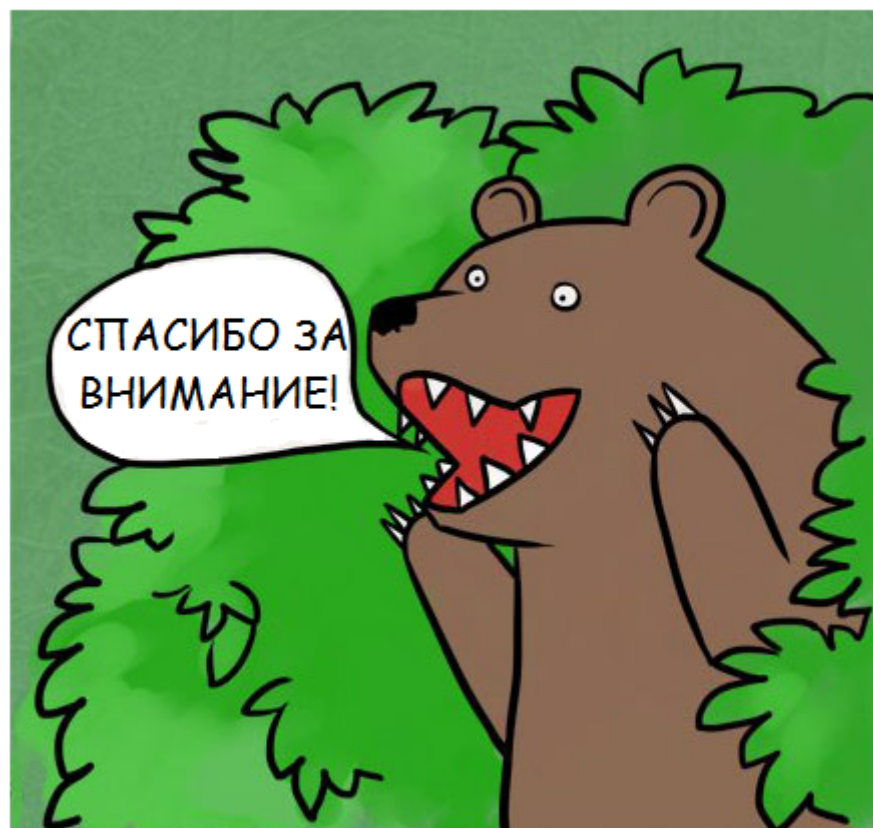
Разностная нейронечёткая модель с переключениями была запрограммирована в MATLAB. В обучающее множество вошли 30 циклов варки, в тестовое – 20 циклов.

В таблице 2 приведены результаты работы одной из моделей – реальные и модельные значения контрольных точек для 4 циклов варки. Отклонения модельных значений контрольных точек от реальных по всем циклам тестового множества не превышали 3%.

Таблица 2. Значения контрольных точек для нескольких циклов варки.

№ цикла	$D_2$		$D_3$		$D_4$		$D_5$	
	Реальн. знач.	Выход модели	Реальн. знач.	Выход модели	Реальн. знач.	Выход модели	Реальн. знач.	Выход модели
152	79.8013	78.6769	82.8697	83.9876	87.3280	88.432	89.4328	88.521
236	83.2951	83.9854	85.1536	85.3880	88.2207	88.567	92.5393	92.873
264	83.1304	82.5571	84.8719	85.0074	87.5356	88.957	91.4590	92.045
267	83.0655	82.0633	86.1108	86.9967	89.1376	90.012	93.0061	94.343

Благодаря использованию предложенных трёхмерных функций принадлежности количество настраиваемых параметров модели сократилось в 10 раз.



СПАСИБО ЗА  
ВНИМАНИЕ!

## Список литературы

1. Пегат А. Нечёткое моделирование и управление. М.: Бином, 2009.
2. Ярушкина Н. Г. Нечёткие нейронные сети. Лекции по нейроинформатике. Москва, 2004.
3. Жбанова Н.Ю. Моделирование процесса варки сахара с использованием нейронечёткой переключаемой модели // Сборник трудов по итогам XVII Международной открытой научной конференции «Современные проблемы информатизации в анализе и синтезе программных и телекоммуникационных систем», 2012. Вып. 17, с. 300-302.
4. Кудинов Ю.И. Построение и идентификация нечёткой модели многосвязного объекта // Вести ВУЗов Черноземья. Липецк, изд-во ЛГТУ, 2005. №5. С.35-39.
5. Сараев П. В. Теоретические основы конструирования гибридных нейронечётких структур // Сборник научных трудов семинара «Методы и модели искусственного интеллекта», Липецк, 2003.
6. Шпилевая О. Я., Котов К. Ю. Переключаемые системы: устойчивость и проектирование // Автометрия, том 44, №5, 2008.
7. Liberzon D. Switching in Systems and Control. Boston, MA: Birkhauser, 2003.
8. Ojleska V., Stojanovski G. Switched Fuzzy Systems: Overview and Perspectives // Proc. of the 9th International PhD Workshop on Systems and Control, Izola, 2008, p. 221-226.
9. Yang H., Dimirovski G. M., Zhao J. Switched Fuzzy Systems: representation modeling, stability analysis, and control design // Proc. of the third International IEEE Conference on Intelligent Systems, London, 2006, p. 306-311.