

УДК 621.316

**Л.Н. Канов, доцент, канд. техн. наук,****Е.А. Шушляпин, профессор, д-р техн. наук***Севастопольский национальный технический университет**ул. Университетская, 33, г. Севастополь, Украина, 99053**E-mail: root@sevgtu.sebastopol.ua***ТЕРМИНАЛЬНОЕ УПРАВЛЕНИЕ ЭЛЕКТРОПРИВОДОМ ПОСТОЯННОГО ТОКА НА ОСНОВЕ НЕЧЕТКОЙ НЕЙРОННОЙ СЕТИ**

*Для реализации терминального управления электроприводом постоянного тока методом конечного состояния предложено применение нечеткой нейронной сети на основе алгоритма Сугено путем аппроксимации управляющего напряжения, как функции координат системы. Описана база правил и функции принадлежности, приведены результаты применения сети к задаче пуска электропривода.*

**Ключевые слова:** терминальное управление, метод конечного состояния, нечеткая нейронная сеть, алгоритм Сугено.

**Введение.** В современной теории управления на первое место выдвигается терминальное управление, решающее задачу перевода системы из начального состояния в заданное конечное за фиксированное время. Примерами таких задач являются: управление пуском и торможением электродвигателей, позиционирование электропривода, управление форсировкой возбуждения генераторов. Особенность таких задач обусловлена нелинейностью объектов управления, связанной как с их структурой, так и с зависимостью параметров от режима работы, что существенно затрудняет разработку методов управления, число которых для нелинейных систем невелико.

Известный метод Батенко А.П. [1], представляющий собой один из методов решения обратной задачи динамики, основан на представлении решений в классе полиномов с неопределенными коэффициентами, для определения которых составляются и решаются уравнения на основе граничных условий на левом и правом концах интервала работы системы. Метод достаточно прост применительно к задачам малой размерности со скалярным управлением и одномерным выходом. В других случаях имеют место различные осложнения.

Особенностями линеаризационного метода [2] является широкая область применения, относительная простота подготовительной работы. Управляющие воздействия формируются в виде алгебраических выражений, что удобно для реализации. Однако управление линеаризационным методом удастся получить не всегда даже в случае полностью управляемой системы, и для реализации управления требуется существование производных уравнений системы высокого порядка.

В последнее время авторами для решения отмеченной задачи предложен метод конечного состояния [3]. Для получения управляющих воздействий на каждом шаге расчета процесса необходимо интегрировать совместно уравнения для матрицы весовых функций линеаризованной системы и однородные уравнения системы с начальными условиями, определяемыми текущим состоянием объекта. Метод достаточно надежен и универсален, однако затруднением в его применении для реализации управления в режиме реального времени являются большие вычислительные затраты.

**Постановка задачи.** Целью статьи является разработка методики применения нечетких нейронных сетей для аппроксимации управляющих воздействий, реализующих метод терминального управления нелинейным объектом при решении задачи управления в режиме реального времени.

**Методика исследования.** Выходные сигналы нейронных сетей представляют непрерывные функции, которые могут использоваться для аппроксимации произвольных непрерывных функций нескольких переменных. Наиболее подходящими структурами для аппроксимации являются многослойные, нечеткие нейронные сети. Особенностью этих сетей является возможность использования нечетких правил вывода для определения выходного сигнала. В отличие от классических нечетких систем в них вместо непосредственного расчета уровня активации конкретных правил вывода выполняется адаптивный подбор параметров фазификации.

Наиболее подходящей для целей аппроксимации среди нечетких систем адаптивного типа является система нечеткого вывода Сугено [4]. В этой системе дефазификатор на выходе не требуется, благодаря чему расчет выходных величин упрощается. Общая форма правил в данной системе представляется в виде (например, для  $j$ -го правила)

$$\text{Если } x_1 \in A_{1j} \text{ и } x_2 \in A_{2j} \text{ и } \dots \text{ и } x_n \in A_{nj}, \text{ то } y_j = p_{0j} + \sum_{i=1}^n p_{ij} x_i, \quad (1)$$

где  $A_{ij}, i=1, \dots, n, j=1, \dots, M$  – нечеткие множества (термы) для входных переменных;  $p_{0j}, p_{1j}, \dots, p_{nj}$  – настраиваемые весовые коэффициенты. При нескольких правилах выход определяется как их средневзвешенное

$$y = \sum_{j=1}^M w_j y_j \cdot \left( \sum_{j=1}^M w_j \right)^{-1}. \quad (2)$$

Веса  $w_j$  в последней формуле являются нелинейными параметрами функции  $y$  и получаются в результате агрегатирования условий правил, которое выполняется с использованием логического или алгебраического произведения.

Каждое условие правил (1) реализуется функцией принадлежности в виде обобщенной функции Гаусса отдельно по каждой переменной:

$$\mu_{Aij}(x_i) = \left( 1 + \left( \frac{x_i - c_i}{s_i} \right)^{2b_i} \right)^{-1}, \quad (3)$$

где коэффициент  $c_i$  указывает на центр функции, а коэффициенты  $b_i, s_i$  характеризуют ширину и остроту графика функции. С использованием выражения (3) веса  $w_i$  в (2) интерпретируются в виде алгебраического произведения

$$w_i = \prod_{i=1}^N \mu_{Aij}(x_i). \quad (4)$$

Настройка сети выполняется на основании массива обучающих данных в два этапа: на первом рассчитываются линейные коэффициенты  $p_{ij}$  в (1) путем решения системы уравнений при фиксированных параметрах функций принадлежности. На втором этапе после фиксации найденных линейных коэффициентов  $p_{ij}$  рассчитываются фактические выходные сигналы сети и вектор ошибки. После формирования градиента ошибки параметры функций принадлежности уточняются градиентным методом. Далее вновь рассчитываются линейные коэффициенты, и процесс повторяется до стабилизации всех параметров.

**Материалы исследования.** Для иллюстрации предлагаемой методики рассмотрим построение управления пуском серийного двигателя [3] с математическим описанием

$$ri + L \frac{di}{dt} + c_a \omega \Phi = u; J \frac{d\omega}{dt} + k\omega = c_m i \Phi; \Phi = \Phi(i) = a \cdot \arctg(bi) + ci \quad \left. \vphantom{\frac{di}{dt}} \right\}, \quad (5)$$

где  $r, L$  – сопротивление и индуктивность цепи якоря двигателя;  $c_a, c_m$  – постоянные;  $J$  – момент инерции вращающихся масс;  $k$  – коэффициент трения;  $i, \Phi$  – ток и магнитный поток двигателя;  $a, b, c$  – коэффициенты аппроксимации нелинейной характеристики магнитной цепи двигателя.

Поставим задачу вывода двигателя за заданное время из отключенного заторможенного состояния в стационарный режим, характеризующийся током  $i_f$  и скоростью  $\omega_f$ . Исключая третье уравнение из системы (5), приведем ее к виду, пригодному для непосредственного применения метода конечного состояния:

$$\left. \begin{aligned} \frac{di}{dt} &= \frac{1}{L} (-ri - c_a \omega (a \cdot \arctg(bi) + ci) + u); \\ \frac{d\omega}{dt} &= \frac{1}{J} (c_m i (a \cdot \arctg(bi) + ci) - k\omega) \end{aligned} \right\}. \quad (6)$$

Якобиан вектор-функции правой части (6) имеет вид

$$A = \begin{bmatrix} \frac{1}{L} \left( -r - c_a \omega \left( \frac{ab}{1 + (bi)^2} + c \right) \right) & -\frac{c_a}{L} (a \cdot \arctg(bi) + ci) \\ \frac{c_m}{J} \left( a \cdot \arctg(bi) + 2ci + \frac{iab}{1 + (bi)^2} \right) & -\frac{k}{J} \end{bmatrix};$$

функция критерия определяется выражением [3]  $J(t_f, t) = \left( \bar{i}(t_f, t) - i_f \right)^2 P_i + \left( \bar{\omega}(t_f, t) - \omega_f \right)^2 P_\omega$ , а управляющее напряжение представляется следующим образом:

$$u(t) = \frac{L}{2T} \cdot \frac{y_* - J(t_f, t)}{\left( \bar{i}(t_f, t) - i_f \right) P_i w_{11}(t_f, t) + \left( \bar{\omega}(t_f, t) - \omega_f \right) P_\omega w_{21}(t_f, t)}. \quad (7)$$

Последнее выражение показывает, что в каждый момент времени управляющее напряжение зависит от значений координат двигателя  $i(t)$ ,  $\omega(t)$ , так как эти значения являются начальными условиями при решении неуправляемой системы уравнений (6) при  $u = 0$  для  $\bar{i}(t_f, t)$  и  $\bar{\omega}(t_f, t)$ . Кроме того, от этих же переменных зависит матрица  $A$ , а следовательно, весовые функции  $w_{11}(t_f, t)$ ,  $w_{21}(t_f, t)$ .

Для определенности рассмотрим двигатель небольшой мощности с параметрами:  $r = 2 \text{ Ом}$ ;  $L = 0,3 \text{ Гн}$ ;  $c_a = 21$ ;  $c_m = 210$ ;  $k_m = 0,7$ ;  $J = 1,05 \text{ кг/м}^2$ . Двигатель необходимо разогнать до скорости  $\omega_f = 107 \text{ с}^{-1}$  за время  $t_f = 0,95 \text{ с}$ ; ток в этот момент должен принять значение  $8,66 \text{ А}$ . Далее это стационарный режим должен поддерживаться при напряжении  $110 \text{ В}$ . Введем ограничения на напряжение  $|u| \leq 500 \text{ В}$ . Коэффициенты аппроксимации магнитной характеристики:  $a = 0,038$ ,  $b = 0,115$ ,  $c = 0,00127$ . Весовые коэффициенты критерия выберем из необходимости в большей мере управлять скоростью двигателя:  $P_i = 0,2$ ,  $P_\omega = 20$ ; постоянную времени управления примем  $T = 0,016 \text{ с}$ ; желаемое значение критерия в конечный момент —  $J_f = 0$ .

Для настройки сети подсчитаем управляющее напряжение в узлах трехмерной сетки с координатами:  $t, c = [0 \ 0,1 \ 0,2 \ 0,3 \ 0,4 \ 0,5 \ 0,6]$ ;  $i, A = [0 \ 5 \ 10 \ 15 \ 20 \ 25 \ 30 \ 35]$ ;  $\omega, \text{с}^{-1} = [0 \ 20 \ 40 \ 60 \ 80 \ 100 \ 120]$ . Для каждой переменной выделим по два терма: «малое значение»  $L$  и «большое значение»  $H$  с функциями принадлежности вида (3). Эти функции содержат 18 настраиваемых параметров  $c_i, s_i, b_i, i = 1, \dots, 6$ . Систему правил представим, как возможные сочетания этих функций принадлежности:

- 1) Если  $t \in T_L$  и  $i \in I_L$  и  $\omega \in \Omega_L$ , то  $y_1 = p_{01} + p_{11}t + p_{21}i + p_{31}\omega$ ;
- 2) Если  $t \in T_L$  и  $i \in I_L$  и  $\omega \in \Omega_H$ , то  $y_2 = p_{02} + p_{12}t + p_{22}i + p_{32}\omega$ ;
- 3) Если  $t \in T_L$  и  $i \in I_H$  и  $\omega \in \Omega_L$ , то  $y_3 = p_{03} + p_{13}t + p_{23}i + p_{33}\omega$ ;
- 4) Если  $t \in T_L$  и  $i \in I_H$  и  $\omega \in \Omega_H$ , то  $y_4 = p_{04} + p_{14}t + p_{24}i + p_{34}\omega$ ;
- 5) Если  $t \in T_H$  и  $i \in I_L$  и  $\omega \in \Omega_L$ , то  $y_5 = p_{05} + p_{15}t + p_{25}i + p_{35}\omega$ ;
- 6) Если  $t \in T_H$  и  $i \in I_L$  и  $\omega \in \Omega_H$ , то  $y_6 = p_{06} + p_{16}t + p_{26}i + p_{36}\omega$ ;
- 7) Если  $t \in T_H$  и  $i \in I_H$  и  $\omega \in \Omega_L$ , то  $y_7 = p_{07} + p_{17}t + p_{27}i + p_{37}\omega$ ;
- 8) Если  $t \in T_H$  и  $i \in I_H$  и  $\omega \in \Omega_H$ , то  $y_8 = p_{08} + p_{18}t + p_{28}i + p_{38}\omega$ .

Настраиваемыми параметрами являются коэффициенты  $p_{0i}, p_{1i}, p_{2i}, p_{3i}, i = 1, \dots, 8$ . Весовые коэффициенты правил  $w_j$  определяются из выражения (4):

$$\begin{aligned} w_1 &= \mu_{TL}(t) \cdot \mu_{IL}(i) \cdot \mu_{\Omega L}(\omega); \quad w_2 = \mu_{TL}(t) \cdot \mu_{IL}(i) \cdot \mu_{\Omega H}(\omega); \\ w_3 &= \mu_{TL}(t) \cdot \mu_{IH}(i) \cdot \mu_{\Omega L}(\omega); \quad w_4 = \mu_{TL}(t) \cdot \mu_{IH}(i) \cdot \mu_{\Omega H}(\omega); \\ w_5 &= \mu_{TH}(t) \cdot \mu_{IL}(i) \cdot \mu_{\Omega L}(\omega); \quad w_6 = \mu_{TH}(t) \cdot \mu_{IL}(i) \cdot \mu_{\Omega H}(\omega); \\ w_7 &= \mu_{TH}(t) \cdot \mu_{IH}(i) \cdot \mu_{\Omega L}(\omega); \quad w_8 = \mu_{TH}(t) \cdot \mu_{IH}(i) \cdot \mu_{\Omega H}(\omega). \end{aligned}$$

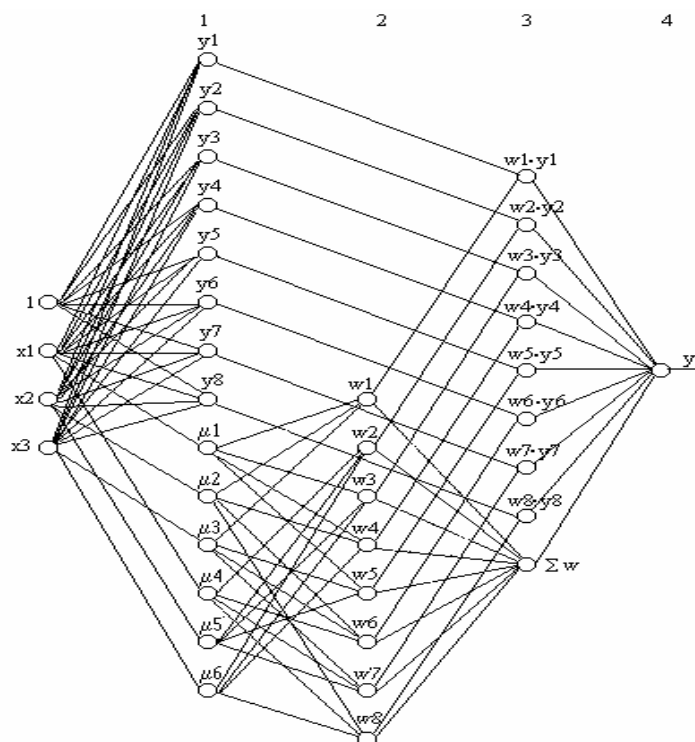


Рисунок 1 – Нейронная сеть для аппроксимации управляющего напряжения

Выходной сигнал нейронной сети вычисляется по выражению (2). В каждом узле сетки по выражению (7) вычисляется управляющее напряжение и выходной сигнал сети. Общая ошибка сети вычисляется как сумма модулей ошибок по всем узлам сетки. Структура предлагаемой нейронной сети изображена на рисунке 1. Сеть состоит из четырех слоев, из которых настраиваемые нейроны содержит лишь первый из них. Первые восемь нейронов первого слоя вычисляют значения переменных  $y_1, \dots, y_8$  и имеют по четыре настраиваемых параметра  $p_{0i}, p_{1i}, p_{2i}, p_{3i}, i=1, \dots, 8$ . Остальные шесть нейронов вычисляют значения функций принадлежности и имеют по три настраиваемых параметра:  $c_i, s_i, b_i, i=1, \dots, 6$ . Восемь нейронов второго слоя на основании логической конъюнкции (алгебраического умножения) определяют выходные переменные предпосылок правил  $w_1, \dots, w_8$ . Первые восемь нейронов третьего слоя вычисляют произведения  $w_i y_i$ , а последний нейрон этого слоя подсчитывает сумму всех  $w_i, i=1, \dots, 8$ . Единственный нейрон последнего, (четвертого слоя) определяет четкое значение выходной переменной в соответствии с выражением (2). После настройки сети ошибка составила  $\varepsilon = 1,06 \cdot 10^{-4}$ , что дает в среднем 27 В на узел (24% от номинального напряжения).

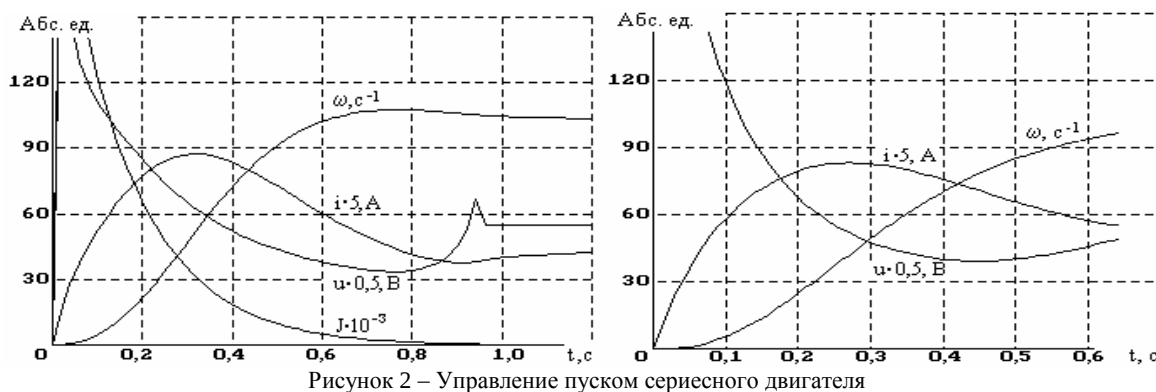


Рисунок 2 – Управление пуском серийного двигателя

На рисунке 2 слева изображен переходный процесс пуска двигателя с нулевых начальных условий, рассчитанный с помощью метода конечного состояния по выражению (7), а справа – тот же

процесс в течение первых 0,6 с при управлении, вырабатываемом нейронной сетью. Для наглядности на этих рисунках ток изображен увеличенным в 5 раз, а напряжение – уменьшенным в 2 раза.

Диаграммы на рисунке 2 показывают, что графики управляющего напряжения отличаются в среднем на 25...28 В, а отличие в графиках тока и скорости составляет 9...12%. Очевидно, для получения большей точности следует выбирать больше термов для каждой переменной и увеличивать количество правил.

**Вывод.** В статье предложена перспективная методика применения нечетких нейронных сетей для реализации метода терминального управления электропривода в режиме реального времени. Достоинством метода является возможность управлять приводом в функции текущих значений координат и времени с запаздыванием, определяемым только тактом опроса датчиков тока и скорости. Задачей дальнейших исследований является разработка устройства управления, которая возможна на базе микроконтроллера AT90S4433A в качестве регулятора и полупроводникового преобразователя в качестве исполнительного устройства.

#### **Бibliографический список**

1. Батенко А.П. Системы терминального управления / А.П. Батенко. — М.: Радио и связь, 1984. — 160 с.
2. Isidori A. Nonlinear Control Systems. 3<sup>rd</sup> E // A. Isidori. — N.Y.: Springer Verlag, 1995. — P. 13 – 28.
3. Шушляпин Е.А. Синтез терминального управления электромеханическими системами методом конечного состояния / Е.А.Шушляпин, Л.Н.Канов // Известия ВУЗов. Сер. Электромеханика. — 2000. — № 1. — С. 72 – 75.
4. Осовский С. Нейронные сети для обработки информации / С. Осовский. — М.: Финансы и статистика, 2004. — 344 с.
5. Канов Л.Н. Управление электроприводом постоянного тока на основе нечетких нейронных сетей: матер. XIV міжнар. конф. з автоматичного управління (Автоматика – 2007), м. Севастополь, 10 – 14 вересня 2007 р. — Севастополь: Вид-во СКУАЭП, 2007. — Ч. 1. — С. 74 – 75.

*Поступила в редакцию 10.05.10 г.*