

**В. В. Грабко, д. т. н., проф.; С. Н. Бабий**

## **МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ОЦЕНКИ КАЧЕСТВА ПЕРЕХОДНЫХ ПРОЦЕССОВ В СИСТЕМАХ УПРАВЛЕНИЯ ЭЛЕКТРОПРИВОДАМИ**

*В статье разработана нечеткая математическая модель оценки качества переходных процессов в системах управления электромеханическими объектами, а также осуществлена её тонкая настройка путем использования аппарата генетических алгоритмов.*

**Ключевые слова:** модель, электромеханическая система, диагностирование, генетический алгоритм

### **Актуальность**

Эксплуатация электромеханических систем предусматривает их работу в частности в переходных режимах, причинами возникновения которых могут быть как изменения параметров входных управляющих влияний, так и разнообразные возмущающие воздействия, которые нарушают нормальное функционирование системы. В таких условиях электромеханическая система должна обеспечить стойкую работу с установленными показателями качества, которые характеризуют динамику ее работы. Оценка показателей качества позволяет сделать вывод о техническом состоянии объекта диагностирования.

Если электромеханическая система является стойкой в переходных режимах, но она не обеспечивает желаемый переходный процесс, то практически такая система уже не пригодна к эксплуатации [1].

Некоторые аспекты решения данного вопроса рассмотрены в работах [2-5].

Так, в работе [3] разработана математическая модель диагностирования систем управления электрическим приводом, однако предложенный подход в большей мере пригоден для анализа устойчивых режимов работы. В работах [4, 5] показан другой путь решения данной проблемы путем создания диагностических моделей в виде адаптивных нейро-нечетких сетей.

Поскольку оценка показателей качества позволяет сделать вывод о техническом состоянии объекта диагностирования, построим соответствующую математическую модель, основанную на использовании элементов теории нечетких множеств. Для настройки работы модели с конкретным объектом диагностирования воспользуемся аппаратом генетических алгоритмов, который на данном этапе является одним из наиболее современных и для него не характерна проблема локального экстремума.

### **Решение задачи**

Качество регулирования принято оценивать рядом показателей, основными из которых является: величина перерегулирования; время регулирования; количество колебаний регулируемой величины за время переходного процесса [6].

В качестве входных переменных модели будут использоваться отмеченные показатели качества переходных процессов, а в качестве выходной переменной – показатель качества функционирования. В случае необходимости, с целью улучшения качества диагностирования, в математическую модель можно вводить и другие дополнительные переменные, характеризующие работу электромеханической системы.

Таблица 1

## Параметры входных переменных

Показатели	Практическое использование		
	Редко	Часто	Избегают
Перерегулирование %	0	10-30	50-70
Количество колебаний	0	1, 2	3, 4

Значения исходных переменных для разных систем отличаются и для большинства систем находятся в определенных пределах (табл. 1) [1, 6].

Для описания входных  $x_1, x_2, x_3$  и выходных  $d$  переменных будем использовать лингвистическую оценку в соответствии с терминами, которые представлены в таблице 2. Для описания отдельных нечетких термов  $T$  используем модель функции принадлежности (ФП) вида [7]

$$\mu^T(x) = \frac{1}{1 + \left(\frac{x-b}{c}\right)^2}, \quad (1)$$

где  $b$  – координата максимума ФП;  $c$  – коэффициент концентрации-растягивания ФП.

Таблица 2

## Лингвистическая оценка переменных

Параметры	Название	Диапазон значений	Термы
$x_1$	Перерегулирование	0%...100%	малое (М), среднее (С), допустимое (Д), большое (Б)
$x_2$	Количество колебаний	0.5	малая (М), допустимая (Д), большая (Б)
$x_3$	Время переходного процесса	0 с..10 с	малый (М), средний (С), допустимый (Д), большой (Б)
$d$	Качество	1.5	неудовлетворительная ( $d_1$ ), недопустимая ( $d_2$ ), достаточная ( $d_3$ ), высокая ( $d_4$ ), очень высокая ( $d_5$ )

Пользуясь введенными терминами лингвистических переменных и деревом логического вывода (рис. 1) разработаем экспертную базу знаний, которая является нечетким носителем информации о причинно-следственных связях между выходными переменными (табл. 3).

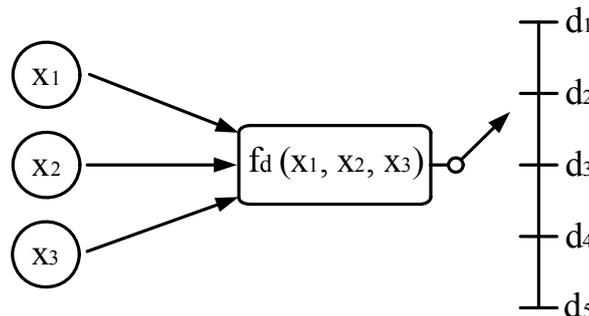


Рис. 1. Дерево логического вывода

Таблица 3

Экспертная база знаний

Входные переменные			Выход	Входные переменные			Выход	Входные переменные			Выход
x <sub>1</sub>	x <sub>2</sub>	x <sub>3</sub>	d	x <sub>1</sub>	x <sub>2</sub>	x <sub>3</sub>	d	x <sub>1</sub>	x <sub>2</sub>	x <sub>3</sub>	d
М	М	М	d <sub>5</sub>	С	М	Д	d <sub>3</sub>	С	Д	Б	d <sub>2</sub>
М	М	С		С	Д	Д		С	Б	Д	
С	М	М		Д	Д	С		С	Б	Б	
С	М	С		Д	Д	Д		Д	Д	Б	
М	Д	С	d <sub>4</sub>	Б	Д	Д	d <sub>2</sub>	Б	Д	Б	d <sub>1</sub>
С	Д	С		М	М	Б		Б	Б	Д	
М	М	Д	d <sub>3</sub>	М	Б	Б		Б	Б	Б	

Значения параметров ФП для термов входных переменных определяются особенностями конкретной системы. На этапе подготовки модели задаются произвольными значениями параметров термов из диапазона возможных. Так, ориентируясь на системы, которые получили наибольшее практическое использование, их можно представить в виде таблице 4.

Таблица 4

Начальные параметры настройки ФП нечетких термов

Пр.	Термы	ФП		Пр.	Термы	ФП		Пр.	Термы	ФП	
		b	c			b	c			b	c
x <sub>1</sub>	(М)	0	2,88	x <sub>2</sub>	(М)	0	0,46	x <sub>3</sub>	(М)	0	0,23
	(С)	10			(Д)	1,5	0,29		(С)	0,75	
	(Д)	20			(Б)	3	0,46		(Д)	1,5	
	(Б)	30					(Б)		2,25		

Для получения результатов моделирования составим на основе экспертной базы знаний и термов ФП базу нечетких логических уравнений, при этом будем использовать операции • (И-min) и ∨ (ИЛИ-max). Веса отдельных логических правил равны единице, поскольку данный этап предусматривает лишь грубую настройку модели.

Нечеткие логические правила оценки качества переходных процессов системы имеют вид (2) – (6):

$$\mu^{d_5}(d) = [\mu^M(x_1) \cdot \mu^M(x_2) \cdot \mu^M(x_3)] \vee [\mu^M(x_1) \cdot \mu^M(x_2) \cdot \mu^C(x_3)] \vee [\mu^C(x_1) \cdot \mu^M(x_2) \cdot \mu^M(x_3)] \vee [\mu^C(x_1) \cdot \mu^M(x_2) \cdot \mu^C(x_3)], \tag{2}$$

$$\mu^{d_4}(d) = [\mu^M(x_1) \cdot \mu^D(x_2) \cdot \mu^C(x_3)] \vee [\mu^C(x_1) \cdot \mu^D(x_2) \cdot \mu^C(x_3)], \tag{3}$$

$$\begin{aligned} \mu^{d_3}(d) = & [\mu^M(x_1) \cdot \mu^M(x_2) \cdot \mu^D(x_3)] \vee \\ & \vee [\mu^C(x_1) \cdot \mu^M(x_2) \cdot \mu^D(x_3)] \vee \\ & \vee [\mu^C(x_1) \cdot \mu^D(x_2) \cdot \mu^D(x_3)] \vee \\ & \vee [\mu^D(x_1) \cdot \mu^D(x_2) \cdot \mu^C(x_3)] \vee \\ & \vee [\mu^D(x_1) \cdot \mu^D(x_2) \cdot \mu^D(x_3)] \vee \\ & \vee [\mu^B(x_1) \cdot \mu^D(x_2) \cdot \mu^D(x_3)], \end{aligned} \tag{4}$$

$$\begin{aligned} \mu^{d_3}(d) = & [\mu^M(x_1) \cdot \mu^M(x_2) \cdot \mu^B(x_3)] \vee \\ & \vee [\mu^M(x_1) \cdot \mu^B(x_2) \cdot \mu^B(x_3)] \vee \\ & \vee [\mu^C(x_1) \cdot \mu^D(x_2) \cdot \mu^B(x_3)] \vee \\ & \vee [\mu^C(x_1) \cdot \mu^B(x_2) \cdot \mu^D(x_3)] \vee \\ & \vee [\mu^C(x_1) \cdot \mu^B(x_2) \cdot \mu^B(x_3)] \vee \\ & \vee [\mu^D(x_1) \cdot \mu^D(x_2) \cdot \mu^B(x_3)] \vee \\ & \vee [\mu^B(x_1) \cdot \mu^D(x_2) \cdot \mu^B(x_3)] \vee \\ & \vee [\mu^B(x_1) \cdot \mu^B(x_2) \cdot \mu^D(x_3)], \end{aligned} \tag{5}$$

$$\mu^{d_1}(d) = [\mu^B(x_1) \cdot \mu^B(x_2) \cdot \mu^B(x_3)]. \tag{6}$$

Для тонкой настройки разработанной нечеткой модели под определенную систему необходимо осуществить корректировку параметров ФП нечетких термов входных переменных. Для этого воспользуемся аппаратом генетических алгоритмов, который обеспечивает одновременный разносторонний поиск в заданном диапазоне и базируется на операциях скрещивания, мутации и селекции.

Классический генетический алгоритм состоит из следующей последовательности шагов [8]:

- 1) генерация начальной популяции хромосом;
- 2) оценка приспособленности хромосом в популяции;
- 3) проверка условия остановки алгоритма;
- 4) селекция хромосом;
- 5) использование генетических операторов;
- 6) создание новой популяции;
- 7) переход к пункту 2;
- 8) если выполнено условие остановки, то выбор «наилучшей» хромосомы.

В условиях данной задачи структура хромосомы (рис. 2) формируется из параметров ФП  $c_i^{m_i}$   $b_i^{m_i}$

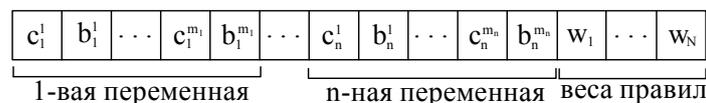


Рис. 2. Структура хромосомы

Начальная популяция, которая состояла из десяти хромосом, формировалась случайным образом в заданном интервале допустимых значений  $[c_i, \bar{c}_i]$   $[b_i, \bar{b}_i]$   $[w_i, \bar{w}_i]$ .

Элементы хромосом задаются следующим образом [7]:

$$\begin{cases} c_i^0 = \text{Random}([c_i, \bar{c}_i]), \\ b_i^0 = \text{Random}([b_i, \bar{b}_i]), \\ w_i^0 = \text{Random}([w_i, \bar{w}_i]), \end{cases} \quad (7)$$

где  $\text{Random}([\underline{\xi}_i, \bar{\xi}_i])$  означает операцию нахождения равномерно распределенного на интервале  $[\underline{\xi}_i, \bar{\xi}_i]$  случайного числа;  $\underline{\xi}_i$  нижняя граница интервала;  $\bar{\xi}_i$  верхняя граница интервала.

Процедура формирования новой популяции была построена на механизме элитного отбора, предусматривающего отбор лучших хромосом из объема расширенной популяции, которая образовалась на базе предыдущей после применения генетических операторов скрещивания и мутации.

Критерием обучения определялась сумма квадратов отклонений значений, определенных нечеткой моделью, и данных из обучающей выборки, полученных в процессе исследования реального объекта.

В результате оптимизации предложенной математической модели, которая осуществлялась с помощью программы написанной на языке Delphi, получены новые значения параметров ФП и веса правил нечеткой базы знаний.

Так, функции принадлежности нечетких термов такого параметра как «количество колебаний» до и после применения процедуры оптимизации изображены на рис. 3.

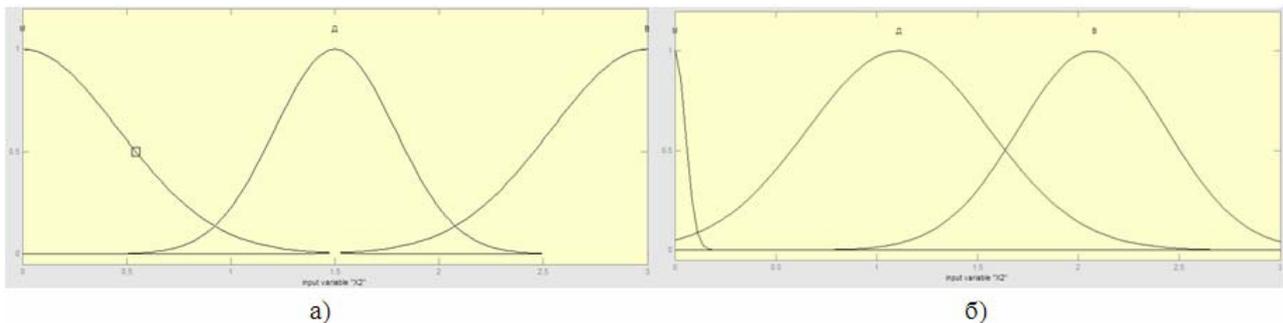


Рис. 3. ФП термов для параметра «количество колебаний» до (а) и после (б) применения процедуры оптимизации

Поведение оптимизированной нечеткой модели для оценки качества переходных процессов, которые имеют место в работе электромеханических систем, исследовалось в среде Matlab 6.5 [9]. При этом в одном случае из двадцати одного оценка оптимизированной системы несколько отличалась от экспертной, что свидетельствует о высоком качестве ее работы.

### Выводы

1. Предложена нечеткая математическая модель для определения оценки качества переходных процессов в системах управления электроприводами.
2. Продемонстрирована возможность тонкой настройки нечеткой модели для работы с конкретным объектом диагностирования.
3. Техническую реализацию предложенной модели можно осуществить программным или аппаратным путем для мониторинга технического состояния систем управления электромеханическими объектами.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Зайцев Г.Ф. Теория автоматического управления и регулирования. – 2-е изд., перераб. и доп. – К.: Выща шк. Головное изд-во, 1989. – 431 с.
2. Кутін В.М., Луцяк В.В., Матвієнко С.В. Підвищення якості діагностичних процедур складних систем автоматичного керування // Вісник КДПУ. – 2007. – № 3, частина 2. – С. 137–138.
3. Грабко В.В., Бабій С.М. Математична модель діагностичного контролю діючих систем керування електричним приводом // Вісник КДПУ. – 2006. – № 4, частина 1. – С. 139–140.
4. Агамалов О.Н. Оценка технического состояния электрооборудования в реальном масштабе времени методом нейро-нечеткой идентификации // Exponenta Pro. Математика в приложениях. – 2003. – № 2. – С. 36–44.
5. Агамалов О.Н., Костерев Н.В., Лукаш Н.П., Радайда Омар. Применение нечеткой нелинейной авторегрессионной модели с внешним входом для оценки технического состояния электрооборудования // Техническая электродинамика. – 2004. – № 2. – С. 49–58.
6. Анхимюк В.Л., Опейко О.Ф., Михеев Н.Н. Теория автоматического управления. – Мн.: Дизайн ПРО, 2000. – 352 с.
7. Ротштейн А.П. Интеллектуальные технологии идентификации: нечеткие множества, генетические алгоритмы, нейронные сети. – Вінниця: УНІВЕРСУМ – Вінниця, 1999. – 320 с.
8. Рутковская Д., Пилиньский М., Рутковский Л. Нейронные сети, генетические алгоритмы и нечеткие системы. – М: Горячая линия-Телеком, 2006. – 452 с.
9. Леоненков А.В. Нечеткое моделирование в среде MATLAB и fuzzyTECH. – СПб.: БХВ – Петербург, 2005. – 736 с.

**Грабко Владимир Витальевич** – заведующий кафедрой электромеханических систем автоматизации в промышленности и на транспорте;

**Бабий Сергей Николаевич** – аспирант кафедры электромеханических систем автоматизации в промышленности и на транспорте.

Винницкий национальный технический университет.