

УДК 612.365:004.92

## НЕЧЕТКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ОТКАЗОВ НАГРЕВАТЕЛЬНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ПЕЧЕЙ

**Е.Н. Яшин, Х.Х. Хоруб**

*Кафедра «Конструирование радиоэлектронных и  
микропроцессорных систем», ТГТУ*

**Ключевые слова и фразы:** прогнозирование; нечеткая логика; моделирование.

**Аннотация:** Рассматриваются вопросы моделирования постепенных отказов сложных технических систем методами нечеткой логики. Используется коррекция функций принадлежности выходной лингвистической переменной в результате нечеткого вывода.

---

Широкое применение электрических печей непрерывного действия (ЭПНД), со стержневыми карбидкремниевыми электрическими нагревателями или КЭНами объясняется низкой их стоимостью, высоким КПД (более 90 %) и малым тепловыделением на блоке управления, удобством подвода энергии, отсутствием газовых выделений во время работы, высокая рабочая температура (до 1400 °С). Несмотря на то, что нагреватели обладают высокой надежностью (наработка до отказа составляет более 10000 ч), для ЭПНД, содержащей десятки нагревательных элементов, достаточно высока вероятность выхода из строя одного и более нагревателей с частичной или полной потерей работоспособности печи в процессе ее работы.

Особым классом ЭПНД являются прецизионные печи обжига полупроводников (позисторов, терморезисторов, варисторов, сегнетоэлектриков и т.п.). В таких печах одновременно обрабатывается большое число заготовок радиоэлементов, и если в процессе работы произойдет отказ электронагревателя, то технологический процесс нарушается, в результате вся партия заготовок обычно бракуется.

Значительное снижение нарушений работы печи может дать мониторинг за состоянием нагревателей с целью своевременного оповещения оператора о низкой надежности какого-либо электронагревателя (с указанием какого именно) [4]. Для прогнозирования безотказности нагревателей и всей печи в целом необходимо иметь соответствующую математическую модель. Опыт эксплуатации КЭНов позволил выявить некоторые закономерности, связывающие надежность работы нагревателей с изменениями их омических сопротивлений во времени. Значительное количество случайных факторов, действующих на нагреватели, не позволяют осуществлять прогнозирование отказов с достаточной точностью. Однако, имея в распоряжении только информацию качественного характера, можно эффективно оценивать работоспособность электронагревателей с помощью теории нечетких множеств [1, 2].

Для повышения надежности ЭПНД требуется решить следующие задачи: контроль состояния в моменты времени между запусками печи и оценка работоспособности нагревателей в процессе ее работы. Для решения первой задачи необходимо накапливать информацию о каждом нагревателе в соответствующей базе данных и на основе анализа накопленной и текущей информации необходимо принять решение о замене конкретного нагревателя.

Вторую задачу математически можно сформулировать следующим образом. В печи имеется  $n$  нагревателей, время эксплуатации которых  $T_i, i = \overline{1, n}$  в общем случае различно. Для установившегося температурного режима  $\Theta_i$ , известно сопротивление нагревателей  $R_i$  и скорости изменения этих сопротивлений во времени  $R'_i$ . Требуется оценить вероятность безотказной работы каждого электронагревателя на некотором заданном интервале времени  $[t_0, t_0 + \Delta T]$  работы печи.

Применение хорошо разработанных одномерных методов прогнозирования постепенных отказов, для данной задачи, наталкиваются на значительные трудности, тогда как многомерные не обеспечивают достаточно достоверного решения [4]. Использование методов управления состоянием сопряжено со значительными трудностями, в связи с большой неопределенностью математического описания

[4]. Для преодоления трудностей, связанных с учетом многих влияющих параметров и условий, предлагается использовать методы нечеткой логики.

Для решения поставленной задачи задаются входными и выходными лингвистическими переменными (ЛП). В качестве входных ЛП рассматриваются: 1)  $R$  – сопротивление электронагревателя, Ом; 2)  $R'$  – скорость изменения сопротивления во времени в некоторый момент времени  $t \in [t_0, t_0 + \Delta T]$  при установившейся температуре, Ом/ч; 3)  $\Theta_{\text{ср}}$  – температура окружающей среды электронагревателя в рабочем режиме, °С; 4)  $\Delta T$  – предполагаемая длительность работы печи; 5)  $T_{\text{КЭН}}$  – длительность эксплуатации электронагревателя к моменту времени  $t \in [t_0, t_0 + \Delta T]$ .

Выходными лингвистическими переменными являются: 1)  $P_{\text{КЭН}}$  – вероятность безотказной работы (ВБР) нагревателя на временном интервале  $[t_0, t_0 + \Delta T]$ ; 2)  $K$  – вектор коэффициентов коррекции функций принадлежности.

Правила нечеткого вывода задаются двумя блоками  $RB1$  и  $RB2$ . Блок  $RB1$  осуществляет нечеткий вывод для  $P_{\text{КЭН}}$  на основе значений входных переменных  $R$ ,  $R'$ ,  $\Theta_{\text{ср}}$  традиционными методами. Блок  $RB2$  используется для получения коэффициентов  $K$  на основе данных о  $\Delta T$  и  $T_{\text{КЭН}}$ .

Если отказ некоторых электронагревателей не приводит к полной потере работоспособности всей печи, то общее множество электронагревателей  $S$  разбивается на два подмножества  $S_1$  и  $S_2$ . В подмножество  $S_1$  включены те электронагреватели, отказ которых приводит к невозможности выполнения заданных функций всей печи, а в подмножество  $S_2$  – нагреватели, отказы которых не приводят к критическому состоянию. После отказа элемента, принадлежащего множеству  $S_2$ , состав подмножеств корректируется. Таким образом, множества  $S_1$  и  $S_2$  формируются с учетом важности электронагревателя для работы всей печи. Для принятия решения о необходимости замены электронагревателя с учетом важности, задаются пределами ВБР  $P_1^{\text{доп}}$ ,  $P_2^{\text{доп}}$  для множеств  $S_1$  и  $S_2$  соответственно.

Процесс коррекции функций принадлежности реализуется следующим образом (рис. 1). Вводятся коэффициенты коррекции  $K = (k_1, k_2, \dots)$ , которые однозначно определяют вид функций принадлежности термов выходной ЛП  $P_{КЭН}$ . В качестве  $K$  могут задаваться границы интервалов термов выходной переменной, масштабирующие коэффициенты и т.п. При задании границ интервалов термов появляется возможность изменять форму функции принадлежности терма (рис. 2). Использование масштабирующих коэффициентов позволяет пропорционально изменять интервал в большую (увеличение нечеткости) или меньшую (уменьшение нечеткости) стороны, кроме того могут изменяться координаты, характеризующие положение терма на координатной оси (рис. 3). На рис. 3 точка  $fk_2$  располагается в центре тяжести фигуры, ограниченной функцией принадлежности  $\mu_2(\omega)$  корректируемого терма.

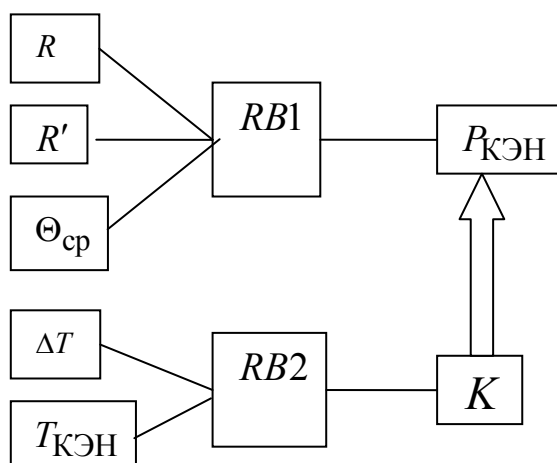


Рис. 1. Структура нечеткого вывода с коррекцией функций принадлежности

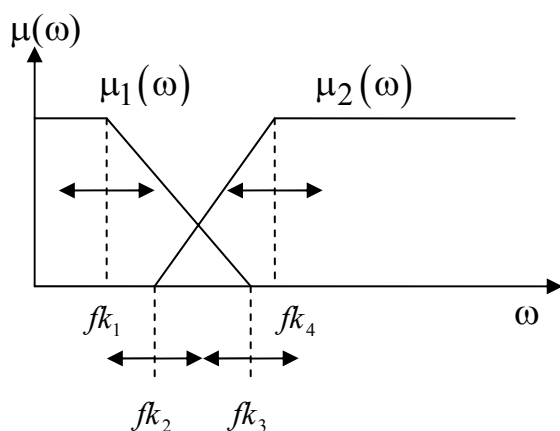


Рис. 2. Коррекция функции принадлежности при задании границ интервалов

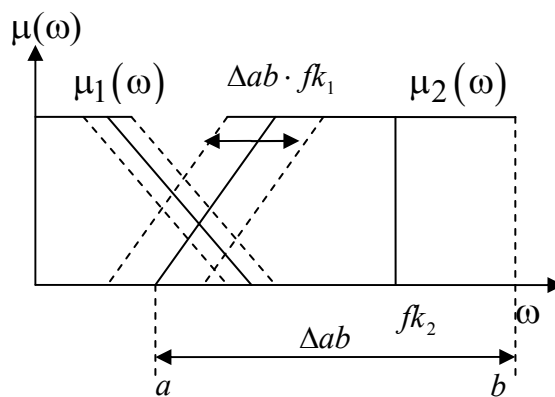


Рис. 3. Коррекция функции принадлежности с помощью масштабирующего коэффициента  $fk_1$  относительно точки  $fk_2$

Результатом коррекции будут измененные функции принадлежности выходных переменных, а, соответственно, и значения, получаемые при дефаззификации.

В качестве примера предложенного подхода рассматривается прогнозирование отказов для шестизонной печи обжига позисторов в воздушной среде. В печи используется  $|S| = 72$  нагревателя марки КЭН А 18/250/400 или 18/300/350 ГОСТ 16139–76. Требуется произвести прогноз работоспособности отдельных нагревателей и печи в целом для интервалов времени  $\Delta T_1 = 50$  ч и  $\Delta T_2 = 200$  ч. Наработку всех нагревателей принять постоянной и равной  $T = 4000$  ч.

Введем ЛП, функции принадлежности которых будут задаваться с использованием программы FuzzyTech 5.54d Professional Edition (демо-версия), предназначенной для разработки нечетких приложений, используемых в микроконтроллерах MSP фирмы Intel. Далее рассматриваются функции принадлежности только выходных ЛП.

Функция принадлежности для  $R_{КЭН}$  показана на рис. 4.

Задаются коэффициенты  $K$  для каждого терма корректируемой лингвистической переменной  $R_{КЭН}$ . С учетом выбранного метода дефаззификации (CoM – центр максимумов), в качестве корректирующих коэффициентов задаются те, которые характеризуют положение терма на координатной оси. В данном случае рассматривается вариант, когда функция принадлежности  $\mu_i(x)$   $i$ -го терма  $R_{КЭН}$  перемещается параллельно самой себе вдоль оси абсцисс

$$\mu_i(x) \rightarrow \mu_i(xk_i). \quad (1)$$

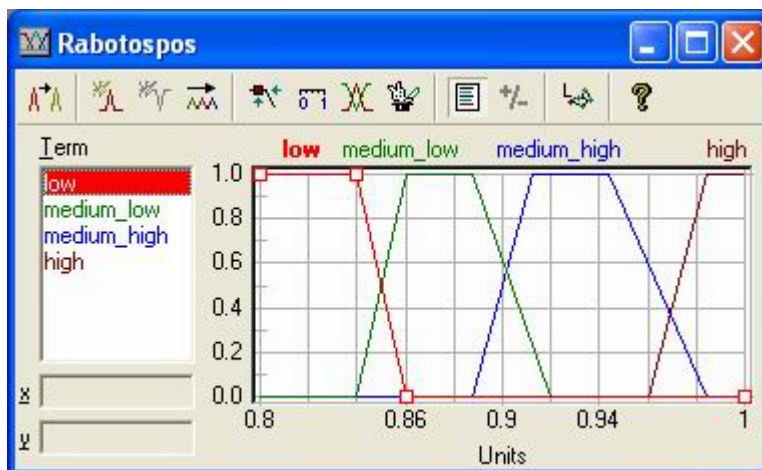


Рис. 4. Лингвистическая переменная  $R_{КЭН}$

Сдвиг функции принадлежности  $i$ -го терма переменной  $R_{КЭН}$  вправо  $k_i > 1$  означает, что данному терму соответствует более высокая надежность и его вклад в решение проявляется через повышение надежности, при  $k_i < 1$  осуществляется сдвиг влево и эффект будет обратный.

Функция принадлежности коэффициента  $k_1$  для терма «low» переменной  $R_{КЭН}$  приведена на рис. 5, для остальных коэффициентов коррекции функции принадлежности идентичны.

Нечеткий вывод для значений  $K$  осуществляется с помощью блока правил (рис. 6).

Для исходных данных задачи получены следующие значения коэффициентов  $K$  (рис. 7).

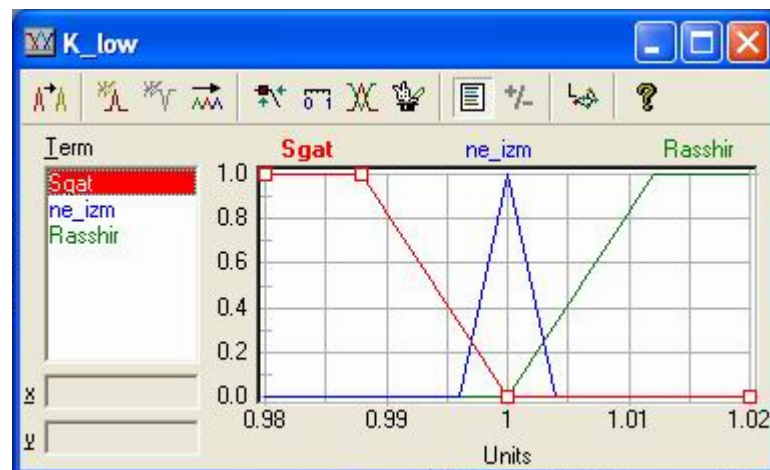
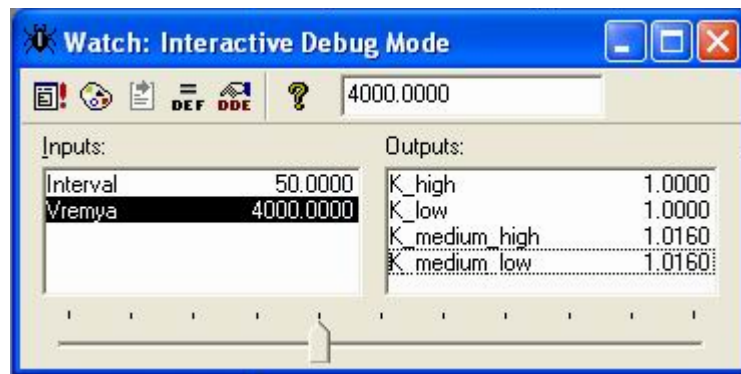


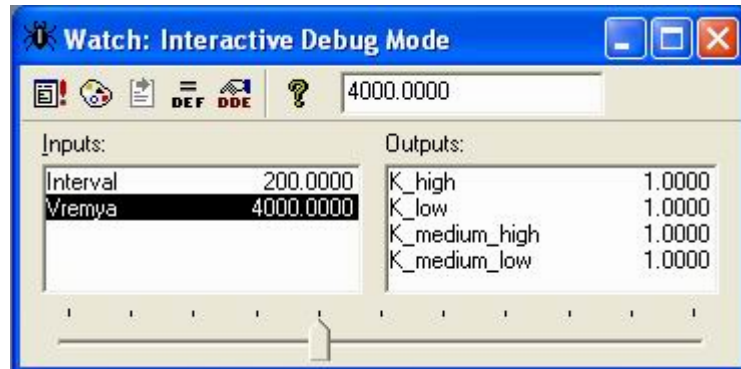
Рис. 5. Вид функции принадлежности коэффициентов  $k_1$  для термов  $R_{КЭН}$

#	IF		THEN		THEN		THEN		THEN	
	Interval	Vremya	DoS	K_high	DoS	K_low	DoS	K_medium_high	DoS	K_medium_low
1	low	low	1.00	Sgat	1.00	Rasshir	1.00	ne_izm	1.00	Sgat
2	medium	low	1.00	Sgat	1.00	ne_izm	1.00	ne_izm	1.00	ne_izm
3	high	low	1.00	ne_izm	1.00	ne_izm	1.00	Sgat	1.00	ne_izm
4	low	medium	1.00	ne_izm	1.00	ne_izm	1.00	Rasshir	1.00	Rasshir
5	medium	medium	1.00	ne_izm	1.00	ne_izm	1.00	ne_izm	1.00	ne_izm
6	high	medium	1.00	ne_izm	1.00	ne_izm	1.00	Rasshir	1.00	Sgat
7	low	high	1.00	ne_izm	1.00	Rasshir	1.00	Sgat	1.00	Sgat
8	medium	high	1.00	Rasshir	1.00	Sgat	1.00	ne_izm	1.00	Sgat
9	high	high	1.00	Rasshir	1.00	Sgat	1.00	Rasshir	1.00	Sgat
10										

Рис. 6. Блок правил нечеткого вывода для  $K$



а)

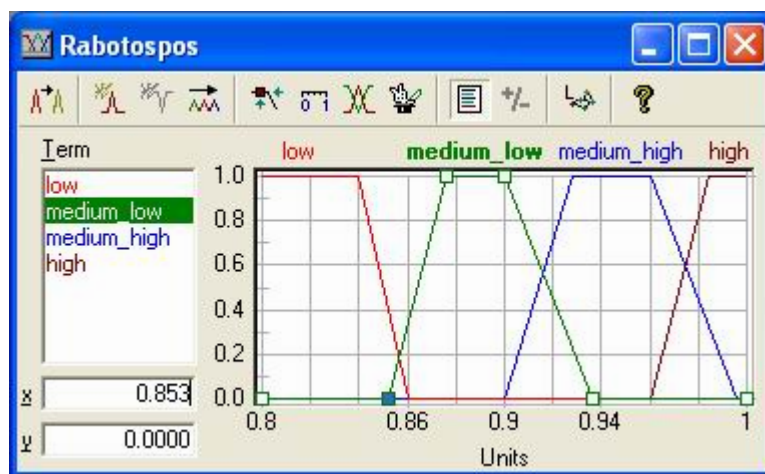


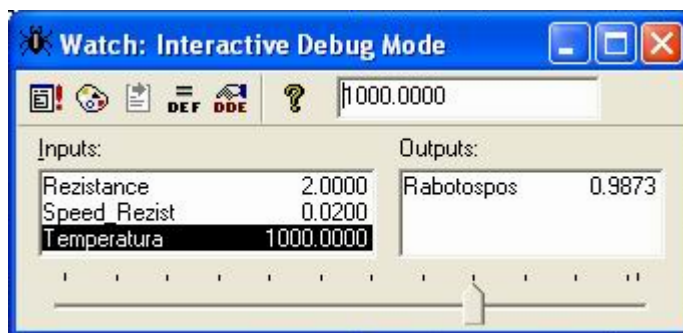
б)

Рис. 7. Значения  $K$  для:а –  $\Delta T_1 = 50$  ч; б –  $\Delta T_2 = 200$  ч

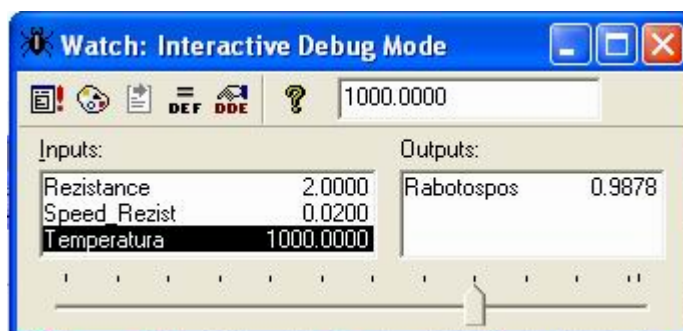
Скорректированная функция принадлежности  $P_{КЭН}$  для  $\Delta T_1 = 50$  ч получена с помощью (1) и показана на рис. 8.

Результат нечеткого вывода для  $P_{КЭН}$  при  $v_{3,i} = 1000$  °С,  $v_{1,i} = 2$  Ом и  $v_{2,i} = 0,02 \cdot 10^{-3}$  Ом/ч показан на рис. 9.

Рис. 8. Вид функции принадлежности  $P_{КЭН}$  после коррекции



а)



б)

Рис. 9. Результат нечеткого вывода для  $P_{КЭН}$  :

$$a - \Delta T = 200 \text{ ч}; \quad б - \Delta T = 50 \text{ ч}$$

После того, как будут определены  $P_{КЭН}$  для  $i = \overline{1, n}$  нагревателей, формируется окончательный вывод о работоспособности всей печи с помощью  $P_1^{\text{доп}}$  и  $P_2^{\text{доп}}$ , а так же анализа наиболее вероятного состояния, в которое система может перейти [3].

Данный способ определения работоспособности может эффективно применяться для идентификации состояния функционирования сложной динамической системы на множестве состояний функционирования. Причем, он не только выдает информацию о состоянии функционирования, но и оперативно определяет наиболее вероятное состояние, в которое система скоро может попасть. Использование диагностики работоспособности нагревательных элементов дополняет элементом интеллектуальности систему управления ЭПНД.



*Список литературы*

1. Дилигенский, Н.В. Нечеткое моделирование и многокритериальная оптимизация производственных систем в условиях неопределенности: технология, экономика, экология / Н.В Дилигенский, Л.Г Дымова., П.В Севастьянов. – М. : Машиностроение-1, – 2004.
2. Леоненков, А.В. Нечеткое моделирование в среде MATLAB и fuzzyTECH./ А.В Леоненков. – СПб. : БХВ-Петербург, 2003. – 736 с.
3. Муромцев, Ю. Л. Моделирование и оптимизация сложных систем при изменениях состояния функционирования / Ю.Л. Муромцев, Л.Н. Ляпин, О.В. Попова. – Воронеж : Изд-во Воронеж. гос. ун-т, 1992. – 164 с.
4. Надежность технических систем : справ. / Ю.К. Беляев, В.А. Богатырев, В.В. Болотин и др. ; под. ред. И.А. Ушакова. – М. : Радио и связь, 1985. – 608 с.

---

## FUZZY MODELING OF REFUSALS OF HEATING ELEMENTS OF ELECTRIC FURNACES

**E.N. Yashin, H.Kh. Horoub**

**Key words and phrases:** forecasting; fuzzy logic, sets; modeling.

**Abstract:** Questions of modelling of gradual refusals of complex technical systems are considered by methods of fuzzy logic. Correction of functions of an accessory of a target linguistic variable as a result of an indistinct conclusion is used.