3. Буянкин В. М., Семенов, В. С. Система нейрорегулирования с нейродиагностикой токового контура электропривода // Известия вузов. Машиностроение. — 2007. — №12. — С. 32—36.
4. Буянкин, В. М. Нейроидентификация, нейрорегулирование, нейропрогнозирование статических и динамических характеристик электропривода // Вестник компьютерных и информационных технологий. — 2010. — №5. — С. 24—29.
4. V Buyankin. Neuroprotection and Timely Troubleshooting of Electrive Drive Equipment. Advances in Systems Science and Applications, [s.l.], v.18, n / 1, p. 132-141, may 2018. ISSN 1078-6236. Available at: <http://ijassa.ipu.ru/ojs/ijassa/article/view/573>. Date accessed: 25 may 2018. doi: <http://doi.org/10.25728/assa.2018.18.1.573>.

Буянкин В.М.

**Нейрорегуляторы как элементы искусственного интеллекта для
автоматизированных систем управления электроприводом**

МГТУ им. Н.Э. Баумана

(Россия, Москва)

doi: 10.18411/lj-04-2020-24

idsp: ljjournal-04-2020-24

Аннотация

В статье рассматриваются вопросы синтеза нейрорегуляторов для автоматизированных систем управления электроприводом. Существующие стандартные классические регуляторы: интегральный (И), интегрально пропорциональный (ПИ), пропорционально интегрально дифференциальный (ПИД) широко зарекомендовали себя благодаря простоте своей структуры и высокой надежности, однако они не могут оперативно самообучаться и перестраиваться при изменении нелинейных параметров электропривода. К нелинейным параметрам можно добавить большое разнообразие возмущающих воздействий действующих в процессе работы электропривода, которые сложно точно измерить и рассчитать. Классические регуляторы с жесткой структурой без самонастройки не могут обеспечить необходимых статических и динамических характеристик электропривода, поэтому вместо них актуально использовать нейрорегуляторы на базе нейронных сетей, которые являются элементами искусственного интеллекта. Нейрорегуляторы как элементы искусственного интеллекта - легко перестраиваются и переобучаются, изменяя свои коэффициенты и структуру, приспособившись к внешней окружающей среде [1,2].

И-нейрорегулятор

На рис. 1 представлен цифровой дискретный интегральный регулятор И - регулятор.

Рис. 1. Цифровой дискретный интегральный регулятор И-регулятор

Цифровой дискретный И-регулятор описывается следующим разностным уравнением:

$$\frac{Y(k) - Y(k-1)}{T_s} = X(k) \cdot K_I, \quad (1)$$

где K_I - интегральный коэффициент;

T_s - дискретность по времени.

В Z-преобразованном виде имеем:

$$Y(z)[1 - Z^{-1}] = X(z) \cdot K_I \cdot T_s \quad (2)$$

Или в виде:

$$\frac{Y(z)}{X(z)} = \frac{K_I \cdot T_s}{[1 - Z^{-1}]} \quad (3)$$

На рис. 2 представлены результаты цифрового моделирования цифрового дискретного И-регулятора.

Рис. 2. Результаты цифрового моделирования цифрового дискретного И-регулятора

При проектировании И-нейрорегулятора выберем многослойную нейронную сеть с прямой передачей сигнала и обратным распространением ошибки, имеющую 6 нейронов. Функциональная схема нейронной сети представлена на рис. 3.

Рис. 3. Функциональная схема И-нейрорегулятора

Система уравнений, описывающая процессы в И-нейрорегуляторе имеет вид:

$$\begin{aligned}
 &Y_1 = Y_0 Z^{-1}, \text{ Выходной сигнал нейронной сети, задержанный на 1 такт,} \\
 &\left. \begin{aligned} E_1 &= X_0 W_{11} - Y_1 W_{12} \\ E_2 &= X_0 W_{21} - Y_1 W_{22} \\ &\dots\dots\dots \\ E_5 &= X_0 W_{51} - Y_1 W_{52} \end{aligned} \right\} \text{ Уравнения 1-го выходного слоя нейронов,} \\
 &\left. \begin{aligned} R_1 &= \text{pureline}(E_1), \\ &\dots\dots\dots \\ R_5 &= \tan \text{sig}(E_5), \\ Y'_0 &= R_1 W'_1 + \dots\dots\dots + R_5 W'_{51} \\ Y_0 &= \text{pureline} Y'_0 \end{aligned} \right\} \text{ Уравнения 2-го выходного слоя нейронов,} \quad (4)
 \end{aligned}$$

где X_0, Y_0 - входной и выходной сигналы нейронной сети, Y_1 - выходной сигнал нейронной сети, задержанный на один такт;

$E_1...E_5$ - выходные сигналы первого слоя нейронов; $W_{11}...W_{52}$ - веса первого слоя нейронов; $R_1...R_5$ - сигналы на выходе блоков активации первого слоя нейронов; Y_0' - сигнал на выходе второго слоя нейронов; $W_1'...W_{51}'$ - веса второго слоя нейронов; *pureline* - линейная функция активации.

Нейронная сеть содержит в первом входном слое 5 нейронов и во втором слое один нейрон с выходными функциями активации *pureline*. Для обучения и исследования работы И-нейрорегулятора воспользуемся моделированием в средах Matlab Neural Network, Matlab-Simulink.

Алгоритм обучения И-нейрорегулятора

Алгоритм обучения И-нейрорегулятора заключается в минимизации ошибки (рис.4) :

$$E(k) = \frac{1}{2} (e(k))^2 . \quad (5)$$

Веса нейронов вычисляются по следующей формуле:

$$\frac{\partial E}{\partial W_{ji}}(k) = \frac{\partial E}{\partial \omega}(k) \frac{\partial \omega}{\partial D}(k) \frac{\partial D}{\partial in_j}(k) \frac{\partial in_j}{\partial W_{ij}}(k) , \quad (6)$$

где W_{ji} – веса нейрона i и нейрона j , in_j .

Корректировка $\Delta W_{ji}(k)$ веса W_{ji} нейронной сети определена в соответствии со стремлением $\Delta W_{ji}(k)$ к бесконечности:

$$\Delta W_{ji}(k) = -\eta(k) \frac{\partial E}{\partial W_{ji}}(k) , \quad (7)$$

где $\eta(k)$ - коэффициент обучения.

И-нейрорегулятор обучался в течении 100 циклов (рис. 4), характеристика точности обучения показана на рис. 5; установившаяся ошибка составляет 0.065.

Рис. 4. Схема обучения И-нейрорегулятора

Рис. 5. Характеристика точности обучения И-нейрорегулятора

На рис. 6 представлены переходные процессы реакции на ступенчатое входное воздействие дискретного И-регулятора и обученного И-нейрорегулятора, из которых видно, что переходной процесс цифрового дискретного И-регулятора совпадает с переходным процессом И-нейрорегулятора.

Рис. 6. Переходные процессы И-регуляторов **ПИ-нейрорегулятор**

На рис.7 представлен цифровой дискретный ПИ-регулятор, работа которого описывается уравнением:

$$Y(k) - Y(k-1) = K_1 \cdot X(k) + K_1 \cdot X(k-1) + K_2 \cdot T_s \cdot X(k), \quad (8)$$

где K_1 - пропорциональный коэффициент;

K_2 - интегральный коэффициент.

В Z-преобразованном виде имеем:

$$Y(Z)[1 - Z^{-1}] = [(K_1 + K_2 \cdot T_s) + K_1 \cdot Z^{-1}] \cdot X(Z). \quad (9)$$

Рис. 7. Цифровой дискретный ПИ-регулятор

Проведем цифровое моделирование работы дискретного ПИ-регулятора в среде МАТЛАБ.

В программе цифрового моделирования осуществляется ввод начальных условий для ПИ-регулятора, запуск на выполнение М-файла и вывод на экран результатов в графической форме (рис. 8).

Рис. 8. Цифровое моделирование цифрового дискретного ПИ-регулятора

Для разработки ПИ-нейрорегулятора выберем многослойную нейронную сеть с прямой передачей сигнала и с обратным распространением ошибки с шестью нейронами. Функциональная схема нейронной сети представлена на рис. 9.

Рис. 9. Функциональная схема ПИ-нейрорегулятора

Система уравнений, описывающая процессы в ПИ-нейрорегуляторе имеет вид:

$X_1 = X_0 Z^{-1}$, Входной сигнал нейронной сети, задержанный на 1 такт,

$Y_1 = Y_0 Z^{-1}$, Выходной сигналы нейронной сети, задержанный на 1 такт,

$$E_1 = X_0 W_{11} - X_1 W_{12} - Y_1 W_{13}$$

$$E_2 = X_0 W_{21} - X_1 W_{22} - Y_1 W_{23}$$

.....

$$E_5 = X_0 W_{51} - X_1 W_{52} - Y_1 W_{53}$$

$$R_1 = (E_1),$$

.....

$$R_5 = \text{pureline}(E_5),$$

} Уравнения 1-го выходного слоя нейронов, (10)

$$\left. \begin{aligned} Y'_0 &= R_1 W'_1 + \dots + R_5 W'_5 \\ Y_0 &= \text{pureline} Y'_0 \end{aligned} \right\} \text{Уравнения 2-го выходного слоя нейронов,}$$

где X_0, Y_0 - входной и выходной сигнал нейронной сети;

X_1 - входной сигнал нейронной сети, задержанный на один такт;

Y_1 - выходной сигнал нейронной сети, задержанный на один такт;

$E_1...E_5$ - выходные сигналы первого слоя нейронов; $W_{11}...W_{53}$ - веса первого слоя нейронов; $R_1...R_5$ - сигналы на выходе блоков активации первого слоя нейронов; Y_0' - сигнал на выходе второго слоя нейронов; $W_1'...W_5'$ - веса второго слоя нейронов; *pureline* - линейная функция активации.

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

Алгоритм обучения нейронной сети и выбор целевой функции для ПИ-нейрорегулятора аналогичен вышеописанному И-нейрорегулятору. Схема обучения ПИ-нейрорегулятора показана на рис. 10. Для исследования работы ПИ-нейрорегулятора воспользуемся цифровым моделированием в среде MATLAB. Нейронная сеть обучалась в течение 3000 циклов. характеристика точности обучения показана на рис. 11.

Рис. 10. Схема обучения ПИ-нейрорегулятора

Рис. 11. Характеристика точности обучения

На рис. 12 представлены переходные процессы реакции на ступенчатое входное воздействие цифрового дискретного и обученного ПИ-нейрорегуляторов, из которых видно, что переходной процесс цифрового дискретного ПИ-регулятора близок к переходному процессу ПИ-нейрорегулятора.

Рис. 12. Переходные процессы при ступенчатом входном воздействии цифрового дискретного ПИ-регулятора и обученного ПИ-нейрорегулятора

Разработка ПИД-нейрорегулятора

Разностное уравнение работы цифрового дискретного ПИД-регулятора имеет вид [1,2,3]:

$$\frac{[Y(k) - Y(k-1)]}{T_s} = \frac{K_1[X(k) - X(k-1)]}{T_s} + K_2X(k) + \frac{K_3[X(k) - 2X(k-1) + X(k-2)]}{T_s^2}, \quad (11)$$

где K_1 - пропорциональный коэффициент;

K_2 - интегральный коэффициент;

K_3 - дифференциальный коэффициент.

Система уравнений, описывающая процессы в ПИД-регуляторе имеет вид:

$$\frac{Y(Z)[1 - Z^{-1}]}{a_4} = X(Z)[a_1 + a_2Z^{-1} + a_3Z^{-2}], \quad (12)$$

где $a_1 = (K_1 + K_2T_s + K_3T_s^2)$,

$a_2 = (2K_1 - K_2T_s)$,

$a_3 = -2K_1$,

$a_4 = T_s$.

Цифровой дискретный ПИД-регулятор представлен на рис. 13.

Рис. 13. Цифровой дискретный ПИД-регулятор

Проведем цифровое моделирование цифрового дискретного ПИД-регулятора. На рис. 14 представлены результаты цифрового моделирования дискретного ПИД-регулятора. В программе цифрового моделирования в среде МАТЛАБ осуществляется ввод начальных условий и данных, запуск на выполнение М-файла и вывод на экран результатов в графической форме.

Рис. 14. Цифровое моделирование цифрового дискретного ПИД-регулятор

Для разработки ПИД-нейрорегулятора выберем многослойную нейронную сеть с прямой передачей сигнала и обратным распространением ошибки, которая представлена на рис. 15. На представленной нейронной сети элемент z осуществляет задержку сигнала. На входы нейронной сети подается n значений $X(z)$ и m значений сигнала с выхода $Y(z)$. Величины n и m определяются порядком дифференциального уравнения, которое описывает работу ПИД-регулятора. Нейронная сеть содержит в первом входном слое 5 нейронов и один нейрон на выходе с функциями активации *pureline*. Алгоритм обучения нейронной сети и выбор целевой функции для ПИД-нейрорегулятора аналогичен выше описанному ПИ-нейрорегулятору.

Рис. 2.15. ПИД-нейрорегулятор

Система уравнений, описывающая процессы в ПИД-нейрорегуляторе имеет вид:

$$\left. \begin{aligned}
 E_1 &= X_0 W_{11} - X_1 W_{12} - X_2 W_{13} - Y_1 W_{14} \\
 E_2 &= X_0 W_{21} - X_1 W_{22} - X_2 W_{23} - Y_1 W_{24} \\
 &\dots\dots\dots \\
 E_5 &= X_0 W_{51} - X_1 W_{52} - X_2 W_{53} - Y_1 W_{54} \\
 R_1 &= \tan \operatorname{sig}(E_1), \\
 &\dots\dots\dots \\
 R_5 &= \tan \operatorname{sig}(E_5),
 \end{aligned} \right\} \text{Уравнения 1-го выходного слоя нейронов}$$

$$\left. \begin{aligned}
 Y'_0 &= R_1 W'_1 + \dots\dots\dots + R_5 W'_{51} \\
 Y_0 &= \operatorname{pureline} Y'_0
 \end{aligned} \right\} \text{Уравнения 2-го выходного слоя нейронов, (13)}$$

где X_0, Y_0 - входной и выходной сигнал нейронной сети;

$X_1 = X_0 Z^{-1}$, $X_2 = X_0 Z^{-2}$, входные сигналы нейронной сети, задержанные на 1,2 такта;

$Y_1 = Y_0 Z^{-1}$, выходной сигнал нейронной сети, задержанный на 1 такт;

$E_1 \dots E_5$ - выходные сигналы первого слоя нейронов; $W_{11} \dots W_{54}$ - веса первого слоя нейронов; $R_1 \dots R_5$ - сигналы на выходе блоков активации первого слоя нейронов; Y'_0 - сигнал на выходе второго слоя нейронов; $W'_1 \dots W'_{51}$ - веса второго слоя нейронов; *pureline* - линейная функция активации.

Нейронная сеть содержит в первом входном слое 5 нейронов с функциями *pureline*. На рис.16 показана схема обучения в ПИД-нейрорегулятора.

Рис. 16. Схема обучения в ПИД-нейрорегулятора

Процедура обучения нейронной сети ПИД-нейрорегулятора заключается в настройке весовых коэффициентов и параметров нейронов. Настройка производится на основании информации о сигнале ошибки между выходом цифрового дискретного ПИД-регулятора и ПИД-нейрорегулятора. Нейронная сеть обучалась в течение 250 циклов, характеристика точности обучения показана на рис. 17.

Рис. 17. Характеристика точности обучения

На рис. 18 представлены переходные процессы реакции на ступенчатое входное воздействие цифрового дискретного ПИД-регулятора и обученного ПИД-нейрорегулятора.

Рис. 18. Переходные процессы реакции на ступенчатое входное воздействие цифрового дискретного ПИД-регулятора и обученного ПИД-нейрорегулятора

Таким образом, разработанные нейрорегуляторы могут быть реализованы как программно, так и аппаратно. Они легко встраиваются в цифровые системы управления, повышая точность и качество работы электропривода.

1. Буянкин В. М., Пантюхин, Д. В. Синтез последовательного интегрального пропорционального нейрорегулятора для управления электроприводом // Перспективные системы и задачи управления : труды Всероссийской научно-технической конференции. — Домбай, 2006. — С. 115—121.
2. Буянкин В.М. Интегральный, пропорциональный, дифференциальный нейрорегулятор // Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Сер. «Естественные науки». — 2006. — №3 — С. 56—61.
3. Буянкин В. М. Двухконтурная система нейрорегулирования электроприводом с нейросамонастройкой // Нейрокомпьютеры: разработка и применение. — 2006.— №8. — С. 90—94.
4. Буянкин, В. М. Нейрорегулирование электродвигателями электроприводами. Издание LAMBERN Academic Publishing Germany, 2015г С 160.
5. Буянкин, В.М. Разработка метода адаптивного подчиненного регулирования нейрорегуляторами для управления многоконтурными следящими электроприводами для мехатронной системы работа с параллельной механикой//Промышленные АСУ и контроллеры-2016-N12.-С.-32-36.