Орловский И.А. **Украина**

Запорожский национальный технический университет

РАСЧЁТ МОДЕЛЕЙ ТЯГОВОГО АСИНХРОННОГО ДВИГАТЕЛЯ НА ПОЛИНОМИАЛЬНЫХ РЕКУРРЕНТНЫХ НЕЙРОННЫХ СЕТЯХ

Введение. Качественное управление движением дизель-поезда (параметры элементов которого являются нелинейными и изменяются в процессе работы) является сложной и актуальной задачей [1]. Исследование и первоначальную отладку его системы управления (СУ), а также корректировку её настройки в процессе работы целесообразно выполнять на имитационной математической модели, описывающей с достаточной точностью реальный объект в текущий промежуток времени [2]. Для реализации моделей объектов в последнее время широко используются искусственные нейронные сети (НС), способные обучаться и обладающие возможностями универсальных аппроксиматоров [2, 3]. Универсальность НС достигается либо за счёт использования нелинейных активационных функций нейронов, многослойности сети и большого числа соединений, либо за счёт расширения входного пространства в функционально связанных НС с линейными функциями активации [3].

Получение модели объекта, а также поиск или корректировку параметров СУ этим объектом необходимо выполнять за минимальное время (желательно – в режиме реального времени "on-line"). Снижение времени поиска структуры модели и внутренних её параметров можно достигнуть, максимально используя уже известную информацию о математической модели объекта. В этом случае перспективно создавать модель на рекуррентных НС со структурой, подобной структуре объекта [4, 5]. По известной структуре математической модели объекта выполняется построение структуры НС. Весовые коэффициенты НС могут быть найдены с помощью градиентных алгоритмов обучения [2, 3], либо расчётом этих коэффициентов из экспериментальных данных работы объекта [4, 5]. Последний способ не имеет итерационных алгоритмов и является значительно более быстродействующим. Развитию этого способа для получения модели тягового асинхронного двигателя (ТАД), являющегося одним из основных узлов привода дизель-поезда, посвящена данная статья.

Постановка задачи исследования. В работах [4, 5] разработаны методики расчёта, соответственно, степенных и полиномиальных рекуррентных НС (ПРНС) из экспериментальных данных. В [5] показана возможность получения моделей на ПРНС для тиристорного электропривода с двигателем постоянного тока последовательного возбуждения. Так как ТАД имеет нелинейные параметры и перекрёстные связи, целесообразно получать его модель на ПРНС, позволяющей представлять объект с нелинейностями параметров от любого числа переменных. Возможность получения модели ТАД на ПРНС в литературе не рассматривалась.

Целью статьи является: с использованием известной структуры математической модели ТАД выполнить расчёт его модели на ПРНС по экспериментальным данным; рассчитать модель на ПРНС по математическому описанию ТАД; исследовать и проанализировать полученные модели методом имитационного моделирования.

Расчёт по математическому описанию моделей ТАД на ПРНС. Для расчёта ПРНС воспользуемся известными общими выражениями, описывающими работу ТАД в стационарной системе координат. Для простоты описания преобразуем трёхфазное симметричное входное напряжение с фазными напряжениями U_A, U_B, U_C в эквивалентное ему двухфазное напряжение, используя выражения [6]:

$$\left.\begin{aligned} U_\alpha &= U_A, \\ U_\beta &= (U_B - U_C)/\sqrt{3}, \end{aligned}\right\} \qquad (1)$$

где U_α, U_β – ортогональные проекции обобщённого вектора напряжения на оси α и β.

Математическая модель ТАД при частотно-напряженческом управлении в двухфазной стационарной системе координат представляет собой систему уравнений (2) [6], в которой $Us\alpha$ и $Us\beta$ – проекции вектора статорного напряжения ТАД на оси α и β

$$\left.\begin{aligned} Lm\cdot Is\alpha &= \psi r\alpha + Te\cdot\left(\frac{d\psi r\alpha}{dt}\right) + p\cdot\omega\cdot Te\cdot\psi r\beta, \\ Lm\cdot Is\beta &= \psi r\beta + Te\cdot\left(\frac{d\psi r\beta}{dt}\right) - p\cdot\omega\cdot Te\cdot\psi r\alpha, \\ Us\alpha &= Rs\cdot Is\alpha + L\sigma\cdot\left(\frac{dIs\alpha}{dt}\right) + K\cdot\left(\frac{d\psi r\alpha}{dt}\right), \\ Us\beta &= Rs\cdot Is\beta + L\sigma\cdot\left(\frac{dIs\beta}{dt}\right) + K\cdot\left(\frac{d\psi r\beta}{dt}\right), \\ M - Mc &= J\cdot\left(\frac{d\varpi}{dt}\right), \\ M &= \frac{3}{2}\cdot p\cdot K\cdot(\psi r\alpha\cdot Is\beta - \psi r\beta\cdot Is\alpha), \end{aligned}\right\} \qquad (2)$$

соответственно; $\psi r\alpha$ и $\psi r\beta$ – проекции вектора потокосцепления ротора ТАД на оси α и β; Lm – индуктивность намагничивания; $L\sigma$ – суммарная индуктивность рассеивания ТАД ($L\sigma = L\sigma s + K\cdot L\sigma r$, где $L\sigma s$, $L\sigma r$ – индуктивности рассеивания статора и ротора соответственно); ω – угловая частота вращения (скорость) ротора двигателя; Mc – момент сопротивления; Rs – активное сопротивление обмоток статора; p – число пар полюсов двигателя; J – момент инерции ТАД; Te – электромагнитная постоянная времени ротора; $Is\alpha$, $Is\beta$ – проекции вектора статорного тока на оси α и β соответственно; K – коэффициент приведения (связи) ротора; M – электромагнитный момент на валу ТАД.

Объект в пространстве состояний описывается в виде системы уравнений (3) [2]. Для данного объекта вектором состояния является: $x = [\psi r\alpha, \psi r\beta, Is\alpha, Is\beta, \omega]^T$; вектором входных сигналов: $u = [Us\alpha, Us\beta, Mc]^T$. Система уравнений (2) после преобразований принимает следующий вид:

$$\dot{x} = Ax + Bu . \qquad (3)$$

$$\left.\begin{aligned}
\frac{d\psi r\alpha}{dt} &= -\frac{1}{Te}\psi r\alpha - p\omega\psi r\beta + \frac{Lm}{Te}Is\alpha + 0\cdot Is\beta + 0\cdot\omega + 0\cdot Us\alpha + 0\cdot Us\beta + 0\cdot Mc,\\
\frac{d\psi r\beta}{dt} &= p\omega\psi r\alpha - \frac{1}{Te}\psi r\beta + 0\cdot Is\alpha + \frac{Lm}{Te}Is\beta + 0\cdot\omega + 0\cdot Us\alpha + 0\cdot Us\beta + 0\cdot Mc,\\
\frac{dIs\alpha}{dt} &= \frac{K}{L\sigma Te}\psi r\alpha + \frac{Kp\omega}{L\sigma}\psi r\beta - \left(\frac{KLm}{L\sigma Te} + \frac{Rs}{L\sigma}\right)Is\alpha + 0\cdot Is\beta + 0\cdot\omega + \frac{1}{L\sigma}Us\alpha + 0\cdot Us\beta + 0\cdot Mc,\\
\frac{dIs\beta}{dt} &= -\frac{Kp\omega}{L\sigma}\psi r\alpha + \frac{K}{L\sigma Te}\psi r\beta + 0\cdot Is\alpha - \left(\frac{KLm}{L\sigma Te} + \frac{Rs}{L\sigma}\right)Is\beta + 0\cdot\omega + 0\cdot Us\alpha + \frac{1}{L\sigma}Us\beta + 0\cdot Mc,\\
\frac{d\varpi}{dt} &= 0\cdot\psi r\alpha + 0\cdot\psi r\beta - \frac{3pK}{2J}\psi r\beta\cdot Is\alpha + \frac{3pK}{2J}\psi r\alpha\cdot Is\beta + 0\cdot\omega + 0\cdot Us\alpha + 0\cdot Us\beta - \frac{1}{J}Mc.
\end{aligned}\right\} \qquad (4)$$

Значения электромагнитного момента ТАД определяется по пятому уравнению системы (2). Согласно уравнениям (3) и (4) матрицы коэффициентов A и B представлены выражениями (5).

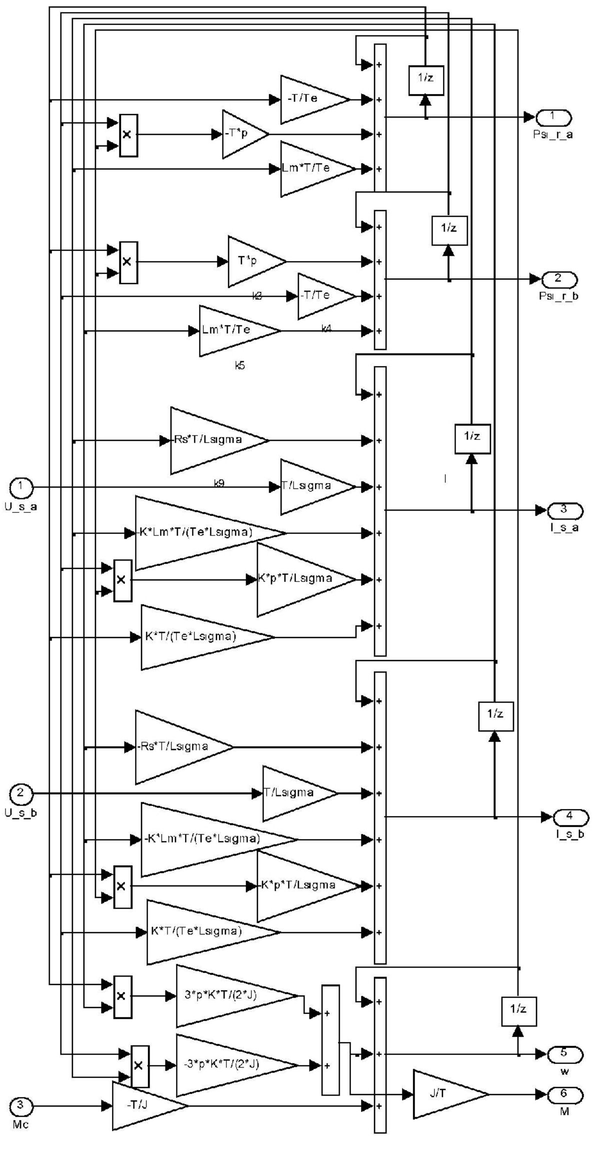

Рис.1 Модель на ПРНС ТАД.

$$\left.\begin{aligned}
A &= \begin{bmatrix}
-1/Te & -p\omega & Lm/Te & 0 & 0\\
p\omega & -1/Te & 0 & Lm/Te & 0\\
\frac{K}{L\sigma Te} & \frac{Kp\omega}{L\sigma} & -\left(\frac{KLm}{L\sigma Te}+\frac{Rs}{L\sigma}\right) & 0 & 0\\
-\frac{Kp\omega}{L\sigma} & \frac{K}{L\sigma Te} & 0 & -\left(\frac{KLm}{L\sigma Te}+\frac{Rs}{L\sigma}\right) & 0\\
0 & 0 & -3pK\psi r\beta/2J & pK\psi r\alpha/2J & 0
\end{bmatrix},\\
B &= \begin{bmatrix}
0 & 0 & 0\\
0 & 0 & 0\\
1/L\sigma & 0 & 0\\
0 & 1/L\sigma & 0\\
0 & 0 & -1/J
\end{bmatrix}.
\end{aligned}\right\} \qquad (5)$$

Общая структура ПРНС, соответствующая уравнениям (2) – (5), представлена на рис. 1.

Для модели ТАД матрица весовых коэффициентов ПРНС имеет вид:

$$W = \begin{bmatrix}
w_{11} & w_{12} & w_{13} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0\\
w_{21} & w_{22} & 0 & w_{24} & 0 & 0 & 0 & 0\\
w_{31} & w_{32} & w_{33} & 0 & 0 & w_{36} & 0 & 0\\
w_{41} & w_{42} & 0 & w_{44} & 0 & 0 & w_{47} & 0\\
0 & 0 & w_{53} & w_{54} & 0 & 0 & 0 & w_{58}
\end{bmatrix} \qquad (6)$$

Элементы w_{ij} в общем случае являются векторами, которые определяются через полиномиальные разложения элементов матриц A и B .

Расчёт весовых коэффициентов ПРНС по экспериментальным данным. Для удобства описания ПРНС и выполнения дальнейших расчётов воспользуемся полиномиальными блоками POL [5]. Эти блоки формируют произведения элементов векторов входных сигналов и состояния на степени этих сигналов для полиномиального представления элементов матриц A и B . Выходами блоков являются векторы h_{ij} с индексами как у векторов весовых коэффициентов w_{ij} . Векторы столбцы h_{ij} (i – номер уравнения системы (3) или номер нейрона) образуют вектор h_i путём добавления (конкатенации) к h_{i1} элементов других векторов h_{ij} i -го нейрона. Тогда в разностном виде система уравнений (3) имеет вид:

$$w_i h_{in} = \Delta x_{in},\ i=1,...,5\ , \qquad (7)$$

где w_i – векторы весовых коэффициентов i-го нейрона; $\Delta x_{in} = x_{in} - x_{in-1}$. Для расчёта неизвестных коэффициентов ПРНС по экспериментальным данным необходимо иметь количество уравнений равное или большее числу неизвестных N. Для этого выполняются измерение входных сигналов и вектора состояния объекта в ($M \ge N$) последовательных тактах времени. Тогда каждое из уравнений системы (7) даёт M уравнений. Определение весовых коэффициентов выполняется расчётом с помощью псевдообратных матриц $(h_i^*)^+$ по выражению (8) [5], в котором $w_i^* = [w_i,...,w_i]^T$, размера $(M \times 1)$; $h_i^* = [h_{in},...,h_{in-M+1}]$, $\Delta x_{in}^* = [\Delta x_{in},...,\Delta x_{in-M+1}]^T$, $i=1,...,5$.

$$w_i^* = \Delta x_{in}^* (h_i^*)^+ . \qquad (8)$$

Рассчитанная модель на ПРНС с высокой точностью отображает объект для значений входных сигналов, используемых для расчёта. Однако при других значениях входных сигналов точность модели снижается из-за присутствия нелинейностей. Для достаточно точного расчёта модели желательно использовать все имеющиеся экспериментальные данные. Если использовать данные, полученные с частотой 10^5 Гц в течение десятков секунд или минут, то размеры матриц расчёта весовых коэффициентов могут достигать миллионов. Время выполнения операций с увеличением размеров матриц растёт лавинообразно. Минимизировать время расчёта можно за счёт рационального формирования набора значений экспериментальных данных используемых для расчёта с помощью следующих приёмов::формирование набора из фрагментов, взятых при разных режимах работы двигателя; разреживание данных (использование для расчёта одно значение из ряда последовательных значений).

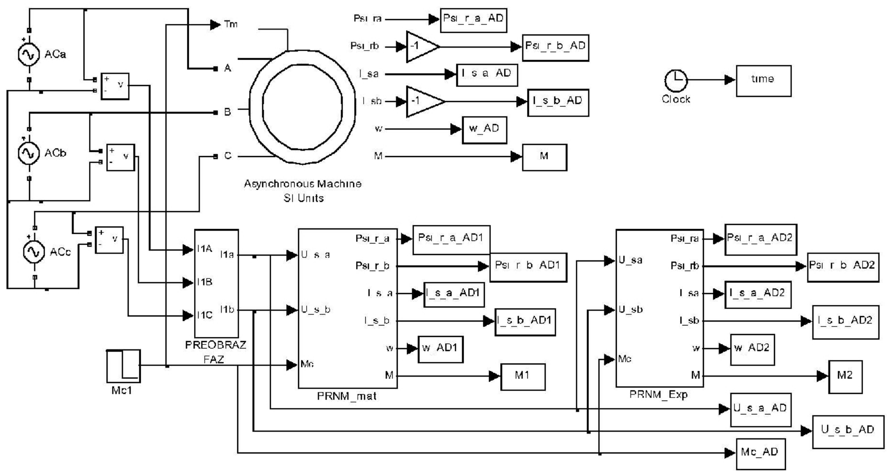

Рис. 2 Исследуемая система в пакете Matlab.

Результаты расчёта ПРНС и моделирования. Для исследования взята модель двигателей АД906У1, установленных на ДП ДЕЛ-02, имеющих следующие параметры: $Pн$=240кВт, $U_{фн}$=665В, $I_{фн}$=155А, $M_н$=2366Нм, p=3, $f_{сн}$=33,8Гц, КПД–93%; Rs=0,083Ом: Rr=0,06Ом; Lm=0,0725Гн; L_σ=0,003Гн; $L_{\sigma s}$=0,0016Гн; $L_{\sigma r}$=0,0014Гн; T_e=1,23с.; K=0,982; J=10Нм^2, $x1 = 0,343$ Ом, $x2 = 0,29$ Ом, $xm = 15,4$ Ом.

Таблица 1. Весовые коэфф. ПРНС

Обозн. коэфф.	ПРНС_М ×100000	ПРНС_Э ×100000
w_{11}	-8,12E-01	-2,88E-01
w_{12}	-3	-3,1707
w_{13}	5,89E-02	5,86E-02
w_{21}	3	3,0555
w_{22}	-8,12E-01	-7,60E-01
w_{24}	5,89E-02	5,88E-02
w_{31}	269,72	-322,36
w_{32}	9,96E+02	1,03E+03
w_{33}	-47,643	-43,501
w_{36}	3,38E+05	3,38E+05
w_{41}	-9,96E+02	-9,74E+02
w_{42}	269,72	547,58
w_{44}	-47,643	-43,22
w_{47}	3,38E+05	3,39E+05
w_{53}	-4,42E-01	-4,49E-01
w_{54}	4,42E-01	4,38E-01
w_{55}	-200	-201,94

Схема исследуемой системы в пакете Simulink приведена на рис. 2. Пуск двигателя осуществляется от трёхфазного источника напряжения с фазным напряжением 665 В и частотой 50 Гц. Момент сопротивления в начале пуска 400Нм, в момент времени 1,6с он увеличивается до номинального (2366Нм). На рис. 3 в левом столбце показаны значения элементов вектора состояния ТАД и электромагнитный момент для его модели из стандартной библиотеки системы Matlab (цифра "1") и модели на ПРНС (ПРНС_М), рассчитанной из его математической модели (цифра "2"). Результаты очень близкие, поэтому для их сравнения в среднем столбце рис. 2 приведены разности сигналов левого столбца. В правом столбце приведены сигналы модели на ПРНС (ПРНС_Э), весовые коэффициенты которой рассчитаны из экспериментальных данных (цифра 3). Для расчета использовались 2000 значений, полученных с шагом счёта T=0,00001с и коэффициентом разряжения 10, т.е. данные первых 0,2с пуска. Результаты показали, что при использовании значительно большего или меньшего числа точек точность модели снижается. Весовые коэффициенты, рассчитанных ПРНС, приведены в табл.1. Отличия значений большинства весовых коэффициентов ПРНС не превышают 5%.

Вывод: Выполненные по полученным уравнениям расчёты и проведенные исследования методом имитационного моделирования математических моделей, показали возможность получения на ПРНС моделей ТАД, обладающих высокой точностью.

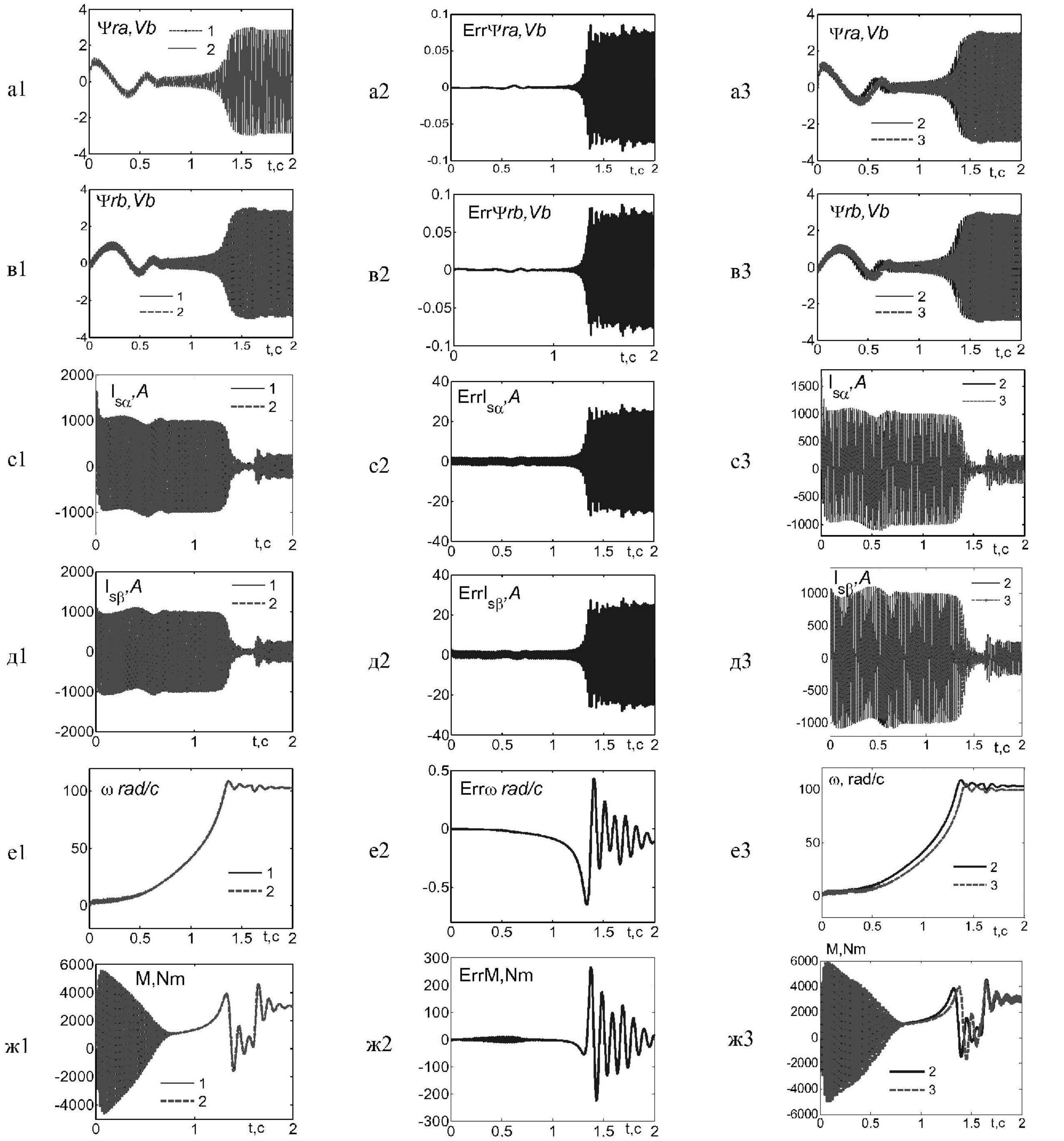

Рис. 3 Диаграммы работы рассчитанных моделей ТАД на ПРНС и на библиотечном блоке системы Matlab.

Литература.

1. Волков А.В., Орловский И.А. Математическая модель многодвигательного частотно-регулируемого асинхронного электропривода дизель-поезда с векторной системой управления// Технічна електродинаміка – Тематичний випуск “Проблеми сучасної електротехніки”, Ч. 6. – 2008. С. 31-36.

2. Хайкин С. Нейронные сети: полный курс, 2-е издание: Пер. с англ. – М.: Издательский дом “Вильямс”, 2006. – 1104 с.

3. Бодянский Е.В., Руденко О.Г. Искусственные нейронные сети: архитектуры, обучение, применения. – Харьков, ТЕЛЕТЕХ, 2004. – 372 с.

4. Орловский И.А., Синявский А.А. Разработка моделей нелинейных электротехнических объектов в виде степенных рекуррентных нейронных сетей. // Радіоелектроніка, інформатика, управління. – 2007. – №1. – С. 128 – 137.

5. Орловский И.А., Синявский А.А. Расчёт моделей тиристорного электропривода постоянного тока на полиномиальных рекуррентных нейронных сетях // Електротехніка та електроенергетика. – 2008. – №2. – С. 7–20.

6. Пивняк Г.Г. Волков А.В. Современные частотно-регулируемые асинхронные электроприводы с широтно-импульсной модуляцией. – Днепропетровск: Национальный горный университет, 2006. – 470с.