

чення магнітної індукції  $B_{\delta}$ , отриманої експериментально [10]. Відносна похибка складає  $6 \div 10$  %.

За отриманими формулами (8), (11) та (15) для даної конструктивної схеми розрахунок показав:

– добротність складала  $\varepsilon = 16,02 \cdot 10^4 \frac{1}{c^2}$ ;

– електромеханічна стала  $T_M = 0,2 \cdot 10^{-3} c$ ;

– електромагнітна стала  $T_{el} = 0,8 \cdot 10^{-4} c$ , що добре узгоджується з даними, отриманими експериментально

(а саме:  $\varepsilon = 10^4 \div 10^5 \frac{1}{c^2}$ ;  $T_M = (0,1 \div 0,5) \cdot 10^{-3} c$ ;

$T_{el} = (0,5 \div 1) \cdot 10^{-4} c$  згідно з [6]).

### Висновок

Отримані в статті формули для розрахунку добротності, електромеханічної та електромагнітних сталих часу дають можливість здійснювати оцінювання основних динамічних показників малопотужних МД на першій стадії проектної моделі двигуна, що є особливо важливим в інженерній практиці при проектуванні ЕМ.

### Перелік посилань

1. Zhang Z., Profumo F., Tenconi A. Axial-flux versus radial-flux permanent-magnet // Electromotion. – 1996. – № 3. – Р. 134–140.

2. Адволоткин Н. П., Вдовиков А. Г., Выплавин Ю. И. и др. Унифицированная серия вентиляльных двигателей с постоянными магнитами ДВУ для станкостроения и робототехники // Электротехника. – 1988. – № 2. – С. 37–40.

3. Овчинников И. Е., Лебедев Н. И. Бесконтактные двигатели постоянного тока. – Л.: Наука. Ленингр. отделение, 1979.

4. Управляемые бесконтактные двигатели постоянного тока / Н. П. Адволоткин, В. Т. Гращенков, Н. И. Лебедев и др. Л.: Энергоатомиздат, 1984.

5. Афонин А. А., Белый П. Н., Фурсенко С. Л. Исследование влияния реакции якоря в линейных магнитоэлектрических двигателях с управляемым токовым слоем // Техническая электродинамика. – 1993. – № 1. – С. 39–41.

6. Васильев Ю. К., Карпенко Б. К., Кравцов О. К., Мурашко В. А., Иванова И. Г. Двигатели постоянного тока с печатной обмоткой якоря // Электропромышленность и приборостроение. – 1964. – № 1.

7. Постников И. М. Проектирование электрических машин. – К.: Гостехиздат, 1960. – 910 с.

8. Чиликин М. Г., Сандлер А. С. Общий курс электропривода. – М.: Энергоиздат, 1981. – 576 с.

9. Столов Л. И., Афанасьев А. Ю. Моментные двигатели постоянного тока. – М.: Энергоиздат, 1989.

10. Афонин А. А., Белый П. Н., Фурсенко С. Л. Магнитное поле в системах с высококоэрцитивными постоянными магнитами // Техническая электродинамика. – 1992. – № 4. – С. 48–53.

Поступила в редакцию 12.05.08 г.

*В статье рассмотрены основные динамические показатели маломощных магнитоэлектрических двигателей дискового типа. Получены расчётные формулы для оценки добротности, электромеханической и электромагнитной постоянных времени на начальной стадии проектирования двигателей.*

*In clause the basic dynamic parameters low-power magnetoelectric of engines of a disk type are considered. The settlement formulas for an estimation of good quality, electromechanical and electromagnetic constant time at an initial stage of designing of engines are received.*

УДК 621.313

И. А. Орловский, А. А. Синявский

## Расчет моделей тиристорного электропривода постоянного тока на полиномиальных рекуррентных нейронных сетях

*Разработаны методики расчета моделей нелинейных объектов на полиномиальных рекуррентных нейронных сетях по известной математической модели и по экспериментальным данным работы объекта. По этой методике составлена программа и выполнен расчет моделей для тиристорного электропривода постоянного тока с двигателем последовательного возбуждения.*

### Введение

Качественное управление электромеханическими объектами (которые, как правило, являются нелинейными и имеют изменяющиеся в процессе работы параметры)

является сложной и актуальной задачей. Исследование и первоначальную отладку новых систем управления (СУ), а также корректировку настройки СУ в процессе работы электромеханических объектов (для обеспечения заданного качества управления) целесо-

© И. А. Орловский, А. А. Синявский 2008 г.

образно выполнять на имитационной математической модели, описывающей с достаточной точностью реальный объект в текущий промежуток времени [1].

Для реализации моделей объектов в последнее время широко используются искусственные нейронные сети (НС), способные обучаться и обладающие возможностями универсальных аппроксиматоров [2, 3]. Универсальность большинства НС достигается за счет использования нелинейных активационных функций нейронов, многослойности сети и большого числа соединений. Необходимая нелинейность также может быть достигнута за счет расширения входного пространства в функционально связанных НС прямого распространения с линейными функциями активации [2].

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 ее параметров можно достигнуть максимально используя уже известную информацию о математической модели объекта. В этом случае перспективно создавать модель на НС со структурой, подобной структуре объекта, что позволяет эмулировать в модели физические процессы, происходящие в объекте. При «прозрачности» модели имеется возможность по весовым коэффициентам НС идентифицировать значения внутренних параметров объекта [4] (что позволяет корректировать параметры СУ), осуществлять анализ работы объекта и его диагностику.

Определение структуры и весовых коэффициентов НС, представляющей модель объекта, можно выполнять следующим образом:

1) если полностью известны структура и внутренние параметры объекта (известна его математическая модель), то НС можно рассчитать прямо по известным данным, (например как в [4, 5]);

2) если известна структура объекта, а внутренние параметры неизвестны, тогда структура НС определяется, исходя из структуры объекта, а весовые коэффициенты находятся по экспериментальным данным работы объекта; в этом случае возможны два варианта:

а) нахождение весовых коэффициентов НС, используя алгоритмы обучения (градиентные или генетические) [2, 3, 6, 7];

б) расчет весовых коэффициентов НС по экспериментальным данным (например, расчет степенных НС [8]);

3) если неизвестны ни структура, ни внутренние параметры объекта, тогда задается НС с заведомо избыточным числом нейронов и связей; поиск минимальной структуры сети и обучение ее весовых коэффициентов выполняется по экспериментальным данным градиентными или генетическими алгоритмами (например, как в [9]).

Из приведенных способов определения весовых коэффициентов НС наиболее быстродействующим является первый – расчет заранее сети по известной математической модели объекта. В этом случае модель реализуется по известным математическим зависимостям и нет необходимости в использовании НС.

Однако, точная математическая модель объекта далеко не всегда известна; кроме того, при изменении параметров объекта во время работы (без применения специальных систем идентификации параметров) точность модели снижается.

Следующим по быстродействию является способ 2, б расчета при известной структуре сети ее весовых коэффициентов из экспериментальных данных. Развитию этого способа посвящена данная работа. Наряду с относительно высоким его быстродействием (обусловленным отсутствием итерационных алгоритмов обучения), полученные модели с высокой точностью описывают нелинейный объект для диапазонов экспериментальных данных, используемых для расчета. Для режимов, когда данные выходят из этих диапазонов, ошибка модели значительно возрастает. Результаты, полученные этим способом, могут быть использованы для механизмов, работающих циклически. Расчет модели выполняется по экспериментальным данным, полученным для всего предшествующего цикла работы механизма. Так как диапазон изменения параметров от цикла к циклу изменяется незначительно, то возможно получить высокую точность модели для последующего цикла работы. По этой модели происходит поиск параметров регуляторов, обеспечивающих при отработке технологического цикла выполнение требуемых критериев настройки (например, минимум потребления энергии, максимальное быстродействие, перерегулирование в заданных пределах, обеспечение допустимой статической ошибки и др.) Для механизмов, не имеющих повторяющихся одинаковых технологических циклов, рассчитанные значения весовых коэффициентов могут быть использованы в дальнейшем при обучении НС, в качестве начальных значений ее весовых коэффициентов (способ 2, а).

В работе [8] предложены степенные рекуррентные НС, позволяющие эмулировать нелинейный объект, характеризующийся нелинейностью параметров только от одного элемента вектора состояния либо вектора входного сигнала. В данной работе разработана методика расчета этих сетей по экспериментальным данным. Результаты проверки моделей, рассчитанных на степенных рекуррентных НС для идеализированных электротехнических объектов, показали их высокую точность. Однако, в реальных электромеханических объектах достаточно часто наблюдается нелинейная связь параметров от различных элементов векторов состояния объекта и входных сигналов. В этом случае модели, выполненные на степенных рекуррентных НС, не способны с необходимой точностью описывать объект, в чем убедились авторы настоящей статьи методом имитационного моделирования.

Представление объекта с нелинейностями от любого числа переменных может быть достигнуто на предлагаемых полиномиальных рекуррентных нейронных сетях (ПРНС). Одним из недостатков сетей с полиномиальным разложением является резкое возрастание числа весовых коэффициентов сети при увеличении степеней полиномов. В работах [10, 11] при построении моделей нелинейных функций или

процессов в виде полиномиального представления Ивахненко А. Г. показана возможность резкого сокращения объема вычислений, достигаемая при отбрасывании части членов полиномов («уравнений регрессии») или при использовании метода группового учета аргумента. Однако, методика расчета таких рекуррентных сетей по экспериментальным данным до настоящего времени не разработана.

Анализ перечисленных выше литературных источников свидетельствует о том, что задача нахождения моделей нелинейных объектов на НС является актуальной, и поэтому в настоящее время ей уделяется большое внимание в научно-технической литературе. При обучении моделей нелинейных объектов на рекуррентных НС с нелинейными функциями активации возникают сложности, связанные с выбором начальных значений весовых коэффициентов и отсутствием «прозрачности» этих НС (поскольку невозможно связать значения сигналов в сети с процессами в реальном объекте, а, следовательно, выполнить последующую идентификацию внутренних параметров объекта) [6, 7]. Возможности полиномиального разложения нелинейных функций рассмотрены только для сетей прямого распространения [2, 10]; востребовано развитие этих идей для сетей с обратными связями. Решение данной задачи степенными рекуррентными НС [7] показало возможность получения высокой точности модели нелинейных объектов, однако – только для ограниченных видов нелинейностей. Результаты, полученные в работах [10, 11], показали необходимость исследования полиномиальных моделей нелинейных объектов с различными степенями полиномов и уменьшенным числом членов полиномов.

**Целью статьи** является, во-первых, разработка по математической модели объекта и по экспериментальным данным методик расчета весовых коэффициентов ПРНС, позволяющей с высокой точностью отображать модель нелинейного объекта, имеющего нелинейности параметров от любого числа элементов векторов состояния и входных сигналов. Во-вторых, разработка программы расчета ПРНС и проверка предложенной методики и аналитических результатов методом математического моделирования на примере расчета модели тиристорного электропривода постоянного тока с двигателем последовательного возбуждения (ТЭП с ДПТПВ).

### Аналитические зависимости для расчета по экспериментальным данным моделей нелинейных объектов на ПРНС

Для вывода общих выражений для расчета весовых коэффициентов ПРНС воспользуемся последовательностью рассуждений, используемых при расчете весовых коэффициентов степенных рекуррентных НС в работе [8]. Пусть объект в пространстве состояний описывается в виде нелинейной системы уравнений

$$\dot{x} = Ax + Bu, \quad (1)$$

где  $x$  – вектор состояния объекта,  $x = [x_1, x_2, \dots, x_q]^T$ ;

$u$  – вектор входных сигналов,  $u = [u_1, u_2, \dots, u_m]^T$ ;  $A$  и  $B$  – нелинейные матрицы, размером  $q \times q$  и  $q \times m$  соответственно. Будем считать, что измеряется весь вектор состояния (тогда выход объекта равен вектору состояния).

В общем случае (теоретически) для нелинейного объекта элементы матриц  $A$  и  $B$  могут быть нелинейными от всех элементов вектора состояния объекта, а также от всех входных (управляющих и возмущающих) воздействий. Каждый нелинейный элемент матриц  $A$  и  $B$  может быть представлен с любой точностью полиномом необходимой степени, составленным из соответствующих переменных. В модели нелинейного объекта необходимо определить все коэффициенты полиномов для каждого нелинейного элемента матриц  $A$  и  $B$ . Расчет коэффициентов полиномов удобно выполнять, представляя модель объекта в виде ПРНС.

Для получения общих выражений для расчета коэффициентов полиномов по экспериментальным данным выполним ряд преобразований. Запишем уравнение объекта (1) в виде:

$$\dot{x} = CY, \quad (2)$$

где  $Y = [x_1, x_2, \dots, x_q, u_1, u_2, \dots, u_m]^T$  – вектор размера  $1 \times K$  (где  $K = q + m$ ), объединяющий векторы состояния объекта и входных сигналов;  $C$  – нелинейная матрица, размером  $q \times K$ , полученная объединением матриц  $A$  и  $B$  с добавлением (конкатенацией) [15] справа к строкам матрицы  $A$  соответствующих строк матрицы  $B$ :

$$C = \begin{bmatrix} a_{11} & a_{12} & \dots & a_{1q} & b_{11} & b_{12} & \dots & b_{1m} \\ a_{21} & a_{22} & \dots & a_{2q} & b_{21} & b_{22} & \dots & b_{2m} \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ a_{q1} & a_{q2} & \dots & a_{qq} & b_{q1} & b_{q2} & \dots & b_{qm} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} c_{11} & c_{12} & \dots & c_{1K} \\ c_{21} & c_{22} & \dots & c_{2K} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ c_{q1} & c_{q2} & \dots & c_{qK} \end{bmatrix}, \quad (3)$$

где  $a_{ij}$ ,  $b_{ig}$ ,  $c_{iv}$  ( $i = 1, \dots, q$ ,  $j = 1, \dots, q$ ,  $g = 1, \dots, m$ ,  $v = 1, \dots, K$ ) – элементы соответственно матриц  $A$ ,  $B$  и  $C$ .

Для удобства описания переобозначим элементы вектора  $Y$  через  $y_i$  (где  $i = 1, \dots, K$ ):

$$Y = [y_1, y_2, \dots, y_K]^T. \quad (4)$$

Модель объекта на ПРНС (рис. 1) строится по раз-

ностным уравнениям этого объекта. При записи уравнения (2) в разностном виде для  $n$ -го такта счета вектор  $Y$  имеет вид:

$$Y_n = [y_{1n}, y_{2n}, \dots, y_{Kn}]^T \quad (5)$$

где  $y_{in} = \begin{cases} x_{in-1}, & \text{для } i=1, 2, \dots, q; \\ u_{jn} (j=i-q), & \text{для } i=q+1, q+2, \dots, K. \end{cases}$

Для расчета ПРНС необходимо найти коэффициенты полиномов заданной степени для всех элементов матрицы  $C$ . В принятых обозначениях элементы  $c_{ij}$  ( $i=1, \dots, q, j=1, \dots, K$ ) могут быть функциями в общем случае от всех элементов  $y_j$  ( $j=1, \dots, K$ ) вектора  $Y$ .

Значения реальных физических сигналов объекта измеряются в различных единицах измерения и могут выражаться числами, отличающимися между собой на порядки и десятки порядков. При этом возникает явление, когда с ростом степеней полиномов (из-за ограничения представления чисел в вычислительной технике) точность описания нелинейностей резко снижается. В этом случае для обеспечения высокой точности модели, созданной на ПРНС, необходимо выполнять нормализацию сигналов, формирующих полиномы. С учетом сказанного необходимо объединяющий вектор  $Y$  представить в нормализованном виде:

$$\bar{Y} = [\bar{y}_1, \bar{y}_2, \dots, \bar{y}_K]^T, \quad (6)$$

где  $\bar{y}_i = y_i / y_{i \max}$  ( $i=1, \dots, K$ ) – нормализованное значение  $i$ -ой переменной вектора  $Y$ ;  $y_{i \max}$  – максимальное по модулю значение переменной  $y_i$  для рассматриваемого режима работы объекта.

В разностном виде уравнение (2) при такте счета  $T$  и вычислении производной из выражения  $\dot{x} = (x_n - x_{n-1})/T$  имеет вид:

$$x_n = x_{n-1} + TCY_n. \quad (7)$$

При расчете ПРНС по известной математической модели объекта, элементы матрицы  $C$  (в общем случае нелинейные) представляются полиномами, по коэффициентам которых определяются весовые коэффициенты ПРНС. Исходя из этого, матрица весовых коэффициентов ПРНС описывается выражением:

$$W = Pol_r(TC) =$$

$$= \begin{bmatrix} Pol_r(Tc_{11}) & Pol_r(Tc_{12}) & \dots & Pol_r(Tc_{1K}) \\ Pol_r(Tc_{21}) & Pol_r(Tc_{22}) & \dots & Pol_r(Tc_{2K}) \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ Pol_r(Tc_{q1}) & Pol_r(Tc_{q2}) & \dots & Pol_r(Tc_{qK}) \end{bmatrix} =$$

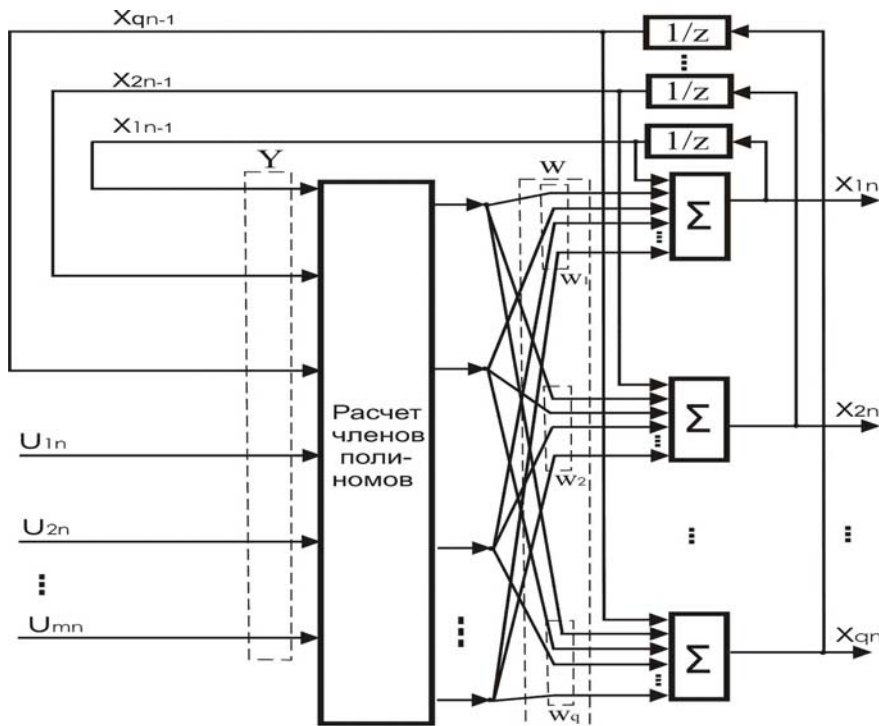


Рис. 1. Общая структура ПРНС для представления модели нелинейного объекта

$$= \begin{bmatrix} w_{11} & w_{12} & \dots & w_{1K} \\ w_{21} & w_{22} & \dots & w_{2K} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ w_{q1} & w_{q2} & \dots & w_{qK} \end{bmatrix}. \quad (8)$$

где  $Pol_r(\cdot)$  – функция, определяющая вектор коэффициентов полинома степени  $r$  для выражения, находящегося в скобках;  $w_{ij} = Pol_r(Tc_{ij})$  – элементы матрицы весовых коэффициентов  $W$ .

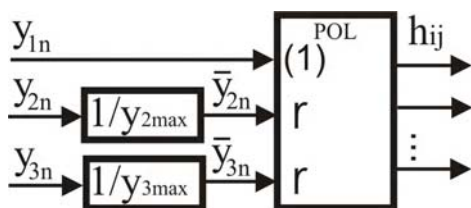


Рис. 2. Полиномиальный блок POL, формирующий для элемента  $c_{ij}$  произведение ненормализованного сигнала  $y_{1n}$  на полиномиальные члены степени  $r$  от нормализованных сигналов  $\bar{y}_{2n}$  и  $\bar{y}_{3n}$

Для удобства описания ПРНС и выполнения дальнейших расчетов воспользуемся полиномиальными блоками POL (рис. 2). Эти блоки формируют произведение (с единичными коэффициентами) полиномиальных членов степени « $r$ » от нормализованных сигналов  $\bar{y}_j$  вектора  $\bar{y}$  на соответствующий ненормализованный сигнал. Внутри блока возле каждого входного сигнала устанавливается число без скобок (например, возле входов  $\bar{y}_{2n}$  и  $\bar{y}_{3n}$  записано « $r$ »), обозначающее, что выходные сигналы блока содержат полиномиальные члены со всеми степенями от 0 до  $r$  переменных  $\bar{y}_{2n}$  и  $\bar{y}_{3n}$ . Сигналы, поступающие на эти входы, нормализуются с помощью блоков нормализации с коэффициентами передачи  $1/y_{i\max}$ . Если число возле входного сигнала находится в скобках (например, запись «(1)» возле входа  $y_{1n}$ ), тогда все полиномиальные члены умножаются на эту переменную  $y_{1n}$  только в той степени, которая указана в скобках. При этом сигналы, поступающие на входы, обозначенные числами в скобках, не нормализуются. Выходы блоков POL обозначим векторами  $h_{ij}$  с такими же индексами, как у элементов векторов весовых коэффициентов  $w_{ij}$  и элементов  $c_{ij}$  матрицы  $C$ . В общем случае при нелинейной зависимости элементов  $c_{ij}$  от всех  $K$  элементов вектора  $\bar{y}$  и степени полинома  $r$ , вектор  $h_{ij}$  определяется следующим образом:

$$h_{ijn} = [\bar{y}_{1n}^0 \bar{y}_{2n}^0 \dots \bar{y}_{K-1n}^0 \bar{y}_{Kn}^0 y_{jn}, \dots, \bar{y}_{1n}^0 \bar{y}_{2n}^0, \dots, \bar{y}_{K-1n}^0 \bar{y}_{Kn}^0 y_{jn}, \bar{y}_{1n}^r \bar{y}_{2n}^0, \dots, \bar{y}_{K-1n}^1 \bar{y}_{Kn}^0 y_{jn}, \dots, \bar{y}_{1n}^r \bar{y}_{2n}^0 y_{jn}, \dots, \bar{y}_{1n}^r \bar{y}_{2n}^r, \dots, \bar{y}_{K-1n}^r \bar{y}_{Kn}^0 y_{jn}]^T. \quad (9)$$

Размерность вектора  $h_{ij}$  равна  $((r+1)^K \times 1)$ . Соответственно размерность вектора  $w_{ij}$ , на который умножается вектор  $h_{ij}$ , равна  $(1 \times (r+1)^K)$ . С учетом приведенных выше обозначений систему уравнений (7) можно представить в следующем виде:

$$x_{in} = x_{in-1} + w_{i1}h_{i1n} + w_{i2}h_{i2n} + \dots + w_{iK}h_{iKn}, \quad (10)$$

$$i = 1, \dots, q$$

или в более компактном виде следующим образом:

$$w_i h_{in} = \Delta x_{in}, \quad i = 1, \dots, q, \quad (11)$$

где  $\Delta x_{in} = x_{in} - x_{in-1}$ ;  $h_{in}$  – векторы-столбцы, полученные добавлением (конкатенацией) соответственно к векторам  $h_{i1n}$  снизу последовательно элементов векторов-столбцов  $h_{i2n}, \dots, h_{iKn}$ ;  $w_i$  – векторы-строки, полученные добавлением соответственно к векторам-строкам  $w_{i1}$  справа последовательно элементов векторов-строк  $w_{i2}, \dots, w_{iK}$ .

Определим число неизвестных коэффициентов полиномиальных зависимостей для общего случая, когда все элементы матрицы  $C$  зависят от всех элементов вектора  $Y$ . Число коэффициентов полинома степени  $r$  для  $K$  сигналов равно:

$$N_{C_{ij}} = (r+1)^K. \quad (12)$$

Число неизвестных коэффициентов полиномов всех элементов матрицы  $C$  определяется из выражения:

$$N_C = q \cdot (q+m) \cdot (r+1)^K. \quad (13)$$

В каждом такте счета, согласно системе уравнений (11), можно составить  $q$  уравнений. Тогда минимальное число тактов счета для определения всех неизвестных весовых коэффициентов ПРНС определяется следующим образом:

$$N_T = (q+m) \cdot (r+1)^K + 1. \quad (14)$$

Для расчета неизвестных коэффициентов ПРНС по экспериментальным данным необходимо иметь количество уравнений, равное или большее числу неизвестных. Для этого выполним измерение входных сигналов и вектора состояния объекта в последовательных ( $M \geq N_T$ ) тактах счета. Тогда каждое из уравнений системы (11) дает  $M$  уравнений:

$$w_i^* h_i^* = \Delta x_{in}^*, \quad (15)$$

где  $w_i^* = [w_i, \dots, w_i]^T$  – вектор с одинаковыми элементами размера  $(M \times 1)$ ;  $h_i^* = [h_{in}, \dots, h_{in-M+1}]$ ,  $\Delta x_{in}^* = [\Delta x_{in}, \dots, \Delta x_{in-M+1}]^T$ .

Если число уравнений равно числу неизвестных коэффициентов ПРНС ( $M = N_T$ ), тогда матрица искомым весовых коэффициентов определяется через обратную матрицу [12].

В реальных условиях работы электромеханических объектов возможны ситуации, когда изменения вектора состояния объекта за такт счета  $T$  не превышает точности измерения датчиков и тогда при количестве  $N_T$  измерений отсутствует обратная матрица. В этом случае число измерений необходимо взять больше  $N_T$  и определение весовых коэффициентов выполнять посредством расчета минимального среднеквадратичного отклонения для всех уравнений с помощью псевдообратных матриц  $(h_i^*)^+$  по выражениям [12]:

$$w_i^* = \Delta x_{in}^* (h_i^*)^+ \quad (16)$$

Обеспечение точной работы модели в первые моменты времени достигается заданием вектора начальных состояний в блоках временных задержек обратных связей ПРНС (рис. 1).

### Расчет по математическому описанию моделей ТЭП с ДПТПВ на ПРНС

В качестве примера рассматривалось построение модели тиристорного электропривода постоянного тока с двигателем последовательного возбуждения. Управление приводом, содержащим тиристорный преобразователь и двигатель постоянного тока, осуществляется изменением напряжения управления  $U_Y$  на входе преобразователя. На привод действует возмущающее воздействие в виде статического момента сопротивления  $M_C$ . Выходными координатами привода являются: напряжение  $U$  на зажимах двигателя (поступающее с выхода преобразователя), якорный ток  $I$  и угловая частота вращения якоря (скорость)  $\omega$  двигателя. Динамика привода при непрерывном якорном токе двигателя описывается системой нелинейных уравнений [13]:

$$\left. \begin{aligned} T_\mu \frac{dU}{dt} + U &= k(U_Y) \cdot U_Y, \\ L(I) \frac{dI}{dt} + I \cdot R_d &= U - c\Phi(I) \cdot \omega, \\ J(\omega) \frac{d\omega}{dt} &= c\Phi(I, D) \cdot I - M_C \end{aligned} \right\} \quad (17)$$

где  $k(U_Y)$  – коэффициент усиления тиристорного преобразователя, зависящий (при линейном опорном напряжении системы импульсно-фазового управления (СИФУ)) от напряжения управления;  $T_\mu$  – усредненное значение постоянной времени тиристорного преобразователя;  $R_d$  – эквивалентное активное сопротивление цепи постоянного тока (в рассматриваемом примере принимаем неизменным);  $L(I)$  – эквивалентная индуктивность цепи постоянного тока, зависящая от тока якоря двигателя;  $c\Phi(I)$  – произведение конструктивной постоянной  $c$  двигателя на значение магнитного потока  $\Phi$  двигателя, зависящего от тока якоря двигателя;  $J(\omega)$  – приведенный к валу двигателя момент инерции привода. Указанный момент инерции привода для ряда механизмов (например, центрифуги, барабанные сушилки, сепараторы) зависит от угловой скорости ротора или от угла поворота ротора (роботы, экскаваторы, устройства, имеющие коленчатый вал и другие).

Для данного объекта вектором состояния является:

$$x = [U, I, \omega]^T; \quad \text{вектором входных сигналов:}$$

$$u = [U_Y, M_C]^T. \quad \text{При этом согласно уравнениям (1) и (17)}$$

матрицы нелинейных коэффициентов  $A$  и  $B$  имеют вид:

$$A = \begin{bmatrix} -T_\mu^{-1} & 0 & 0 \\ L^{-1}(I) & -R_d L^{-1}(I) & -L^{-1}(I)c\Phi(I) \\ 0 & J^{-1}(\omega)c\Phi(I) & 0 \end{bmatrix},$$

$$B = \begin{bmatrix} T_\mu^{-1}k(U_Y) & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & -J^{-1}(\omega) \end{bmatrix}. \quad (18)$$

Весовые коэффициенты ПРНС, исходя из уравнения (8) могут быть вычислены по математической модели ТЭП с ДПТПВ по формуле:

$$W = \begin{bmatrix} POL(-T_\mu^{-1}T) & 0 & 0 & POL(T_\mu^{-1}k(U_Y)T) & 0 \\ POL(L^{-1}(I)T) & POL(-R_d L^{-1}(I)T) & POL(-L^{-1}(I)c\Phi(I)T) & 0 & 0 \\ 0 & POL(J^{-1}(\omega)c\Phi(I)T) & 0 & 0 & POL(-J^{-1}(\omega)T) \end{bmatrix} = \quad (19)$$

$$= \begin{bmatrix} w_{11} & 0 & 0 & w_{14} & 0 \\ w_{21} & w_{22} & w_{23} & 0 & 0 \\ 0 & w_{32} & 0 & 0 & w_{35} \end{bmatrix}.$$

Общая структура ПРНС, соответствующая уравнениям (17)–(19), представлена на рис. 3. Функции активации всех нейронов ПРНС являются линейными и равными единице.

Расчет и исследование моделей на ПРНС выполнялось для ТЭП с ДПТПВ типа МП-62, имеющим следующие параметры:  $U_H = 220B$ ;  $I_H = 260A$  (ПВ = 25%);  $\omega_H = 53,4c^{-1}$ ;  $c = 78,5$ ; номинальное значение магнитного потока  $\Phi_H = 0,048Bб$ ; индуктивность якоря  $L_{\mathcal{A}} = 0,00475$  Гн; индуктивность потоков рассеяния  $L_{\delta} = 0,0037$  Гн; момент инерции ротора двигателя  $J_D = 0,56$  кг·м<sup>2</sup>. Характеристика статической кривой намагничивания двигателя  $\Phi = f(I)$  взята из книги [14]. Для ТЭП приняты параметры:  $T_{\mu} = 0,01$  с;

$R_d = 0,0647$  Ом (при температуре 75°).

В СИФУ тиристорного преобразователя используется опорное напряжение линейной формы, поэтому его коэффициент передачи является нелинейной зависимостью от  $U_y$  и определяется из известного соотношения [13]:

$$k(U_y) = \frac{E_{d0}}{U_y} \sin\left(\frac{\pi}{2} \frac{U_y}{U_{on.max}}\right), \quad (20)$$

где  $E_{d0}$  – максимальное значение электродвижущей силы на выходе преобразователя, определяемое его

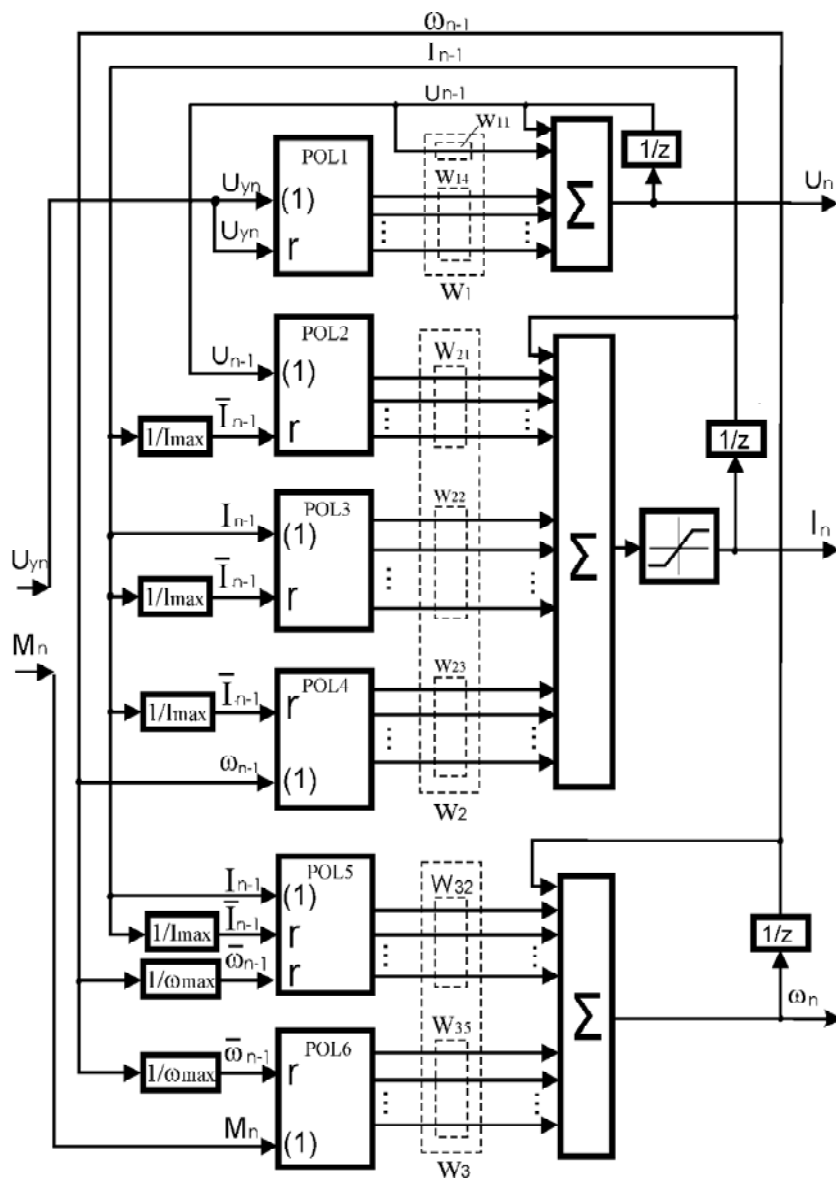


Рис. 3. Структура модели ТЭП с ДПТПВ на ПРНС с использованием полиномиальных блоков

схемой и входным напряжением (при линейном напряжении сети равно 220 В,  $E_{d0} = 297$  В);  $U_{on,max} = 10$  В максимальное значение пилообразного опорного напряжения. Зависимость приведенного момента инерции к валу двигателя от угловой скорости двигателя  $J(\omega)$  зададим в виде следующего аналитического выражения.

$$J = J_D + \frac{0,8}{1 + e^{-0,2|\omega|-5}}, \quad (21)$$

соответствующую центрифугам, сепараторам, барабанам, сушилкам и другим механизмам.

Сигналы на полиномиальных входах нормализовались, для чего устанавливались блоки нормализации с коэффициентами передачи соответственно  $1/I_{max}$  или  $1/\omega_{max}$ , где  $I_{max} = 600$  А и  $\omega_{max} = 50$  рад/с.

Реализация ПРНС в стандартных средствах математического моделирования не предусмотрена, в связи с чем для этого были разработаны три программы в системе Matlab [15]. Одна программа позволяла выполнять расчет весовых коэффициентов ПРНС с произвольным числом входных сигналов и любой длиной вектора состояния объекта, с произвольного места измеряемой последовательности сигналов объекта и на любом заданном числе тактов счета, с произвольной комбинацией степеней сигналов формирующих полиномы. Вторая программа отображала структуру и внутренние соединения ПРНС в виде блоков в па-

кете Simulink системы Matlab и выполняла моделирование динамики рассчитанных ПРНС. Третья программа рассчитывала коэффициенты ПРНС любой степени по заданной нелинейной математической модели объекта.

В третьей программе входными переменными являлись: степень полинома, коэффициенты нормализации, значения аргументов и функций нелинейных характеристик; выходом являлся вектор весовых коэффициентов ПРНС. Для исследования влияния степени полиномов на точность моделей вычислялись коэффициенты для второй и третьей степеней полиномов. В табл. 1 приведены значения весовых коэффициентов ПРНС при представлении нелинейных характеристик полиномами второй степени (цифры показаны жирным шрифтом).

Согласно зависимости (19) элемент  $w_{11}$  является константой, рассчитываемой в виде и равной  $w_{11} = -T_{\mu}^{-1}T = -0,05$ , где  $T = 0,0005$  с. Элементы  $w_{14}$ ,  $w_{21}$ ,  $w_{22}$ ,  $w_{23}$  и  $w_{35}$  представляют собой векторы, состоящие из коэффициентов полиномов, зависящих от одной переменной. Эти полиномы упрощаются до степенных рядов, каждый из которых и имеет общее число коэффициентов, равное  $(2+1)^1 = 3$ . Элемент матрицы  $c_{32}$  зависит от двух сигналов, поэтому число коэффициентов полинома второго порядка равно  $(2+1)^2 = 9$  и, следовательно, содержится такое же количество элементов в векторе  $w_{32}$ .

### Создание имитационных моделей и результаты их исследования

На основе системы уравнений (1) разработана имитационная модель ТЭП с ДПТПВ в системе Matlab [15], структурная схема которой приведена на рис. 4. Блок Preobr реализует модель тиристорного преобразователя. Блоки Induct\_1 и Magnit\_potoc воспроизводят в виде таблиц соответственно нелинейные зависимости обратного значения суммарной индуктивности якорной цепи и магнитного потока двигателя от тока двигателя. Блок Inertia реализует зависимость (21) для приведенного к валу двигателя момента инерции от угловой скорости вала двигателя. На входе преобразователя с помощью блока Zadanie задается изменяющийся сигнал напряжения управления. Блок Moment формирует значения момента сопротивления. Исследовались ПРНС второй и третьей степени, вычисленные по математической модели электропривода и рассчитанные из экспериментальных данных. Блоки PRNN2\_mat и PRNN3\_mat, рассчитанные по уравнению (19), являются моделями ТЭП с ДПТПВ на ПРНС второй и третьей степеней соответственно. Блок PRNN2\_exp, PRNN3\_exp и PRNN3c\_exp являются соответственно ПРНС второй, третьей степени и третьей степени с ограничением суммарной степени членов полинома до трех, вычисленные по экспериментальным данным.

Внутренняя структура блока PRNN2\_exp, выполненная в виде соединений стандартных блоков пакета Simulink, приведена на рис. 5. Блок RNN2\_exp (рис. 5, а) реализует полиномиальную НС прямого распростра-

Таблица 1. Значения весовых коэффициентов ПРНС второй степени, полученных по математической модели ЭП и экспериментальным данным для режимов 1 и 2

Обозначение	ПРНС	Режим	Значения весовых коэффициентов		
$w_{11}$	PRNN2_mat		<b>-0,05</b>		
	PRNN2_exp	1	-0,04972		
	PRNN2_exp	2	-0,0496		
$w_{14}$	PRNN2_mat		<b>2,3389</b>	<b>-0,00927</b>	<b>-0,00771</b>
	PRNN2_exp	1	2,3215	-0,00191	-0,009
	PRNN2_exp	2	2,3353	-0,0035	-0,0037
$w_{21}$	PRNN2_mat		<b>0,0142</b>	<b>8,8e-19</b>	<b>0,1028</b>
	PRNN2_exp	1	0,0098	-0,01273	0,287466
	PRNN2_exp	2	0,0073	0,0522	0,035
$w_{22}$	PRNN2_mat		<b>-0,0009</b>	<b>-5,8e-20</b>	<b>-0,0067</b>
	PRNN2_exp	1	0,001761	-0,03119	0,0864
	PRNN2_exp	2	0,0002	-0,0088	0,0074
$w_{23}$	PRNN2_mat		<b>1,03e-16</b>	<b>-0,2945</b>	<b>-1e-15</b>
	PRNN2_exp	1	-0,01114	0,056152	-1,3273
	PRNN2_exp	2	-0,011	-0,1627	-0,3026
$w_{32}$	PRNN2_mat		<b>-2,5e-18</b>	<b>0,0071</b>	<b>2e-17</b>
	PRNN2_exp	1	0,00039	0,0055	0,0871
	PRNN2_exp	2	0,0008	0,0103	-0,008
-	PRNN2_mat		<b>1,17e-18</b>	<b>-0,0034</b>	<b>-9,6e-18</b>
	PRNN2_exp	1	-0,00427	0,04246	-0,30691
	PRNN2_exp	2	-0,001	-0,0224	0,0162
-	PRNN2_mat		<b>-2,3e-19</b>	<b>0,0007</b>	<b>1,9e-18</b>
	PRNN2_exp	1	0,00668	-0,0794	0,32951
	PRNN2_exp	2	-0,001	0,0153	-0,0107
$w_{35}$	PRNN2_mat		<b>-0,00077</b>	<b>0,00036</b>	<b>-7,1·10<sup>-5</sup></b>
	PRNN2_exp	1	-0,00165	0,002795	-0,0013
	PRNN2_exp	2	-0,001	0,002	-0,0015



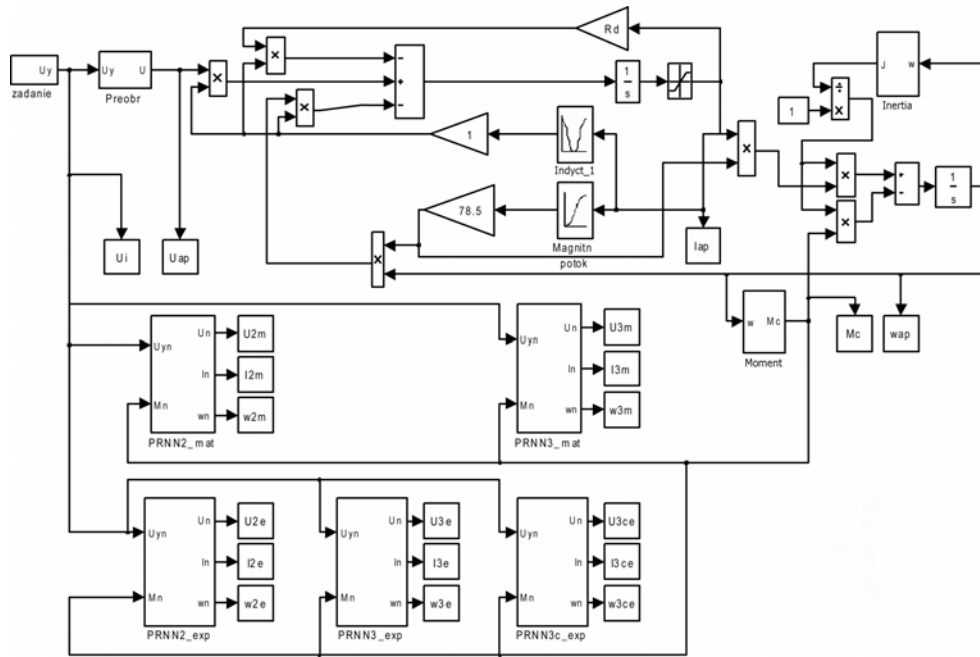


Рис. 4. Общая имитационная модель ТЭП с ДПТПВ и ПРНС

нения с единичными функциями активации. Структура этого блока, генерируемая второй из разработанных программ, приведена на рис. 5, б, где блоки  $\text{norm}_v_1 - \text{norm}_v_5$  нормируют входные сигналы заданными коэффициентами нормализации. Блоки  $\text{neuron}_1 - \text{neuron}_3$  реализуют работу соответственно первого, второго и третьего нейронов. Устройство блока  $\text{neuron}_1$  приведено на рис. 5, в, где блоки  $w_1 - w_4$  являются весовыми коэффициентами ПРНС. Выбор входных сигналов для формирования членов полинома осуществляется блоками  $\text{Demux\_mux1} - \text{Demux\_mux4}$ . Блоками  $\text{const1} - \text{const4}$  задается необходимая степень выбранных сигналов.

Рассчитанные значения весовых коэффициентов ПРНС по экспериментальным данным зависят от режимов работы электропривода и длины последовательности данных, используемых для расчета. Значения весовых коэффициентов, рассчитанных ПРНС второй степени для рассматриваемых режимов работы привода, приведены в табл. 1. Из сравнения результатов в табл. 1 видно, что значения весовых коэффициентов ПРНС второй степени для моделей, рассчитанных по экспериментальным данным для режимов 1 и 2, и найденных из математической модели ЭП, различны. Различия в результатах можно объяснить следующим образом. Во-первых, ПРНС, полученная из математической модели, рассчитана для всего диапазона изменения параметров (координаты привода и входные воздействия), от которых в объекте существуют нелинейные зависимости параметров. Во-вторых, при расчете ПРНС этими методами ставятся разные математические критерии, исходя из которых строятся эти модели. При расчете модели ПРНС по математической модели объекта находятся отдельно весовые коэффициенты для описания нелинейностей отдель-

но каждого элемента матрицы  $C$  по критерию минимизации среднеквадратичной ошибки для всего диапазона изменения входных сигналов. При этом выход каждого нейрона формируется с учетом нескольких элементов матрицы  $C$ . При расчете модели на ПРНС по экспериментальным данным одновременно находятся все весовые коэффициенты одного нейрона, обеспечивающие минимум среднеквадратичной ошибки его выходного сигнала, для конкретного набора экспериментальных данных.

Выполнялся расчет ПРНС по экспериментальным данным, полученным в течение первых двух секунд работы электропривода. Проверяться точность полученной модели на этих и на других данных в течение следующих трех секунд. Рассматривались два режима работы электропривода. В первом режиме координаты электропривода в первые две секунды изменялись в небольшом диапазоне, а проверка работы модели в последующие три секунды выполнялась на данных, изменяющихся в большем диапазоне. Во втором режиме координаты электропривода, используемые для расчета ПРНС, изменялись в большом диапазоне в первые две секунды, а проверка работы ПРНС выполнялась на данных, изменяющихся в этом же диапазоне.

Напряжение управления соответственно для первого и второго режимов и изменения момента сопротивления для этих режимов показано на рис. 6, а и рис. 7, а. На рис. 6, в и рис. 7, в для режимов 1 и 2 соответственно показаны сигналы отработки тока / двигателя, поступающего в блоки  $I_{2m}, I_{3m}, I_{2e}, I_{3e}$  (штриховая линия),  $I_{3ce}$  (пунктирная линия) от нейронных сетей  $\text{PRNN2\_mat}, \text{PRNN3\_mat}, \text{PRNN2\_exp}, \text{PRNN3\_exp}, \text{PRNN3c\_exp}$  соответственно, а также – сигнал, поступающий в блок  $I_{ap}$  от ТЭП с ДПТПВ. На рис. 6, б и рис. 7, б,

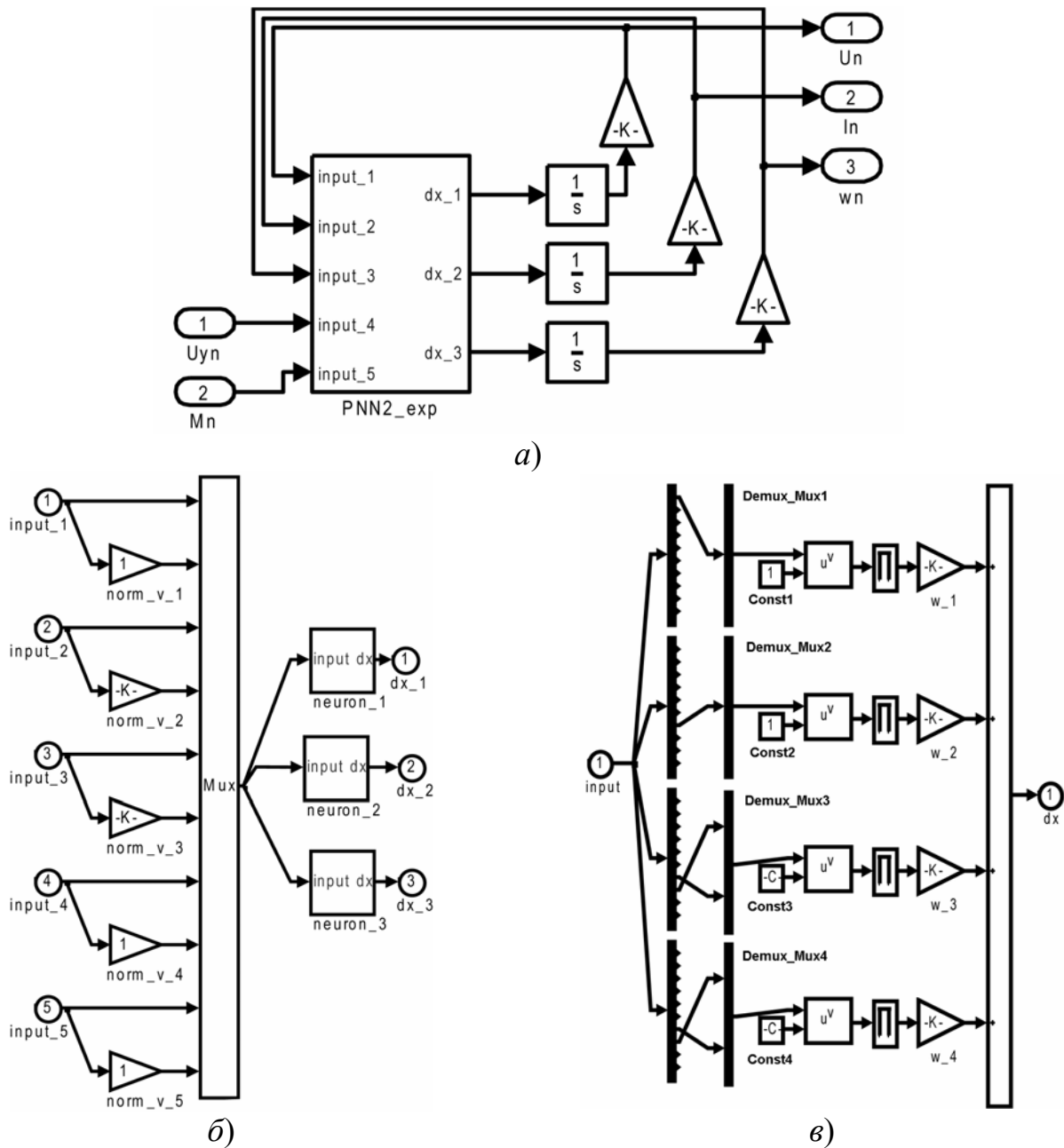


Рис. 5. ПРНС в пакете Simulink системы Matlab

аналогично, показана обработка напряжения  $U$  на выходе преобразователя, а на рис. 6,  $z$  и рис. 7,  $z$  – скорости  $\omega$  двигателя. На рис. 6,  $d$  и рис. 7,  $d$  для режимов 1 и 2 соответственно иллюстрируются ошибки обработки напряжения  $\Delta U$ , тока  $\Delta I$  и скорости  $\Delta \omega$  двигателя нейронными сетями PRNN2\_mat, PRNN3\_mat, PRNN2\_exp, PRNN3\_exp, PRNN3\_exp.

Для сравнения точности рассчитанных моделей в табл. 2 приведены значения максимальных ошибок для двух интервалов времени работы ТЭП ДПТ ПВ: от нулевой до второй секунды и со второй по пятую секунды. Согласно табл. 2 для режима 1 ошибки моделей, вычисленных по экспериментальным данным, в интервале времени со второй по пятую секунды при

изменении входных сигналов в области значений, не встречающихся в расчетах, как правило, превышают ошибки ПРНС, вычисленные по математической модели. Для режима 2 максимальные ошибки моделей, вычисленные по экспериментальным данным, в интервале времени от 2 до 5 с имеют значения, близкие к максимальным ошибкам ПРНС, вычисленным по математической модели объекта. Максимальные значения ошибок для моделей, рассчитанных по экспериментальным данным ЭП в расчетном интервале времени от 0 до 2 с, значительно меньше ошибок ПРНС, вычисленных из математической модели ЭП. Сравнение результатов расчета ПРНС третьей степени с ограничением суммарной степени сигналов,

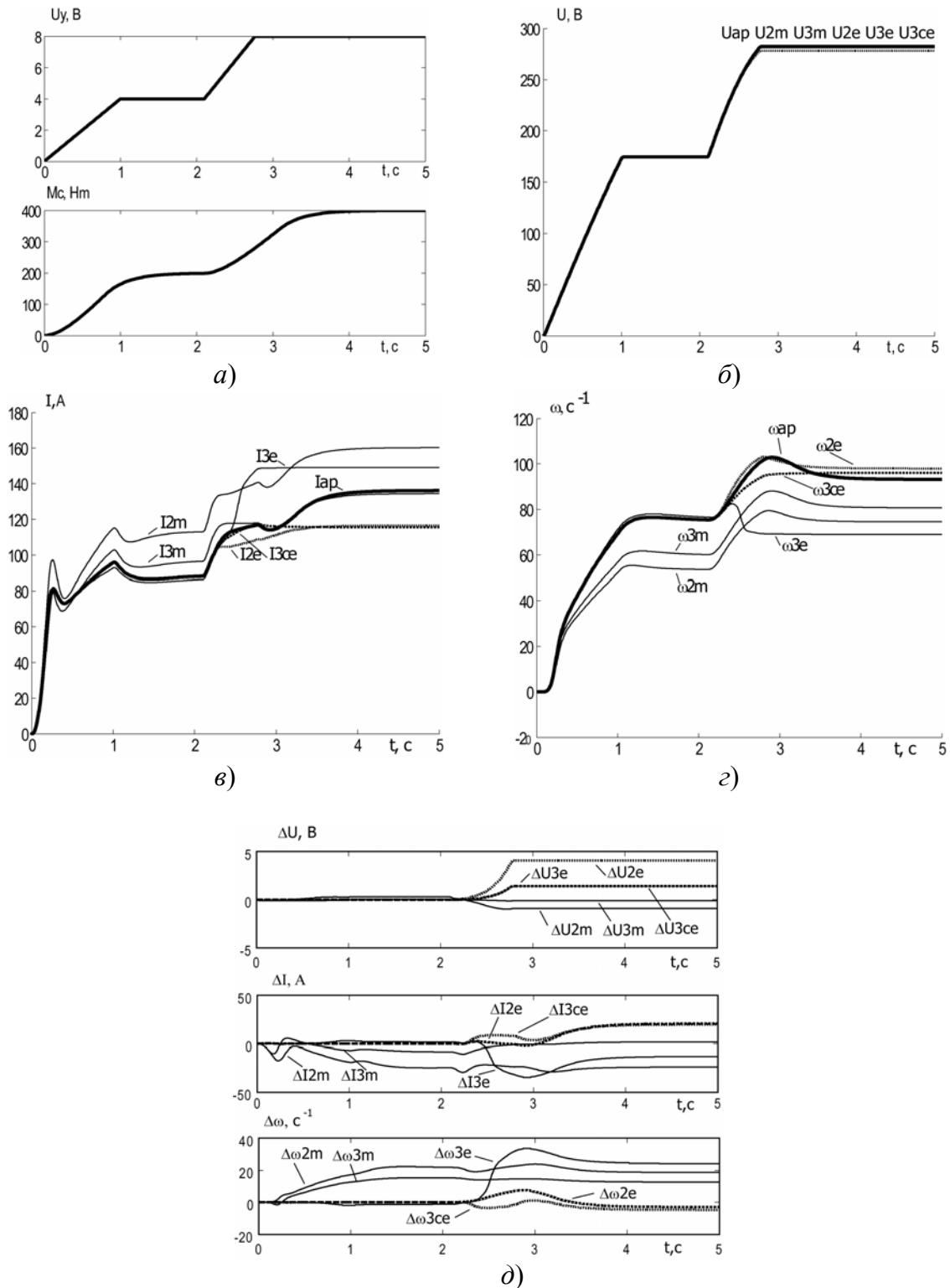


Рис. 6. Результаты расчета и моделирования ТЭП с ДПТПВ и его моделей на ПРНС для режима 1

## Выводы

образующих члены полинома (PRNN3ce), с PRNN3e показало, что наряду с уменьшением числа членов полиномов с 37 до 31, такая сеть обладает более высокой точностью на обоих интервалах времени.

1. Предложенные структуры и полученные аналитические зависимости для расчета ПРНС, представляющих модели нелинейных объектов, подтверждены путем создания с помощью их нелинейных моделей ТЭП с ДПТПВ. Результаты моделирования пока-

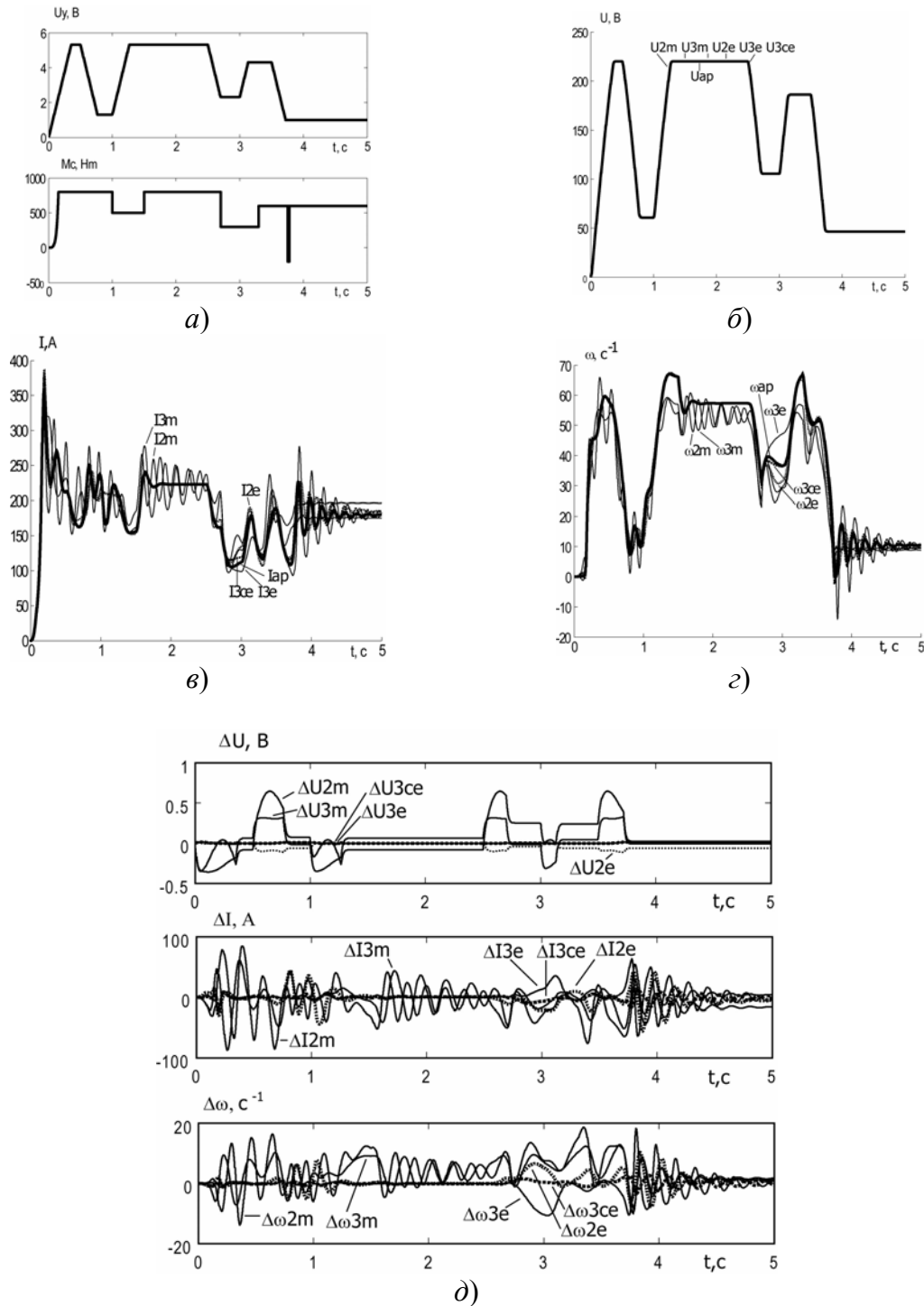


Рис. 7. Результаты расчета и моделирования ТЭП с ДПТПВ и его моделей на ПРНС для режима 2

зали, что для режима 1 максимальные значения ошибок переменных состояния для моделей ТЭП с ДПТПВ на ПРНС третьей степени, вычисленных по математической модели, не превышают 12,5 %. Ошибки в модели ТЭП с ДПТПВ на ПРНС третьей степени, вычисленных по экспериментальным данным, для расчетного интервала времени составляют менее 6,5 % (согласно табл. 2).

2. Как следует из сравнения результатов в режиме 1 и режиме 2 приведенных в табл. 2, точность ра-

боты моделей в интервале времени, не используемом для расчета, зависит от значений измеряемых сигналов в расчетном интервале времени.

3. Сравнение между собой точности моделей PRNN3e с PRNN3ce показало целесообразность использования ПРНС с полиномами, имеющими ограничения суммарной степени входных сигналов (PRNN3ce). Установлено, что с ростом степени ПРНС возрастает точность моделей (согласно табл. 2).

Таблица 2. Значения максимальных ошибок ПРНС

Сте- пень ПРНС	Интер- вал времени	ПРНС	Максимальные ошибки в %					
			Режим 1			Режим 2		
			$U$	$I$	$\omega$	$U$	$I$	$\omega$
2	0-2с	PRNN2_mat	0,14	18,4	21,2	0,3	23,7	25,4
2	2-5с	PRNN2_mat	0,33	22,1	20,2	0,30	20,1	27,6
2	0-2с	PRNN2_exp	0,0018	0,22	0,14	0,05	12,3	11,9
2	2-5с	PRNN2_exp	1,42	14,3	4,52	0,18	15,6	15,6
3	0-2с	PRNN3_mat	0,035	7,35	12,3	0,15	24,6	14,9
3	2-5с	PRNN3_mat	0,053	1,32	12,3	0,15	15,4	19,4
3	0-2с	PRNN3_exp	0,0011	2,2	0,77	0,005	6,42	2,24
3	2-5с	PRNN3_exp	0,504	25,7	32,7	0,005	17,9	27,6
3с	0-2с	PRNN3с_exp	0,0011	0,15	0,13	0,005	6,42	1,94
3с	2-5с	PRNN3с_exp	0,504	15,4	7,21	0,005	4,74	5,22

Перечень ссылок

- Омату С., Халид М., Юсоф Р. Нейроуправление и его приложения. Кн. 2. Пер. с англ. Н. В. Батина. Под ред. А. И. Галушкина, В. А. Птичкина. – М.: ИПРЖР, 2000. – 272 с.
- Бодянский Е. В., Руденко О. Г. Искусственные нейронные сети: архитектуры, обучение, применения. – Харьков, ТЕЛЕТЕХ, 2004. – 372 с.
- Хайкин С. Нейронные сети: полный курс, 2-е издание: Пер. с англ. – М.: Издательский дом "Вильямс", 2006. – 1104 с.
- Орловский И. А. Идентификация внутренних параметров тиристорного электропривода постоянного тока по его моделям на рекуррентных нейронных сетях. // Технічна електродинаміка. – 2007. – № 5. С. 19–24.
- Орловский И. А. Модель электропривода постоянного тока на рекуррентных нейронных сетях. // Радіоелектроніка, інформатика, управління. – 2006. – № 1. – С. 151–159.
- Терехов В. А., Ефимов Д. В., Тюкин И. Ю. Нейросетевые системы управления. Кн. 8: Учеб. Пособие для вузов / Общая ред. А. И. Галушкина. – М.: ИПРЖР, 2002. – 480 с.
- Becerra V. M., Calado J. M. F., Silva P. M., Garces F. System identification using dynamic neural networks: training and initialization aspects. 15<sup>th</sup> Triennial World Congress IFAC, Barcelona, Spain, 2002. – 6 p.
- 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.
- Рутковская Д., Пилиньский М., Рутковский Л. Нейронные сети, генетические алгоритмы и нечеткие системы / Пер. с польск. И. Д Рудинского. – М.: Горячая линия – Телеком, 2004. – 452 с.
- Ивахненко А. Г. Самообучающиеся системы распознавания и автоматического управления. – К.:Техніка, 1969. – 392 с.
- Ивахненко А. Г. Индуктивный метод самоорганизации моделей сложных систем. – К.: Наук. думка, 1981. – 296 с.
- Гантмахер Ф. Р. Теория матриц. – 4-е изд. – М.: Наука. Гл. ред. физ.-мат. лит., 1988. – 522 с.
- Перельмутер В. М., Сидоренко В. А. Системы управления тиристорными электроприводами постоянного тока. – М.: Энергоатомиздат, 1988. – 304 с.
- Андреев В. П., Сабинин Ю. А. Основы электропривода. М.-Л., Госэнергоиздат, 1963, – 772 с.
- Дьяконов В. П. MATLAB 6.0/6.1/6.5+SP1 +Simulink 4/5. Обработка сигналов и изображений. М.: СОЛОН-Пресс, 2005. – 592 с.

Поступила в редакцию 28.05.08 г.

*Розроблені методи розрахунку моделей нелінійних об'єктів на поліноміальних рекурентних нейронних мережах за відомою математичною моделлю та експериментальними даними роботи об'єкта. За цією методикою складено програми та виконано розрахунок моделей для тиристорного електропривода постійного струму з двигуном послідовного збудження.*

*Methods of calculation models nonlinear object on polynomial recurrent neural networks on the known mathematical models and on experimental data of the object work are designed. On this method program is formed and calculation of the model for thyristor electric drive of direct current with engine of series excitation is executed.*