



Юрий Иванович Димитриенко родился в 1962 г., окончил в 1984 г. МГУ им. М.В. Ломоносова. Д-р физ.-мат. наук, профессор, зав. кафедрой “Вычислительная математика и математическая физика” МГТУ им. Н.Э. Баумана, действительный член академии инженерных наук. Автор более 100 научных работ в области вычислительной механики, нелинейного тензорного анализа, термомеханики композитов, математического моделирования в материаловедении.

Yu.I. Dimitrienko (b. 1962) graduated from Lomonosov Moscow State University in 1984. D. Sc. (Phys.-Math.), professor, head of "Computing Mathematics and Mathematical Physics" department of the Bauman Moscow State Technical University, full member of the Russian Academy of Engineering Sciences. Author of more than 100 publications in the field of computing mechanics, nonlinear tensor analysis, thermomechanics of composites, mathematical simulation in science of materials.



Андрей Алексеевич Захаров родился в 1982 г., окончил в 2005 г. МГТУ им. Н.Э. Баумана. Аспирант кафедры “Вычислительная математика и математическая физика” МГТУ им. Н.Э. Баумана. Автор ряда научных работ по численным методам решения задач газовой динамики.

A.A. Zakharov (1982) graduated from the Bauman Moscow State Technical University in 2005. Post-graduate of “Computing Mathematics and Mathematical Physics” department of the Bauman Moscow State Technical University. Author of some publications in the field of numerical methods to solve problems of gas dynamics.

---

УДК 621.914

В. М. Б у я н к и н

## **ИНТЕГРАЛЬНЫЙ ПРОПОРЦИОНАЛЬНЫЙ ДИФФЕРЕНЦИАЛЬНЫЙ НЕЙРОРЕГУЛЯТОР**

*Рассмотрен интегральный пропорциональный дифференциальный нейрорегулятор, предназначенный для интеллектуального управления электроприводами.*

Интегральный пропорциональный дифференциальный регулятор используется во многих отраслях промышленности. Регуляторы такого типа производятся различными фирмами и признаны стандартным продуктом для массового производства.

ИПД регуляторы обеспечивают устойчивость и необходимые запасы по фазе в процессе работы большинства систем управления с

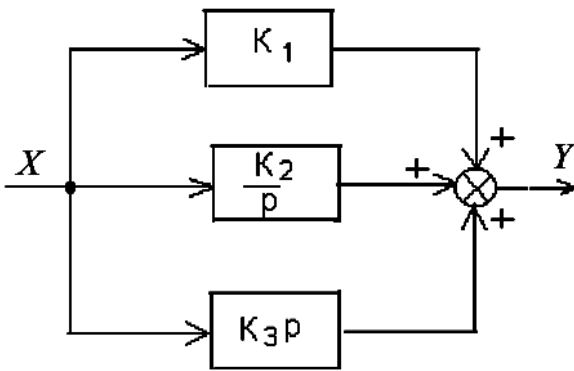


Рис. 1. Схема непрерывного ИПД регулятора

замкнутыми контурами. Но так как большинство объектов управления, как например электроприводы, имеет нелинейные характеристики с изменяющимися параметрами, возникает задача самонастройки и самообучения ИПД регуляторов. Эту задачу легко можно решить с использованием искусственных нейронных сетей, которые способны к обучению, имеют высокую отказоустойчивость и вычислительную мощность за счет параллельной работы отдельных нейронов [1].

Включение в контур управления электроприводами нейронных сетей приводит к замене обычных непрерывных регуляторов ИПД нейрорегуляторами; в данной статье приводятся результаты разработки и исследования ИПД нейрорегулятора.

Рассмотрим непрерывный ИПД регулятор, схема которого приведена на рис. 1

Передаточные функции непрерывного ИПД регулятора имеют вид

$$\frac{X(p)}{p} = K_1 + \frac{K_2}{p} + K_3 p, \quad Y(p)p = x(p)(K_1 p + K_2 + K_3 p^2), \quad (1)$$

где  $K_1$  — коэффициент пропорциональной составляющей;  $K_2$  — коэффициент интегральной составляющей;  $K_3$  — коэффициент дифференциальной составляющей.

Для цифровых электроприводов, которые по своей природе — дискретные и импульсные, ИПД регулятор необходимо представить в виде разностного уравнения с использованием  $z$ -преобразования с учетом дискретности по времени:

$$\begin{aligned} \frac{Y(k) - Y(k-1)}{T_s} &= \frac{K_1(X(k) - X(k-1))}{T_s} = \\ &= K_2 X(k) + \frac{K_3(X(k) - 2X(k-1) + X(k-2))}{T_s^2}, \end{aligned} \quad (2)$$

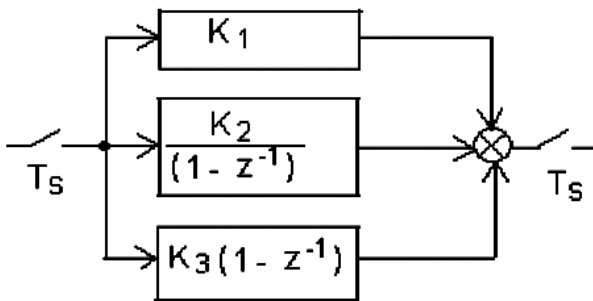


Рис. 2. Схема дискретного ИПД регулятора

$$Y(z) = Y(z)z^{-1}, \quad X(z) = (B_1 - B_2z^{-1} + B_3z^{-2}), \quad (3)$$

где  $B_1 = \left( K_1 + K_2T_s + \frac{K_3}{T_s} \right)$ ;  $B_2 = \left( K_1 + \frac{2K_3}{T_s} \right) / T_s$ ;  $B_3 = \frac{K_3}{T_s^2}$ .

Схема дискретного ИПД регулятора в  $z$ -преобразованном виде приведена на рис. 2.

На рис. 3 приведены результаты цифрового моделирования дискретного ИПД регулятора в системе MATLAB с использованием управляющей программы IPD1, которая осуществляет ввод начальных условий и данных, запуск на выполнение M-файла и вывод на экран результатов в графической форме для случая линейного нарастающего сигнала.

Для разработки ИПД нейрорегулятора выберем многослойную нейронную сеть NEWFF с прямой передачей сигнала и обратным рас-

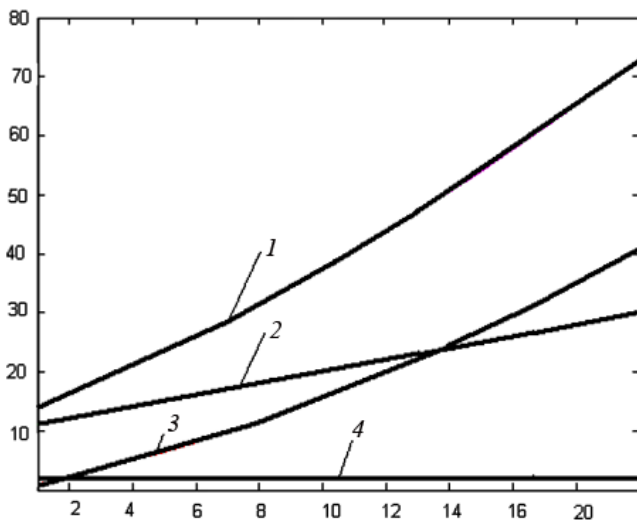


Рис. 3. Результаты цифрового моделирования дискретного ИПД:

1 – график интегральной дифференциальной пропорциональной составляющей; 2 – график пропорциональной составляющей; 3 – график интегральной составляющей; 4 – график дифференциальной составляющей

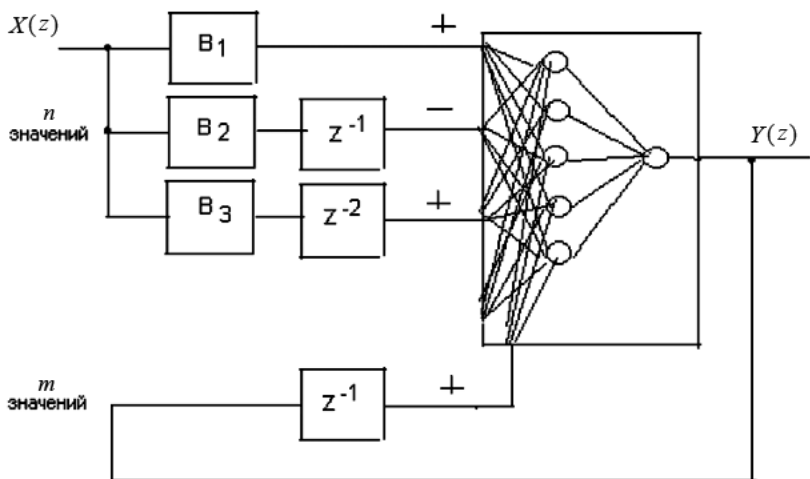


Рис. 4. Схема многослойной нейронной сети NEWFF

пространением ошибки, схема которой приведена на рис. 4. Элемент  $z$  осуществляет задержку сигнала на  $j$  шагов. На входы нейронной сети подается  $n$  значений сигнала  $X(z)$  и  $m$  значений сигнала с выхода  $Y(z)$ . Величины  $n$  и  $m$  определяются порядком дифференциального уравнения, которое описывает работу ИПД регулятора.

Нейронная сеть содержит в первом входном слое 5 нейронов с функцией активации *tansig* и один нейрон на выходе с функцией активации *pureline*.

На рис. 5 показана схема обучения нейронной сети, при котором минимизируется ошибка предсказания

$$E = Y_1 - Y_2, \quad (4)$$

где  $Y_1$  — выходной сигнал дискретного ИПД регулятора;  $Y_2$  — выходной сигнал нейронной сети.

Процедура обучения нейронной сети — нейрорегулятора заключается в настройке весовых коэффициентов и параметров нейронов. Настройка производится на основании информации о сигнале ошибки  $E$  между выходом дискретного ИПД регулятора и нейронной сети.

Нейронная сеть обучалась в течении 250 циклов, характеристика точности обучения показана на рис. 6; установившаяся среднеквадратичная ошибка составляет  $\sim 24,34$ .

На рис. 7 приведены графики переходных процессов при реакции на ступенчатое входное воздействие дискретного ИПД регулятора и обученного нейрорегулятора, из которых видно, что переходной процесс дискретного ИПД регулятора хорошо совпадает с переходным процессом нейрорегулятора.

Таким образом разработанный ИПД нейрорегулятор может использоваться для интеллектуального управления электроприводами. ИПД

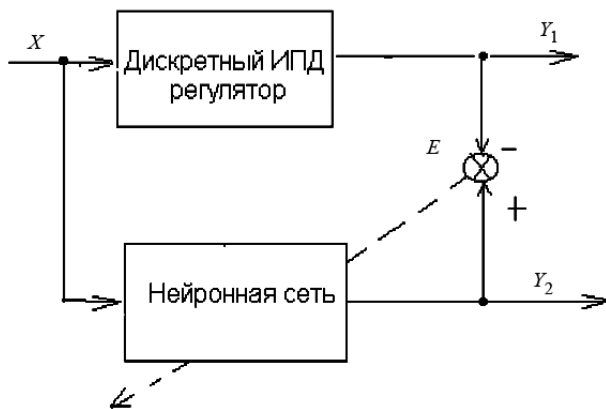


Рис. 5. Схема обучения нейронной сети

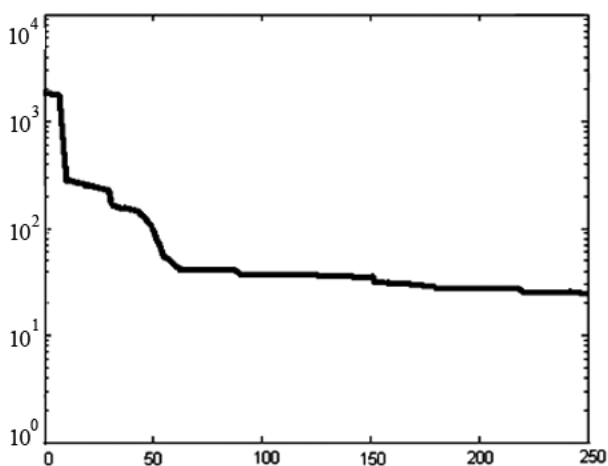


Рис. 6. Характеристика точности обучения

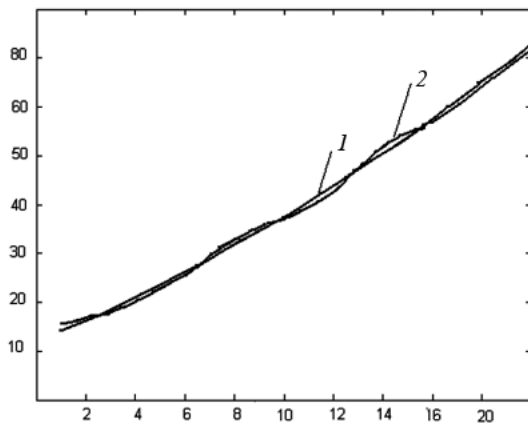


Рис. 7. Графики переходных процессов:

1 – переходной процесс ИПД регулятора; 2 – переходной процесс нейрорегулятора

нейрорегулятор — это программный продукт и поэтому легко может быть встроен практически в любую цифровую систему управления.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Г а л у ш к и н А. И. Теория нейронных сетей. Серия “Нейрокомпьютеры и их применение”. Т. 1. – М.: ИПРЖР, 2002.
2. Д ь я к о н о в В. П. MATLAB 6/6.1/ 6.5 + Simulink 4/5 в математике и моделировании. Полное руководство пользователя. – М.: СОЛОН-Пресс.
3. Дэбни Дж. Simulink 4. Секреты мастерства / Пер. с англ. – М.: БИНОМ. Лаборатория знаний, 2003.
4. Г е р м а н - Г а л к и н С. Г. Компьютерное моделирование полупроводниковых систем в MATLAB 6.0: Учеб. пособие. – СПб.: КОРОНА-принт, 2001.
5. Лазарев Ю. Моделирование процессов и систем в MATLAB: Учеб. курс. –СПб: Питер; Киев: Изд-во ВНУ, 2005.
6. С и г е р у О м а т у, М а р з у к и Х а л и д, Р у б и я Ю с о ф. Нейроуправление и его приложения. Кн. 2. Пер. с англ. / Под ред. А.И. Галушкина, В.А. Птичкина. – М.:ИПРЖ, 2000.
7. К р у г л о в В. В., Б о р и с о в В. В. Искусственные нейронные сети. Теория и Практика. -2-е изд., стереотип. – М.: Горячая линия–Телеком, 2002.
8. К а л л а н, Р о б е р т. Основные концепции нейронных сетей / Пер. с англ. – М.: Издательский дом “Вильямс”, 2003.
9. Б у я н к и н В. М. Теоретические исследования цифрового электропривода. <http://www.privodi.narod.ru>. – 2002.
10. Б у я н к и н В. М. Р у с а к о в В. М. Исследование статической и динамической точности микропроцессорного электропривода // Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Серия “Приборостроение”. – 2002. – № 4. – С. 109–120.
11. Б у я н к и н В. М. Р у с а к о в В. М. Влияние внешних возмущающих воздействий на точность микропроцессорного электропривода / Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Серия “Приборостроение”. – 2004. – № 1. – С.73–80.
12. Б у я н к и н В. М. Р у с а к о в В. М. Анализ влияния дискретности по времени на устойчивость работы микропроцессорного электропривода. Современные естественно-научные и гуманитарные проблемы: Сб. трудов. - М.: Логос, 2005.

Статья поступила в редакцию 11.05.2005

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.

