УДК 622.313.33

А.Н. ГАРГАЕВ, к.т.н., старший преподаватель (КузГТУ)
В.Г. КАШИРСКИХ, д.т.н., профессор (КузГТУ)
И.В. БУЛГАКОВА, студентка 4-го курса гр. ЭАб-121 (КузГТУ)
г. Кемерово

ОЦЕНКА ПАРАМЕТРОВ ДВИГАТЕЛЯ ПОСТОЯННОГО ТОКА С ПОМОЩЬЮ РЕКУРРЕНТНЫХ ИСКУССТВЕННЫХ НЕЙРОННЫХ СЕТЕЙ

Одним из наиболее целесообразных путей при создании современных высокоэффективных электроприводов промышленных установок является использование информации, получаемой при мониторинге параметров и состояния электродвигателей в процессе их работы. На этой основе может быть построено управление, диагностика и защита электропривода от аварийных режимов.

Поскольку при работе двигателя требуемую информацию(активные и индуктивные сопротивления обмоток, потокосцепления, угловая скорость вращения, электромагнитный и нагрузочный моменты) трудно или невозможно получить путем измерений, приходится использовать динамическую идентификацию двигателя с оцениванием требуемых данных на основе использования математической модели двигателя и легко измеряемой информации (токи и напряжения на зажимах двигателя). Существующие методы оценивания и современные компьютерные технологии позволяют решить эту задачу [1].

В последнее время широкое применение для решения задач аппроксимации нашел математический аппарат искусственных нейронных сетей (ИНС). Проведенные нами исследования показали возможность использования ИНС для динамической идентификации электродвигателей [2-4]. Среди множества архитектур ИНС больший интерес для динамической идентификации электродвигателей вызывают рекуррентные ИНС Элмана, в которых имеется обратная связь, позволяющая анализировать предыдущее состояние исследуемого объекта (рис. 1). Рекуррентные нейронные сети, отображающие объект в пространстве состояний, позволяют с высокой точностью моделировать линейные и нелинейные объекты [5-7]. Особенностью этих сетей является строгая аналитическая зависимость между их весовыми коэффициентами и физическими параметрами моделируемого объекта.

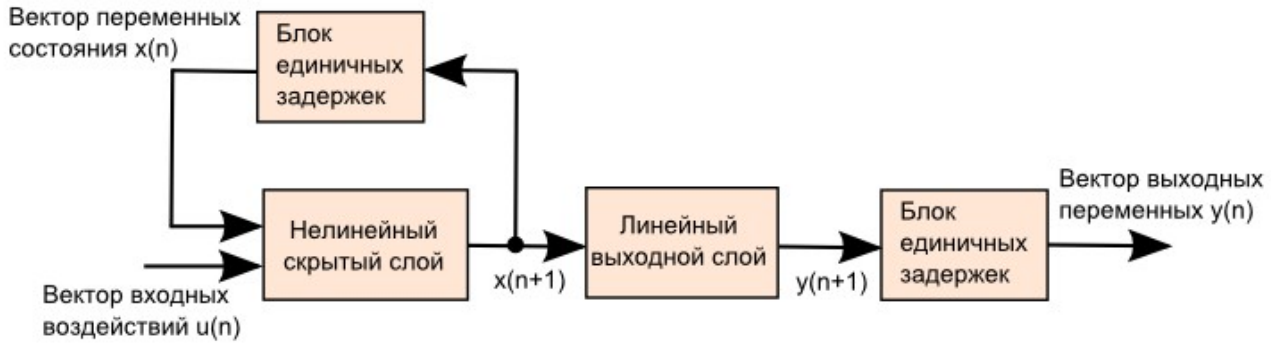

Рис. 1. Структура рекуррентной ИНС

Здесь рассматривается возможность применения сети Элмана для динамической идентификации двигателя постоянного тока (ДПТ).В качестве математической модели ДПТ используем уравнения, выведенные из уравнений обобщенной электрической машины:

(1)

$$\left.\begin{aligned} u_{\text{в}} &= i_{\text{в}} \cdot R_{\text{в}} + L_{\text{в}} \cdot \frac{di_{\text{в}}}{dt}; \\ u_{\text{я}} &= i_{\text{я}} \cdot R_{\text{я}\Sigma} + L_{\text{я}\Sigma} \cdot \frac{di_{\text{я}}}{dt} + p \cdot L_{12} \cdot \omega \cdot i_B; \\ J \cdot \frac{d\omega}{dt} &= M - Mc; \\ M &= p \cdot L_{12} \cdot i_B \cdot i_{Я}, \end{aligned}\right\}$$

где $u_{Я}$, u_B - напряжения питания обмоток якоря и возбуждения; $i_{Я}$, i_B - токи обмоток якоря и возбуждения; $L_{Я}$, L_B - индуктивности обмоток якоря и возбуждения; $R_{Я}$, R_B - активные сопротивления обмоток якоря и возбуждения; ω - угловая скорость вращения якоря; J - момент инерции; M - электромагнитный момент; Mc - момент сопротивления; p - число пар полюсов.

Представим (1) в виде модели в пространстве состояний, включающей вектор переменных состояния – x, вектор входных воздействий – u, вектор выходных переменных – y, связанных между собой дифференциальными уравнениями первого порядка, записанными в матричной форме:

$$\begin{cases} \dot{x} = Ax + Bu; \\ y = Cx, \end{cases} \qquad (2)$$

где A, B, C – матрицы состояния, управления и выхода соответственно;

$$y = x = \begin{bmatrix} i_в \\ i_я \\ w \end{bmatrix}; \quad u = \begin{bmatrix} U_в \\ U_я \\ M_c \end{bmatrix}; \quad C = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}; \quad T_B = \frac{L_B}{R_B}, \quad T_Я = \frac{L_Я}{R_Я} -$$

электромагнитные постоянные времени обмоток возбуждения и якоря;

$$A = \begin{bmatrix} \frac{-1}{T_в} & 0 & 0 \\ 0 & \frac{-1}{T_я} & \frac{-p L_{12} i_в}{R_я T_я} \\ 0 & \frac{p L_{12} i_в}{J} & 0 \end{bmatrix}, B = \begin{bmatrix} \frac{1}{R_в T_в} & 0 & 0 \\ 0 & \frac{1}{R_я T_я} & 0 \\ 0 & 0 & \frac{-1}{J} \end{bmatrix}.$$

Поскольку рекуррентная ИНС функционирует дискретно, из (2) следует, что $\dot{x}(n) = Ax(n) + Bu(n),$ где n – номер отсчета.

Производная вектора переменных состояния имеет вид:

$\dot{x}(n) = \frac{x(n+1) - x(n)}{T}$, где T – период дискретизации.

С учетом этого запишем: $x(n+1) = [I + TA]x(n) + TBu(n),$

где I – единичная матрица.

Отсюда можно определить весовые коэффициенты рекуррентного слоя нейронной модели:

- коэффициенты для переменных состояния $AW = I + TA;$
- коэффициенты для управляющих сигналов $BW = TB.$

В результате получим:

$$AW = \begin{bmatrix} 1 - \frac{T}{T_в} & 0 & 0 \\ 0 & 1 - \frac{T}{T_я} & \frac{-p L_{12} i_в T}{R_я T_я} \\ 0 & \frac{Tp L_{12} i_в}{J} & 1 \end{bmatrix}, BW = \begin{bmatrix} \frac{T}{R_в T_в} & 0 & 0 \\ 0 & \frac{T}{R_я T_я} & 0 \\ 0 & 0 & \frac{-T}{J} \end{bmatrix}.$$

Компьютерная модель ДПТ в виде рекуррентной ИНС реализована с помощью стандартного пакета MatLab: Simulink. Модель имеет три нейрона во входном слое, три нейрона в скрытом слое, соответствующие весовые коэффициенты, линейные функции активации и блоки задержки сигналов на один такт (рис. 2).

Моделирование выполнялось для ДПТ с параметрами: Uв=100 В, Rв=185 Ом, Lв=50 Гн, Uя=100 В, Rя=6 Ом, Lя=0.5 Гн, p=1, L12=1.6 Гн, J=0.004 кг*м^2, Mc=0.5 Н*м. Результаты компьютерного моделирования представлены на рис.3.

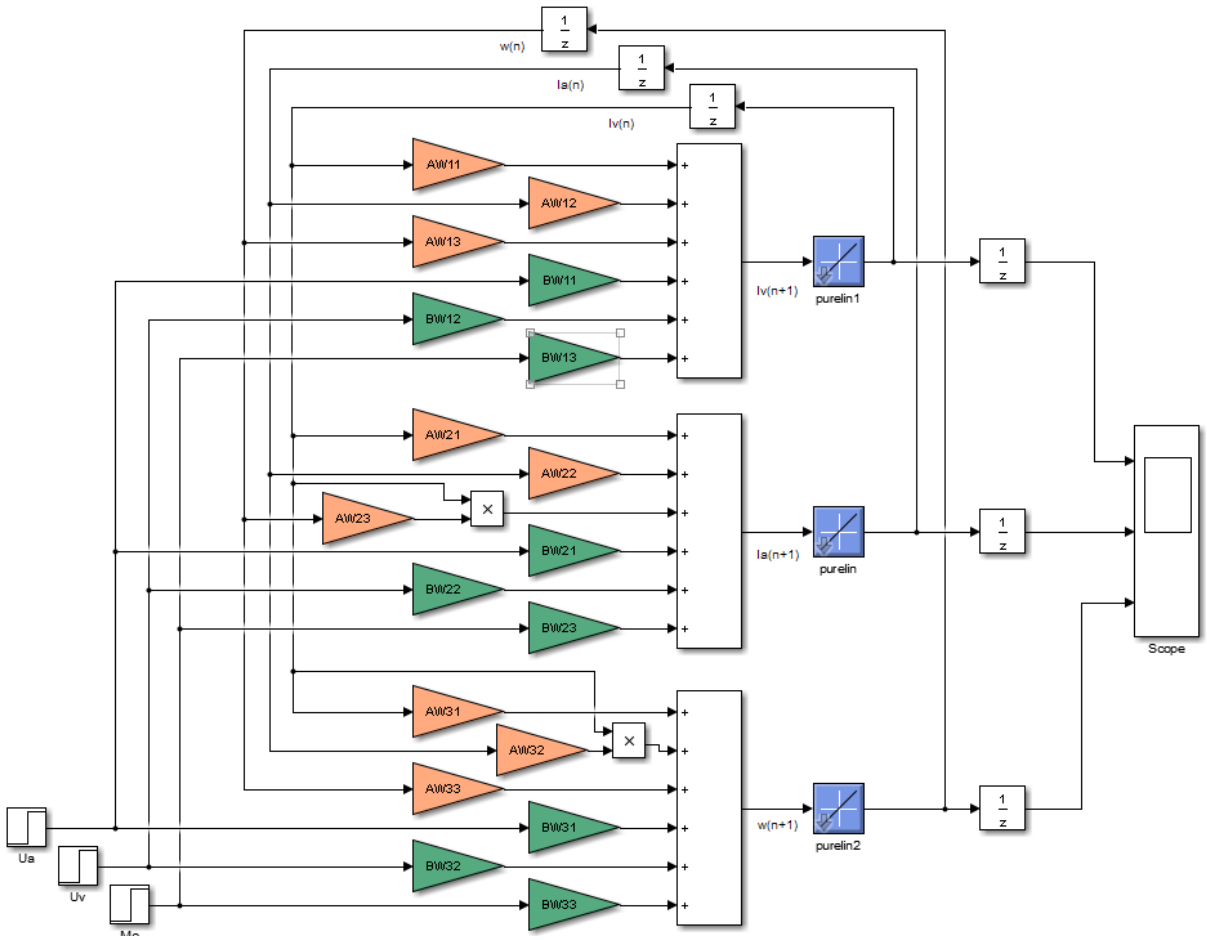

Рис. 2. Компьютерная модель ДПТ в виде рекуррентной ИНС

Сравнение полученных с помощью ИНС результатов с результатом моделирования эталонной модели ДПТ, в качестве которой были использованы уравнения (1), показало следующие отклонения:

- по току обмотки возбуждения – 0,083%;
- по току якоря – 3,25%;
- по скорости вращения – 1,92%.

Анализ полученных результатов позволяет сделать вывод о том, что модель ДПТ на базе рекуррентной ИНС является адекватной применительно к исходной математической модели и может быть использована для практического применения.

В реальном электродвигателе в зависимости от теплового состояния и режимов работы его параметры изменяются, поэтому становится актуальным вопрос об изменении весовых коэффициентов модели в реальном режиме времени.

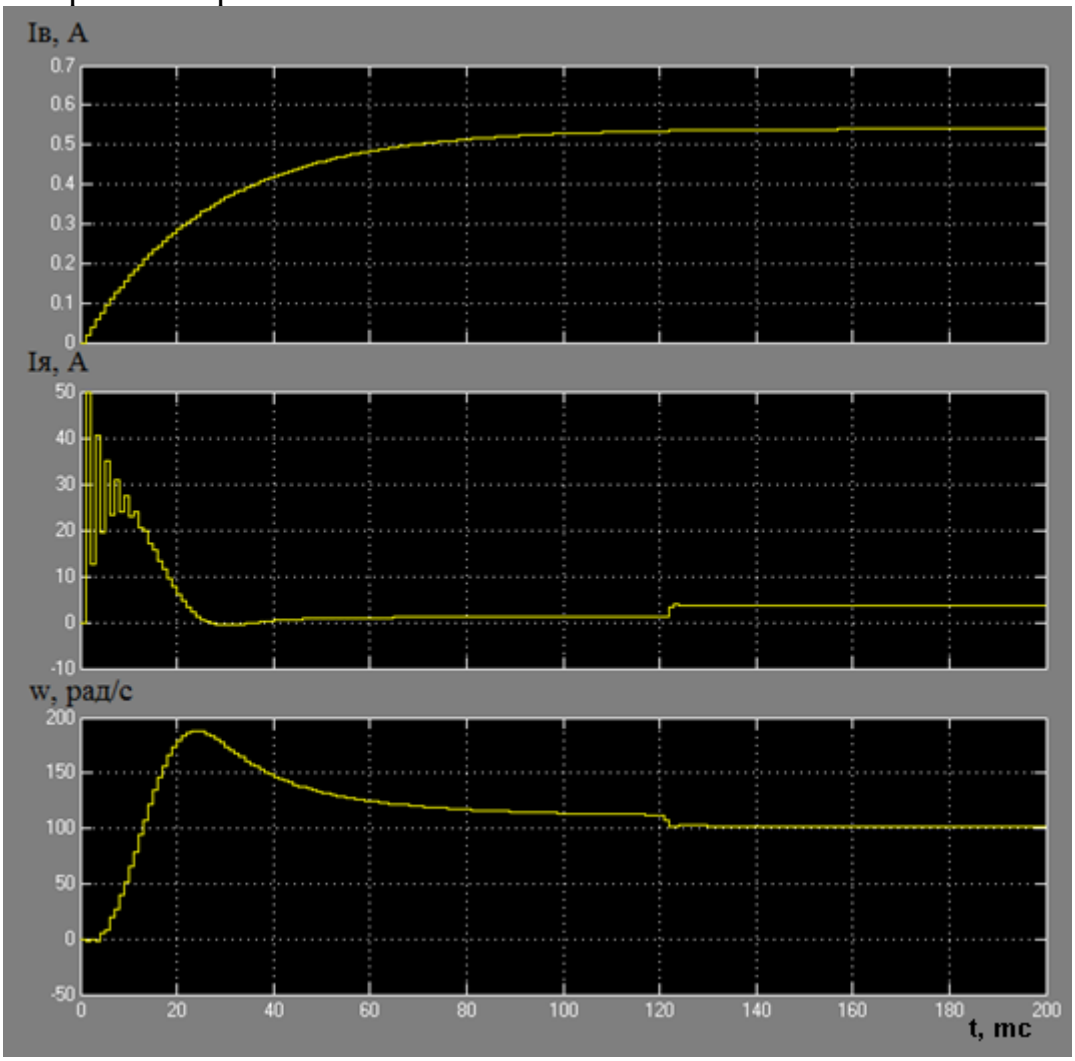

Рис. 3. Переходной процесс при пуске ДПТ: Iв – ток обмотки возбуждения, Iя – ток обмотки якоря, w – угловая скорость вала

В общем виде алгоритм динамической идентификации ДПТ на основе применения рекуррентных ИНС можно представить в виде совокупности следующих процедур (рис. 4):

- задание структуры ИНС и инициализация весовых коэффициентов;
- подача управляющих сигналов на вход рекуррентной ИНС;

- корректировка весовых коэффициентов AW и BW при рассогласовании выходных сигналов рекуррентной ИНС и эталонной модели;
- определение текущих параметров математической модели ДПТ по измененным весовым коэффициентам:

$$T_в = \frac{T}{1 - AW_{11}} \; ; \qquad T_я = \frac{T}{1 - AW_{22}} \; ; \qquad J = \frac{T}{BW_{33}} \; ; \qquad R_в = \frac{1 - AW_{11}}{BW_{11}} \; ;$$

$$R_я = \frac{1 - AW_{22}}{BW_{22}} \; ; \quad L_B = T_B R_B \; ; \quad L_Я = T_Я R_Я .$$

Проверка работоспособности данного алгоритма подтвердила возможность его использования в режиме реального времени для динамической идентификации ДПТ. Результаты проверки здесь не приводятся из-за ограниченного объема материала.

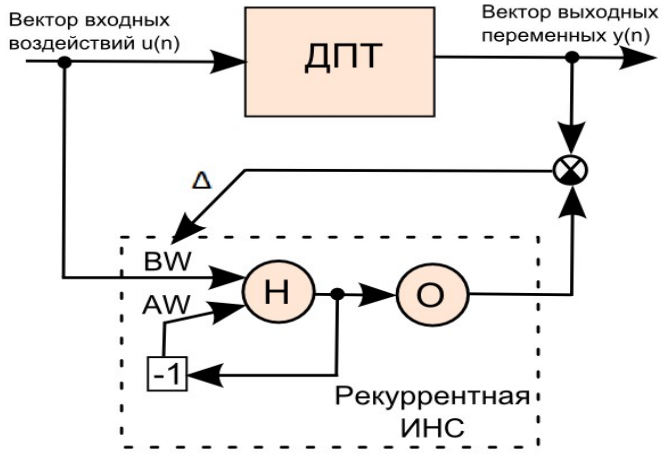

Рис. 4. Структура системы для динамической идентификации ДПТ

Таким образом, проведенные исследования показали возможность использования рекуррентных ИНС для осуществления процедуры идентификации параметров математической модели ДПТ в реальном масштабе времени. Получаемая при этом оперативная информация может быть использована для решения задач управления, диагностики и защиты электроприводов постоянного тока от аварийных режимов работы.

Список литературы:

1. Каширских В.Г. Динамическая идентификация асинхронных электродвигателей: Монография / ГУ КузГТУ.- Кемерово, 2005.- 139 с.
2. Каширских В.Г. Динамическая идентификация параметров ротора асинхронного электродвигателя с помощью искусственной нейронной сети /В.Г. Каширских, А.В. Нестеровский// Вестн. КузГТУ, 2004.- №4.- С.50-51.

3. Каширских В.Г. Диагностика двигателей постоянного тока с помощью искусственной нейронной сети / В.Г. Каширских, А.Н. Гаргаев // Вестник КузГТУ. 2014, №2. С. 104-106.
4. Хайкин С. Нейронные сети: полный курс. 2-е издание [текст]. – М. Издательский дом "Вильямс", 2006. – 1104 с.
5. Рутковская Д. Нейронные сети, генетические алгоритмы и нечеткие системы [текст]/ Д.Рутковская, М.Пилиньский, Л.Рутковский. – М.: Горячая линия-Телеком, 2006. – 452 с.
6. Борисов В.В., Круглов В.В. Искусственные нейронные сети. Теория и практика // М.: Горячая линия-Телеком. – 2002 – 382 с.