

УДК 004.032.26 (06)

В. М. Б у я н к и н

АНАЛИЗ ВЛИЯНИЯ ЧИСЛА СЛОЕВ НЕЙРОННОЙ СЕТИ НА УСТОЙЧИВОСТЬ ЗАМКНУТЫХ СИСТЕМ НЕЙРОУПРАВЛЕНИЯ ЭЛЕКТРОПРИВОДОМ

Рассмотрено влияние числа слоев нейронной сети на устойчивость замкнутых систем нейрорегулирования электроприводом. Показано, что увеличение числа слоев нейронов в нейрорегуляторе приводит к ухудшению устойчивости работы электропривода и при разработке нейрорегуляторов следует стремиться к двухслойным нейронным сетям.

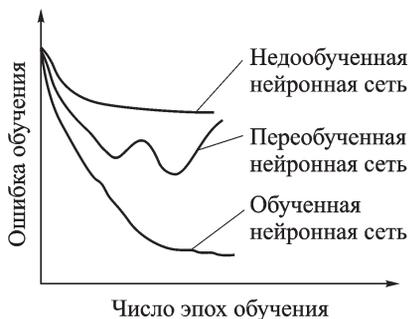
E-mail: press@bmstu.ru

Ключевые слова: *нейронная сеть, нейрорегулирование, устойчивость, электропривод.*

Существующие стандартные регуляторы, используемые в электроприводах: интегральном (И), интегрально-пропорциональном (ИП), интегрально-пропорциональном дифференциальном (ИПД), которые применяются благодаря простоте своей структуры и высокой надежности, однако они не могут оперативно самообучаться и перестраиваться при изменении нелинейных параметров объектов управления и внешних возмущающих воздействий. Поэтому вместо таких регуляторов с жесткой структурой актуально использование нейрорегуляторов, выполненных на базе нейропроцессоров, которые легко перестраиваются и переобучаются, изменяя свои коэффициенты, приспособиваясь к внешней окружающей среде. Однако при включении нейронных сетей в контуры управления электроприводом возникла необходимость в анализе устойчивости таких систем [1, 2]. Проблема устойчивости систем нейрорегулирования ставила в тупик первых исследователей. Сложно было предсказать, какие из нейронных сетей, состоящих из набора нейронов, связанных между собой, будут устойчивы. Нейроны могут объединяться в сети различными способами, число слоев может быть неограниченным, их определение представляет собой серьезную математическую проблему, основанную на использовании свойств аппроксимируемой функции.

Многослойная сеть может формировать на выходе произвольную многомерную функцию при соответствующем выборе числа слоев, диапазона изменения сигналов и параметров нейронов [3].

Рис. 1. Ошибка обучения нейронной сети



Если в сети слишком мало нейронов или слоев, то нейронная сеть не обучится и ошибка при работе сети останется большой (рис. 1), на выходе сети не будут передаваться резкие колебания аппроксимируемой функции.

Если нейронов или слоев слишком много, то быстродействие будет низким, увеличится объем памяти, нейронная сеть переобучится — выходной вектор будет передавать незначительные и несущественные детали в изучаемой зависимости, например шум или ошибочные данные; зависимость выхода от входа окажется резко нелинейной: выходной вектор будет существенно и непредсказуемо меняться при малом изменении входного вектора; нейронная сеть будет неспособна к обобщению — в области, где нет или мало известных точек, выходной вектор будет случайным и непредсказуемым, не будет адекватным решаемой задаче.

Для проведения расчета масс и смещений каждого слоя нейронной сети требуется время, и чем больше слоев, тем более длительным становится период квантования по времени. При этом в зависимости от параметров квантования частотные характеристики нейронных сетей, нейрорегуляторов оказывают решающее влияние на устойчивость и показатели качества процессов управления. Выполнение программ при нейроуправлении электроприводом в реальном масштабе времени приводит к возникновению временной задержки, что эквивалентно появлению сомножителя e^{-T_p} , где T — период квантования по времени.

Проведем анализ влияния числа слоев нейронных сетей на устойчивость замкнутых систем нейроуправления электроприводом. На рис. 2 изображена функциональная схема электропривода с многослойным нейрорегулятором $NET(D_{kv}(z, m_{\text{число слоев}}))$, работа которого описывается следующей системой уравнений:

$$X_1 = X_0 Z^{-1},$$

— входной сигнал нейронной сети, задержанный на 1 такт;

$$Y_1 = Y_0 Z^{-1},$$

— выходной сигнал нейронной сети, задержанный на 1 такт;

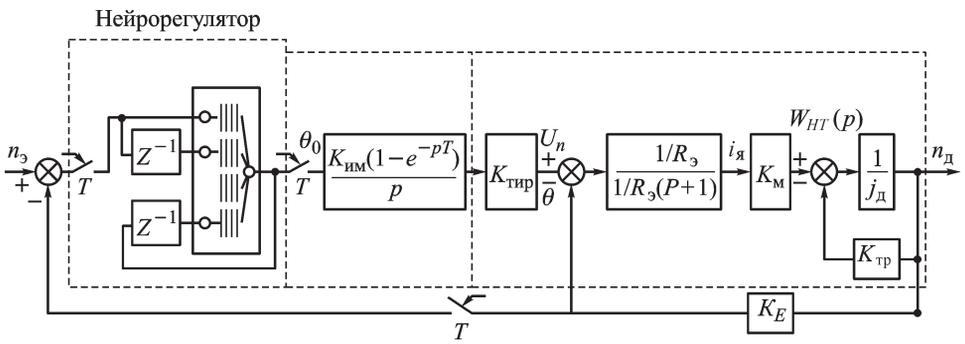


Рис. 2. Структурная схема электропривода с многослойным нейрорегулятором

$$\left. \begin{aligned} E_1^* &= X_0 W_{11}^* + X_1 W_{12}^* + Y_1 W_{13}^* + B_1^* \\ E_2^* &= X_0 W_{21}^* + X_1 W_{22}^* + Y_1 W_{23}^* + B_2^* \\ &\dots \\ E_5^* &= X_0 W_{51}^* + X_1 W_{52}^* + Y_1 W_{53}^* + B_5^* \\ R_1^* &= \text{pureline}(E_1^*), \\ &\dots \\ R_5^* &= \text{pureline}(E_5^*), \end{aligned} \right\}$$

– уравнения 1-го выходного слоя нейронов;

$$\left. \begin{aligned} E_1^{**} &= X_0^{**} W_{11}^{**} + X_1^{**} W_{12}^{**} + Y_1^{**} W_{13}^{**} + B_1^{**} \\ E_2^{**} &= X_0^{**} W_{21}^{**} + X_1^{**} W_{22}^{**} + Y_1^{**} W_{23}^{**} + B_2^{**} \\ &\dots \\ E_5^{**} &= X_0^{**} W_{51}^{**} + X_1^{**} W_{52}^{**} + Y_1^{**} W_{53}^{**} + B_5^{**} \\ R_1^{**} &= \text{pureline}(E_1^{**}), \\ &\dots \\ R_5^{**} &= \text{pureline}(E_5^{**}), \end{aligned} \right\}$$

– уравнения 2-го выходного слоя нейронов;

$$\left. \begin{aligned} E_1^{***} &= X_0^{***} W_{11}^{***} + X_1^{***} W_{12}^{***} + Y_1^{***} W_{13}^{***} + B_1^{***} \\ E_2^{***} &= X_0^{***} W_{21}^{***} + X_1^{***} W_{22}^{***} + Y_1^{***} W_{23}^{***} + B_2^{***} \\ &\dots \\ E_5^{***} &= X_0^{***} W_{51}^{***} + X_1^{***} W_{52}^{***} + Y_1^{***} W_{53}^{***} + B_5^{***} \\ R_1^{***} &= \text{pureline}(E_1^{***}), \\ &\dots \\ R_5^{***} &= \text{pureline}(E_5^{***}), \end{aligned} \right\}$$

– уравнения 3-го выходного слоя нейронов;

$$\left. \begin{aligned} Y_0' &= R_1^{****} W_1' + \dots + R_5^{****} W_5' + B_1' \\ Y_0 &= \text{pureline} Y_0' \end{aligned} \right\}$$

– уравнения 4-го выходного слоя нейронов.

Работа остальных элементов электропривода описывается следующей системой уравнений:

$$\varepsilon_s - n_d = \varepsilon_v$$

— уравнение ошибки регулирования в скоростном контуре электропривода;

$$\varepsilon_v NET(D_{kv}(z, m_{\text{число слов}})) = \theta_0$$

— уравнение многослойного нейрорегулятора;

$$\theta_{0*} H(p) = \theta$$

— уравнение формирующего элемента;

$$U_T = K_{\text{тип}} \theta$$

— уравнение силового преобразователя;

$$L_\Delta p i_\Delta + i_\Delta R_\Delta = E_{\text{пр}}$$

— уравнение электрической части электродвигателя;

$$J_d n_\Delta p + M_{\text{тр}} = M_{\text{дв}}; E_{\text{пр}} = K_E n_d; M_{\text{тр}} = K_{\text{тр}} n_d; M_{\text{дв}} = K_M i_\Delta$$

— уравнения механической части электродвигателя, где n_Δ — заданная частота вращения электродвигателя; ε_v — ошибка регулирования в скоростном контуре электропривода; $NET(D_{kv})$ — передаточная функция многослойного нейрорегулятора; θ_0 — значение на выходе нейрорегулятора; $H(p)$ — передаточная функция формирующего элемента; U_T — напряжение на выходе силового преобразователя; i_Δ — ток якоря в цепи электродвигателя; $E_{\text{пр}}$ — ЭДС электродвигателя; $M_{\text{тр}}$ — момент трения; $M_{\text{дв}}$ — вращающий момент.

В качестве примера возьмем данные электродвигателя ПБСТ-22 ($P = 0,6$ кВт, $U_T = 110$ В, $i_\Delta = 7$ А); $L_\Delta = 3,1 \cdot 10^{-2}$ Гн — эквивалентная суммарная индуктивность якорной цепи; $R_\Delta = 3,5$ Ом — эквивалентное сопротивление якорной цепи; $K_E = 8 \cdot 10^{-1}$ В·с/рад — коэффициент ЭДС; $K_M = 9 \cdot 10^{-1}$ Н·м/А — коэффициент момента; $K_{\text{тип}} = 1,1$ В·с/рад — коэффициент передачи силового преобразователя; $J_d = 8 \cdot 10^{-2}$ кг·м² — суммарный момент инерции электродвигателя, приведенный к валу; $K_{\text{тр}} = 1,43 \cdot 10^{-3}$ кг·м²/с — коэффициент вязкого трения на валу электродвигателя.

Цифровой сигнал ошибки $\varepsilon_v[nT]$ вычисляется в нейрорегуляторе. С выхода нейрорегулятора решетчатый цифровой сигнал $\theta_0[nT]$ поступает на выход идеального импульсного элемента и превращается в сигнал:

$$\theta_0^*[nT] = \theta(t) \delta(t - nT) = \theta(t) \sigma_T(t),$$

где $n = 0, 1, 2, \dots$; $\sigma_T(t)$ — δ -функция.

Далее сигнал $\theta_0^*[nT]$ поступает на формирующий элемент, представляющий собой экстраполятор нулевого порядка с передаточной

функцией

$$H(p) = K_{\text{им}} \frac{1 - e^{-pT}}{p},$$

где $K_{\text{им}} = 1$ — коэффициент усиления импульсного элемента.

Ключи на структурной схеме (см. рис. 2) иллюстрируют дискретность по времени. Последовательное соединение формирующего элемента и непрерывной части силового преобразователя и электродвигателя образует так называемую приведенную непрерывную часть электропривода, передаточная функция которой имеет вид

$$W_{HT}(p) = \frac{K_1}{Ap^2 + Bp + C}, \quad (1)$$

где $K_1 = K_M \cdot K_{\text{тип}} = 8,8 \cdot 10^{-1} \text{ кг} \cdot \text{м}^2 \cdot \text{Ом}/(\text{с}/\text{рад})$; $A = L_3 J = 2,5 \cdot 10^{-3} \text{ Ом} \cdot \text{с} \cdot \text{кг} \cdot \text{м}^2$; $B = JR_3 + K_{\text{тр}} L_3 = 2,8 \cdot 10^{-1} \text{ кг} \cdot \text{м}^2 \cdot \text{Ом}$; $C = K_{\text{тр}} R_3 + K_E K_M = 6,4 \cdot 10^{-1} \text{ Ом} \cdot \text{кг} \cdot \text{м}^2/(\text{рад}/\text{с})$.

Подставляя K_1, A, B, C в функцию (1), получаем:

$$W_{HT}(p) = \frac{K_1}{T_{01} p^2 + 2\xi_{01} T_{01} p + C}, \quad (2)$$

где $T_{01} = \sqrt{\frac{A}{C}}$; $\xi_{01} = \frac{B}{2C} \sqrt{\frac{C}{A}}$.

С помощью Z -преобразования Лапласа находим передаточную функцию электропривода в разомкнутом режиме:

$$W_H(z) = NET(D_{kv}(z, m_{\text{число слоев}})) Z\{H(p)W_{HT}(p)\}.$$

Для определения передаточной функции $W_{HT}(z)$ в частотной области выполним подстановку

$$z = \frac{1 + \frac{T}{2}\omega}{1 - \frac{T}{2}\omega}.$$

Для различного числа слоев нейронов нейрорегулятора, используя данные электропривода, получаем следующие передаточные функции:

$$W_{H3}(\omega, 0) = 1,5 \cdot 10^2 \frac{1 + 4 \cdot 10^{-2} \omega}{\omega} \cdot 8,8 \cdot 10^{-1} \frac{[1 + 2 \cdot 3,5 \cdot 10^{-3} \omega - (3,5 \cdot 10^{-3})^2 \omega^2]}{[1 + 2 \cdot 1,4 \cdot 10^{-2} \omega + (1,4 \cdot 10^{-2})^2 \omega^2]},$$

— для четырехслойного нейрорегулятора ($m = 4$);

$$W_{H2}(\omega, 0) = 7,5 \cdot 10^1 \frac{1 + 7 \cdot 10^{-2} \omega}{\omega} \cdot 8,8 \cdot 10^{-1} \frac{[1 + 2 \cdot 0,7 \cdot 10^{-3} \omega - (7 \cdot 10^{-3})^2 \omega^2]}{[1 + 2 \cdot 2,7 \cdot 10^{-2} \omega + (2,7 \cdot 10^{-2})^2 \omega^2]}$$

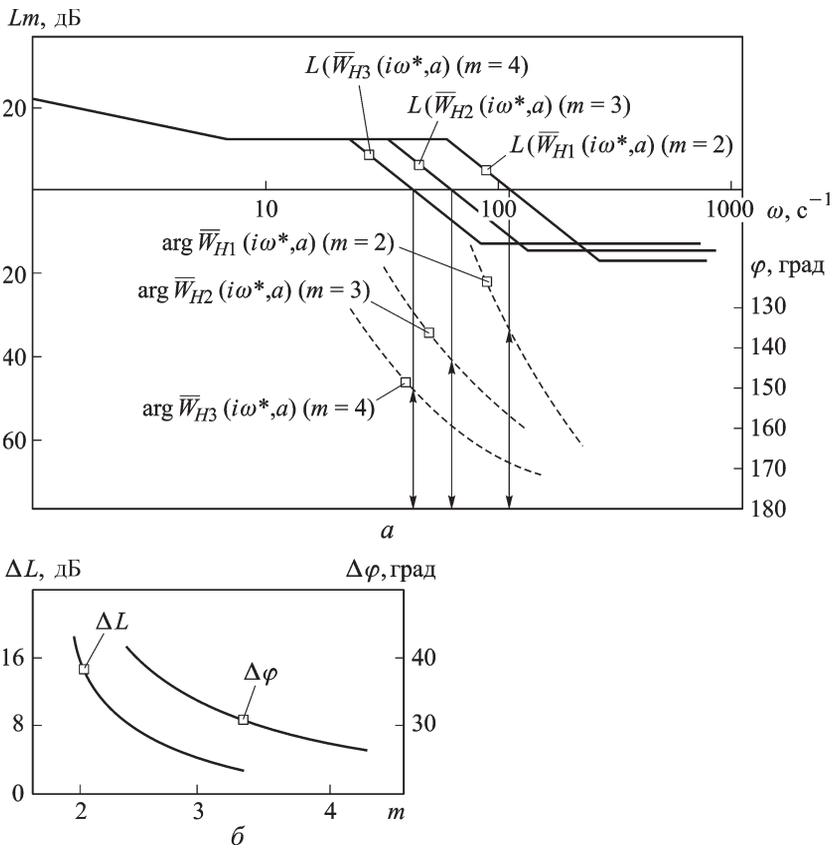


Рис. 3. ЛАЧХ и ФЧХ (а) и запасы устойчивости по амплитуде и фазе на ЛАЧХ и ФЧХ (б) разомкнутого электропривода с различным числом слоев в нейрорегуляторе

— для трехслойного нейрорегулятора ($m = 3$);

$$W_{H1}(\omega, 0) =$$

$$= 3,8 \cdot 10^1 \frac{1 + 10^{-3}\omega}{\omega} \cdot 8,8 \cdot 10^{-1} \frac{[1 + 2 \cdot 10^{-2}\omega - (10^{-2})^2\omega^2]}{[1 + 2 \cdot 3,5 \cdot 10^{-2}\omega + (3,5 \cdot 10^{-2})^2\omega^2]}$$

— для двухслойного нейрорегулятора ($m = 2$).

На рис. 3, а приведены ЛАЧХ и ФЧХ разомкнутого электропривода с различным числом слоев в нейрорегуляторе. Из рис. 3, б следует, что запас устойчивости по амплитуде и по фазе $\Delta\varphi_1$, $\Delta\varphi_2$, $\Delta\varphi_3$ с увеличением числа слоев m нейрорегулятора уменьшается, что приводит к ухудшению динамических характеристик электропривода.

На рис. 4 приведены решетчатые функции $n_d[nT]$ при ступенчатом воздействии $n_3[nT]$, показаны переходные процессы работы электропривода с различным числом слоев нейронов нейрорегулятора.

Анализируя рис. 4, можно сделать вывод, что увеличение числа слоев нейронов в нейрорегуляторе приводит к ухудшению устойчи-

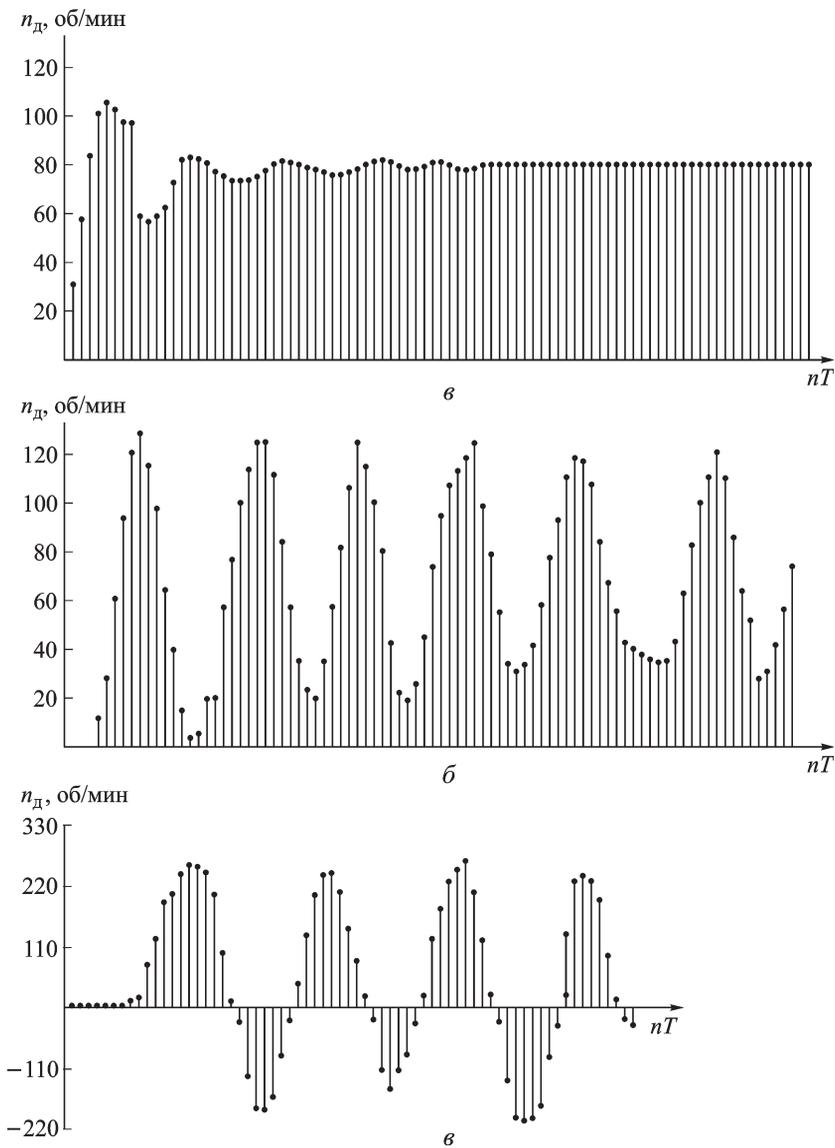


Рис. 4. Переходные процессы электропривода с двух- (а), трех- (б) и четырех- (в) нейрорегулятором

ности работы электропривода и что при разработке нейрорегуляторов следует стремиться к двухслойным нейронным сетям.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Г а л у ш к и н А. И. Теория нейронных сетей: Т. 1. – М.: ИПРЖ, 2002.
2. П у п к о в К. А. Методы робастного нейро-нечеткого и адаптивного управления. – М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2002.
3. С и г е р у О м а т у. Нейроуправление и его приложения: Кн. 2 / Пер. с англ. Н.В. Батина; под ред. А.И. Галушкина, В.А. Птичкина. – М.:ИПРЖ, 2000.

Статья поступила в редакцию 16.12.2008

Виктор Михайлович Буянкин родился в 1951 г., окончил в 1977 г. МВТУ им. Н.Э. Баумана. Канд. техн. наук, доцент кафедры “Электротехника и промышленная электроника” МГТУ им. Н.Э. Баумана. Автор 50 научных работ в области электротехники и промышленной электроники.

V.M. Buyankin (b. 1951) graduated from the Bauman Moscow Higher Technical School in 1977. Ph.D. (Eng.) assoc. professor of “Electrical Engineering and Industrial Electronics” department of the Bauman Moscow State Technical University. Author of 50 publications in the field of electrical engineering and industrial electronics.



Вниманию авторов и читателей журнала “Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана”

Начиная с 2009 г. полнотекстовые электронные версии журнала размещаются в сети Интернет на сайте Российской электронной библиотеки <http://elibrary.ru>. С содержанием и рефератами статей текущих выпусков журнала можно ознакомиться на сайте издательства МГТУ им. Н.Э. Баумана <http://www.press.bmstu.ru/vestnik.htm>.