

И.А.Орловский, канд. техн. наук (Запорожский национальный технический университет)

## МАТЕМАТИЧЕСКИЕ МОДЕЛИ ДИЗЕЛЯ И СИНХРОННОГО ГЕНЕРАТОРА ТЯГОВОГО ЭЛЕКТРОПРИВОДА ДИЗЕЛЬ-ПОЕЗДА НА НЕЙРОННОЙ СЕТИ

*Разработаны структуры и получены общие расчётные зависимости для весовых коэффициентов функциональной рекуррентной нейронной сети (ФРНС), предназначенной для представления моделей синхронного генератора и дизеля с системой управления тягового электропривода дизель-поезда по их известной математической модели и по данным режима работы оборудования. Выполнено исследование методом имитационного моделирования разработанных моделей в виде ФРНС и из их весовых коэффициентов идентификация внутренних параметров оборудования.*

*Розроблені структури та отримані загальні розрахункові залежності вагових коефіцієнтів функціональних рекуррентних нейронних мереж (ФРНМ), що призначені для представлення моделей синхронного генератора та дизеля з системою керування тягового електроприводу дизель-потягу за їх відомими математичними моделями та за даними режиму роботи обладнання. Виконано дослідження методом імітаційного моделювання розроблених моделей у вигляді ФРНМ та за їх вагових коефіцієнтів ідентифікація внутрішніх параметрів обладнання.*

Для удовлетворения современных требований к комфорту, скорости движения, экономичности перевозок с 2004 года холдинговая компания “Лугансктепловоз” приступила к разработке и производству новых дизель-поездов (ДП) серии ДЭЛ с асинхронным тяговым электроприводом (АТЭП). Трудности создания надёжной и экономичной системы управления (СУ) такого тягового привода вызваны рядом факторов: сложностью математического описания совместной работы дизеля, генератора и АТЭП; отсутствием математических моделей, с высокой точностью описывающих работу тягового привода в изменяющихся условиях работы ДП и внутренних параметров оборудования.

В научно-технической литературе математические модели узлов тягового привода рассмотрены в ряде работ с различной степенью детализации. Так в [5] подробно рассматривается система регулирования частоты вращения вала дизель-генератора, приводятся общие выражения его математической модели. В [3] показана возможность снижения расхода топлива до 10% тепловоза 2ТЭ116 за счет повышения коэффициента полезного действия дизеля при совпадении тепловозной характеристики дизеля с его экономичной характеристикой. В [1, 6] описано устройство ДП ДЭЛ-02 и математические модели СУ поездом, синхронного генератора (СГ), АТЭП и механической системы с учётом диссипативных сил. В [4, 7] предложена математическая модель усовершенствованной СУ тяговым приводом ДП, часть структурной схемы которой показана на рис. 1. Принцип работы этой системы следующий: сначала машинист запускает дизель до угловой скорости (скорости холостых оборотов) и на выходе СГ возникает соответствующий уровень напряжения. Сигнал задания скорости поезда  $V_{зад}$  от контролера машиниста КМ поступает на векторные СУ каждого асинхронного тягового двигателя. Силовые электрические преобразователи, векторные СУ, асинхронные двигатели и механическая часть ДП обозначена блоком "АТЭП и механическая часть ДП". Датчик мощности ДМ определяет мощность нагрузки дизеля  $P_D$ . Нелинейное звено (НЗ) формирует сигнал корректировки задания скорости дизеля в соответствии с рабочей характеристикой дизеля [7]. При возрастании нагрузки СГ (например, при включении отопления, при трогании поезда с места или движении на гору) увеличивается потребляемый ток, возрастает уровень сигнала  $P_D$ , который НЗ преобразует в сигнал корректировки задания скорости дизеля  $\Delta\omega_D$ , что приводит к увеличению скорости дизеля и его мощности. В такой системе обратная связь по мощности нагрузки СГ определяет необходимую текущую мощность дизеля, что не требует ручного поддержания скорости ДП машинистом и исключает работу дизеля в недогруженном режиме. Для обеспечения экономичной работы дизеля по схемам, предложенным в [4, 7], требуется во время работы подстройка СУ скоростью дизеля при изменении внутренних параметров оборудования.

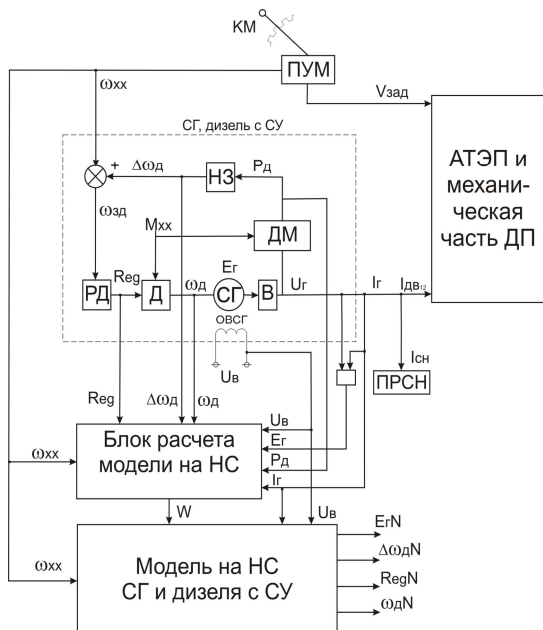


Рис. 1

ния общей модели на НС процессов в дизеле и СГ тягового привода ДП, расчёт этой модели в процессе работы и идентификация внутренних параметров рассматриваемого оборудования из полученной модели является актуальной задачей, решение которой в настоящее время отсутствует.

**Целью статьи** является разработка методики расчёта на рекуррентной НС математической и имитационной моделях СГ и дизеля с СУ в тяговом приводе ДП с усовершенствованным управлением дизеля (как из известных значений внутренних параметров, так и из данных режима работы оборудования), а также идентификация внутренних параметров СГ, дизеля, регулятора скорости дизеля и НЗ из весовых коэффициентов их моделей на НС.

**Математическая модель СГ и дизеля с СУ.** В [7,8] предложена математическая модель усовершенствованной СУ дизелем и СГ. В этой модели используются следующие допущения: момент сопротивления холостого хода на валу дизеля  $M_{XX}$  принимается известным и постоянным; рабочая характеристика дизеля принимается неизменной (не зависит от температуры, качества топлива, износа деталей и других факторов); выпрямление тока идеальное, пульсации тока, вызванные работой выпрямителя и инверторов принимаются равными нулю; принимается в установившемся режиме пропорциональная зависимость ЭДС генератора  $E_G$  от частоты вращения и магнитного потока; передаточные функции дизеля и СГ по возмущению и управлению представляются в виде инерционных звеньев [5].

Управляющим воздействием на дизель является положение  $h_p$  рейки топливного насоса дизеля, возмущающим — момент сопротивления  $M_{CD}$ , выходным сигналом — скорость дизеля  $\omega_D$ . Управляющими сигналами СГ являются скорость дизеля  $\omega_D$  и напряжение возбуждения  $U_B$ , возмущающее воздействие — статорный ток генератора  $I_G$ , выходной сигнал — напряжение на зажимах генератора  $U_G$ . Общую математическую модель дизеля и СГ каждого моторного вагона можно представить в следующем виде [7]:

$$I_G = I_{д12} + I_{CH}, \quad U_G = \frac{\omega_D \cdot k_B \cdot U_B}{T_B p + 1} - I_G R, \quad P_D = (U_G + I_G R) \cdot I_G + M_{XX} \cdot \omega_D, \quad \Delta \omega_D = \frac{k_{H3}(P_D)}{T_{H3} p + 1},$$

$$\omega_{3д} = \omega_{ХХ} + \Delta \omega_D, \quad \omega_{3д} = h_p \cdot k_\mu, \quad M_{CD} = P_D / \omega_D, \quad \omega_D = h_p \frac{k_\mu}{T_\mu p + 1} - M_{CD} \frac{k_\lambda}{T_\lambda p + 1}, \quad (1)$$

где  $k_B$  — коэффициент цепи возбуждения СГ (для упрощения модели принят постоянным);  $T_\mu$  и  $T_\lambda$  — постоянные времени дизеля по управляющему и возмущающему воздействиям соответственно;  $k_\mu$  и

Для реализации моделей объектов в последнее время широко используются искусственные нейронные сети (НС), способные обучаться и обладающие возможностями универсальных аппроксиматоров [2, 13]. Снижения времени поиска структуры модели на НС и внутренних её параметров можно достигнуть, максимально используя уже известную информацию о структуре математической модели объекта. Перспективно создавать модель на рекуррентных НС со структурой, подобной структуре объекта. В [8] разработана общая методика построения моделей нелинейного объекта на полиномиальных рекуррентных НС (ПРНС) по его известной математической модели и исследованы полученные модели методом математического моделирования. Весовые коэффициенты ПРНС могут быть найдены непосредственно расчётом из математической модели объекта [8, 9, 11], поиском с помощью градиентных алгоритмов обучения [10] или расчётом этих коэффициентов из данных режима работы объекта [9–11]. При "прозрачности" модели имеется возможность по весовым коэффициентам НС идентифицировать значения внутренних параметров объекта [11, 12].

Анализ научно-технической литературы показал, что разработка с учётом усовершенствованного управления

$k_\lambda$  – коэффициенты передачи дизеля по управлению и возмущению соответственно;  $\omega_{3Д}$  – задание скорости дизеля;  $\omega_{ХХ}$  – скорость вала дизеля на холостом ходу;  $T_{НЗ}$  – постоянная времени НЗ;  $R$  – активное сопротивление обмотки статора СГ;  $T_B$  – постоянная времени обмотки возбуждения СГ;  $I_{Д12}$  – суммарное значение потребляемых токов двух асинхронных двигателей, приведенные к току СГ;  $I_{СН}$  – ток оборудования собственных нужд. Характеристика НЗ в установившемся режиме  $\Delta\omega_D = k_{НЗ}(P_D)$ , вычисленная из характеристики дизеля [1], приведена в табл. 1 [7].

**Таблица 1**

$P_D$ , кВт	25	45	75	115	160	225	300	430	505
$\Delta\omega_D$ , об/мин	0	150	300	450	600	750	900	1100	1200

Согласно последнему уравнению системы (1), скорость дизеля представлена в виде разности составляющих, вызванных положением рейки топливного насоса  $\omega_h$  и моментом нагрузки дизеля  $\omega_M$

$$\left. \begin{aligned} \omega_D = \omega_h - \omega_M, \quad \omega_h = h_p \frac{k_\mu}{T_\mu p + 1}, \quad \omega_M = M_{сд} \frac{k_\lambda}{T_\lambda p + 1} \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

Второе уравнение системы (2) описывает управление скоростью дизеля без использования регулятора скорости, хотя на практике применяется ПИ регулятор скорости дизеля. Если обозначить выход регулятора скорости переменной  $Re\ g2$ , тогда вместо второго уравнения системы (2), с учётом имеющегося в регуляторе ограничения, используются следующие уравнения:

$$\left. \begin{aligned} \omega_h = \frac{Re\ g2}{T_\mu p + 1}, \quad Re\ g1 = (h_p k_\mu - \omega_D)(k_{II} + k_i/p), \quad Re\ g2 = sat(Re\ g1) \end{aligned} \right\} \quad (3)$$

где  $k_{II}$  и  $k_i$  – пропорциональный и интегральный коэффициенты ПИ регулятора скорости дизеля;  $Re\ g1$  – выход регулятора скорости дизеля до блока ограничения;  $sat()$  – функция ограничения сигнала сверху и снизу. Введение двух переменных  $Re\ g1$  и  $Re\ g2$  необходимо для точного расчёта моделей на НС.

Во втором уравнении системы (1) первым членом является ЭДС генератора  $E_G$

$$E_G = \frac{\omega_D \cdot k_B \cdot U_B}{T_B p + 1} \quad (4)$$

Ограничения задания системы вращения дизеля осуществляются ограничением выхода НЗ. Для осуществления более простой и точной идентификации нелинейности НЗ (табл. 1) обозначим сигнал до ограничения через  $\Delta\omega_{1Д}$ , а сигнал после ограничения – через  $\Delta\omega_{2Д}$ . При этом  $\Delta\omega_{2Д} = \Delta\omega_D$ .

С учётом сделанных обозначений систему (1) представим в следующем виде:

$$\left. \begin{aligned} E_G = \frac{\omega_D \cdot k_B \cdot U_B}{T_B p + 1}, \quad \Delta\omega_{1Д} = \frac{k_{НЗ}(P_D)}{T_{НЗ} p + 1}, \quad Re\ g1 = (h_p k_\mu - \omega_D)(k_{II} + k_i/p), \quad \omega_h = \frac{Re\ g2}{T_\mu p + 1}, \\ \omega_M = M_{сд} \frac{k_\lambda}{T_\lambda p + 1}, \quad \omega_D = \omega_h - \omega_M, \quad P_D = E_G \cdot I_G + M_{ХХ} \cdot \omega_D, \quad I_G = I_{ДВ12} + I_{СН}, \\ \omega_{3Д} = \omega_{ХХ} + \Delta\omega_{2Д}, \quad \omega_{3Д} = h_p \cdot k_\mu, \quad M_{сд} = P_D / \omega_D, \quad Re\ g2 = sat(Re\ g1), \quad \Delta\omega_{2Д} = sat(\Delta\omega_{1Д}). \end{aligned} \right\} \quad (5)$$

Последние два уравнения системы (5) описывают имеющиеся ограничения сигналов. Входными сигналами модели являются:  $U_B$ ,  $I_G$ ,  $\omega_{ХХ}$ . Переменными вектора состояния системы являются:  $E_G$ ,  $\Delta\omega_{2Д}$ ,  $Re\ g2$ ,  $\omega_h$ ,  $\omega_M$ . При вычислении модели из данных режима работы измеряются следующие величины:  $\omega_D$ ,  $I_G$ ,  $\Delta\omega_{2Д}$ ,  $Re\ g1$ ,  $Re\ g2$ ,  $M_{ХХ}$ . Далее считаем известной ЭДС генератора  $E_G$ , которая вычисляется из второй формулы системы (1).

**Расчет модели на НС СГ и дизеля с СУ.** Построение структуры модели на НС выполняется согласно системе уравнений (5), в которой первые пять уравнений являются дифференциальными.

Переменные в этих уравнениях могут быть выражены через входные сигналы, элементы вектора состояния и их производные, используя остальные уравнения системы (5). Для получения модели в дискретном виде преобразуем дифференциальные уравнения из операторной во временную форму записи. Преобразование третьего уравнения системы (5) имеет вид

$$\operatorname{Re} g_1 = (h_P k_\mu - \omega_D) k_\Pi + \int k_i (h_P k_\mu - \omega_D) dt + HY, \quad (6)$$

где  $HY$  – начальные условия интегратора. Продифференцируем полученное выражение

$$\frac{d \operatorname{Re} g_1}{dt} - k_\Pi k_\mu \frac{dh_P}{dt} + k_\Pi \frac{d\omega_{2D}}{dt} = k_i (h_P k_\mu - \omega_D) + \frac{d(HY)}{dt}. \quad (7)$$

С учётом девятого и десятого уравнений системы (5)  $h_P = k_\mu^{-1}(\omega_{XX} + \Delta\omega_D)$ , тогда

$$\frac{dh_P}{dt} = \frac{d[k_\mu^{-1}(\omega_{XX} + \Delta\omega_{2D})]}{dt} = \frac{k_\mu^{-1} d\Delta\omega_{2D}}{dt}. \quad (8)$$

При выводе уравнений (7) и (8) принято, что не изменяются во времени  $\omega_{XX}$ ,  $k_\Pi$  и  $k_\mu$ . В результате система дифференциальных уравнений из системы (5) принимает следующий вид:

$$\left. \begin{aligned} \frac{dE_\Gamma}{dt} &= -\frac{E_\Gamma}{T_B} + \frac{\omega_D \cdot k_B U_B}{T_B}, & \frac{d(\Delta\omega_{1D})}{dt} &= -\frac{\Delta\omega_{1D}}{T_{H3}} + \frac{k_{H3}(P_D)}{T_{H3}}, \\ \frac{d \operatorname{Re} g_1}{dt} &= k_\mu^{-1} k_\Pi \frac{d(\Delta\omega_{2D})}{dt} - k_\Pi \frac{d\omega_D}{dt} + k_\mu^{-1} k_i \omega_{xx} + k_\mu^{-1} k_i \Delta\omega_{2D} - k_i \omega_D + \frac{d(HY)}{dt}, \\ \frac{d\omega_h}{dt} &= -\frac{\omega_h}{T_\mu} + \frac{\operatorname{Re} g_2}{T_\mu}, & \frac{d\omega_M}{dt} &= -\frac{\omega_M}{T_\lambda} + \frac{M_{CD} k_\lambda}{T_\lambda}. \end{aligned} \right\} \quad (9)$$

Из уравнений системы (5) выражение для момента сопротивления имеет вид

$$M_{CD} = \frac{P_\Gamma}{\omega_D} + M_{XX} = \frac{E_\Gamma I_\Gamma}{\omega_D} + M_{XX}. \quad (10)$$

Подставив выражение (10) в пятое уравнение системы (9) и введя обозначения производных

$$D_{\Delta\omega_{Dn-1}} = (\Delta\omega_{2Dn} - \Delta\omega_{2Dn-1})/T, \quad D_{\omega_{Dn-1}} = (\omega_{Dn} - \omega_{Dn-1})/T, \quad (11)$$

получим следующую систему дифференциальных уравнений в разностном виде:

$$\left. \begin{aligned} E_{\Gamma n} &= E_{\Gamma n-1} - \frac{TE_{\Gamma n-1}}{T_B} + \frac{T\omega_{Dn-1} k_B U_{Bn}}{T_B}, \\ \Delta\omega_{1Dn} &= \Delta\omega_{1Dn-1} - \frac{T \cdot \Delta\omega_{1Dn-1}}{T_{H3}} + \frac{Tk_{H3}(P_{Dn-1})}{T_{H3}}, \\ \operatorname{Re} g_{1n} &= \operatorname{Re} g_{1n-1} + Tk_\mu^{-1} k_i \Delta\omega_{2Dn-1} + Tk_\mu^{-1} k_i \omega_{xxn} + Tk_\mu^{-1} k_\Pi D_{\Delta\omega_{Dn-1}} - \\ &\quad - Tk_\Pi D_{\omega_{Dn-1}} - Tk_i \omega_{Dn-1} + HY, \\ \omega_{hn} &= \omega_{hn-1} - \frac{T\omega_{hn-1}}{T_\mu} + \frac{T \operatorname{Re} g_2}{T_\mu}, \\ \omega_{Mn} &= \omega_{Mn-1} - \frac{T\omega_{Mn-1}}{T_\lambda} + \frac{TE_{\Gamma n-1} I_\Gamma k_\lambda}{\omega_{Dn-1} T_\lambda} + \frac{TM_{XX} k_\lambda}{T_\lambda}, \end{aligned} \right\} \quad (12)$$

где  $T$  – такт счёта,  $n$  – номер такта счёта.

Система уравнений (12) имеет пять дифференциальных уравнений и, следовательно [8, 9, 13], её модель на рекуррентной НС имеет 5 нейронов рекуррентного слоя. Нелинейность элементов системы может быть реализована функциональным преобразованием входных сигналов, сигналов вектора состояния и их производных.

При получении моделей нелинейных элементов, имеющихся в математическом описании динамики конкретных объектов, можно поступать следующим образом. Если известно только, от каких величин имеется нелинейность, а математическое описание этой нелинейности не известно, тогда эта нелинейность представляется в виде полинома и может быть реализована на ПРНС. Если из ранее проведённых исследований известна структура математических выражений, описывающих нелинейность элементов, тогда для обеспечения более ясной (близкой к физическому представлению этих нелинейных зависимостей) структуры модели целесообразно не представлять нелинейность полино-

мом, а применить известную структуру математического описания для рассматриваемой нелинейности. В этом случае предлагается представлять модель в виде функциональной рекуррентной НС (ФРНС) (рис. 2). Входом блока функционального преобразования сигналов (рис. 2) является вектор  $Y$ , состоящий из входных сигналов  $u_1, \dots, u_m$  и сигналов вектора состояния  $x_1, \dots, x_q$ . Выходом этого блока является вектор  $h$ . При необходимости возможно объединение рассмотренных выше способов реализации нелинейного элемента, когда одни нелинейности реализуются полиномами, а другие — в виде известных нелинейных зависимостей. Рекуррентная НС, выполненная по такой структуре, как отмечалось выше, может быть названа ФРНС, частным случаем которой является ПРНС. В пакете Simulink структура ФРНС, представляющая модель СГ и дизеля с СУ, согласно системе уравнений (12), показана на рис. 3. Коэффициент НЗ  $k_{H3}$  реализуется на рис. 3 блоком "Calc\_polynom", в котором вычисляется полином

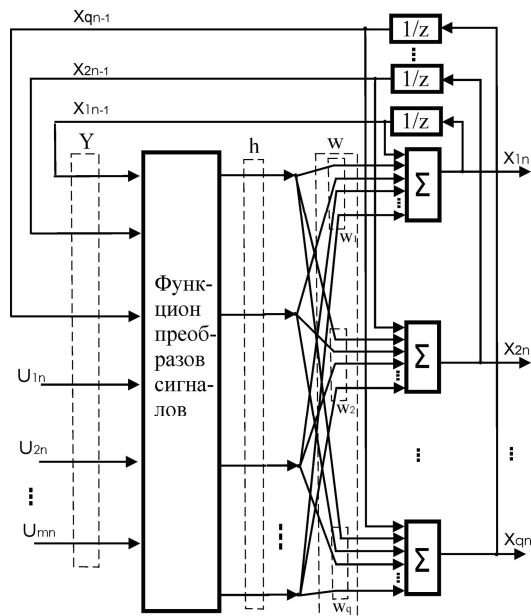


Рис. 2

$$k_{H3}(P_D) = k0_{H3} \cdot P_D^0 + k1_{H3} \cdot P_D^1 + \dots + kr_{H3} \cdot P_D^r, \quad (13)$$

где  $r$  — последний член полиномиального разложения. Блок "Calc\_Pg" вычисляет мощность нагрузки  $P_D$  на валу дизеля.

**Общие выражения расчёта весовых коэффициентов моделей на НС СГ и дизеля с СУ из данных режима работы оборудования.** Для упрощения записи системы уравнений (12) при расчёте весовых коэффициентов ФРНС выполним обозначения присутствующих в уравнениях функциональных преобразований сигналов

$$\begin{aligned} G_{1n-1} &= \omega_{Dn-1} U_{Bn}, & G_{2n-1} &= \Delta\omega_{2Dn-1} + \omega_{XXn}, \\ G_{3n-1} &= E_{\Gamma n-1} I_{\Gamma n} / \omega_{Dn-1}. \end{aligned} \quad (14)$$

Составим вектор  $h_i$ , содержащий известные значения элементов вектора состояния, элементов входных сигналов, их производных и переменные, полученные функциональным преобразованием сигналов, следующим образом:

$$h = [E_{\Gamma}, \Delta\omega_{1D}, \Delta\omega_{2D}, \text{Re } g_1, \text{Re } g_2, \omega_h, \omega_M, U_B, I_{\Gamma}, \omega_{XX}, D_{\Delta\omega_D}, D_{\omega_D}, \omega_D, G_1, G_2, G_3, 1, P_D]. \quad (15)$$

Переменные в дифференциальных уравнениях системы (12) будем размещать в той же последовательности, как и элементы вектора  $h$ . Введём обозначения весовых коэффициентов НС, при этом в обозначении первым индексом является номер уравнения в системе (12), а второй индекс, через запятую, есть номер переменной в векторе  $h$ , согласно табл. 2.

Таблица 2

$E_{\Gamma}$	$\Delta\omega_{1D}$	$\Delta\omega_{2D}$	$\text{Re } g_1$	$\text{Re } g_2$	$\omega_h$	$\omega_M$	$U_B$	$I_{\Gamma}$	$\omega_{XX}$	$D_{\Delta\omega_D}$	$D_{\omega_D}$	$\omega_D$	$G_1$	$G_2$	$G_3$	1	$P_D$
1	2	3	4	5	6	7	8	9	1	11	12	13	14	15	16	17	18

Выражения для вычисления весовых коэффициентов НС согласно системе уравнений (12) с учётом обозначений системы (14) имеют следующий вид:

$$\begin{aligned} w_{1,1} &= -T/T_B, & w_{1,14} &= Tk_B/T_B, & w_{2,2} &= -T/T_{H3}, & w_{i,2,18} &= Tk_{iH3}/T_{H3}, (i=0, \dots, r), \\ w_{3,11} &= Tk_{\mu}^{-1} k_{\Pi}, & w_{3,12} &= -Tk_{\Pi}, & w_{3,13} &= -Tk_i, & w_{3,15} &= Tk_{\mu}^{-1} k_i, & w_{4,5} &= -w_{4,6} = T/T_{\mu}, \\ w_{5,7} &= -T/T_{\lambda}, & w_{5,16} &= Tk_{\lambda}/T_{\lambda}, & w_{5,17} &= Tk_{\lambda} M_{XX}/T_{\lambda}. \end{aligned} \quad (16)$$

С учётом выполненных обозначений система (12) примет вид

$$\left. \begin{aligned}
 E_{\Gamma n} &= E_{\Gamma n-1} + w_{1,1} E_{\Gamma n-1} + w_{1,14} G_{1n-1}, \\
 \Delta \omega_{\Delta n} &= \Delta \omega_{\Delta n-1} + w_{2,2} \Delta \omega_{\Delta n-1} + w_{0,2,18} P_{\Delta n-1}^0 + w_{1,2,18} P_{\Delta n-1}^1 + \dots + w_{r,2,18} P_{\Delta n-1}^r, \\
 \text{Re } g_{1n} &= \text{Re } g_{1n-1} + w_{3,11} D_{\Delta \omega_{\Delta n-1}} + w_{3,12} D_{\omega_{\Delta n-1}} + w_{3,13} \omega_{\Delta n-1} + w_{3,15} G_{2n-1}, \\
 \omega_{hn} &= \omega_{hn-1} + w_{4,5} \text{Re } g_{2n-1} + w_{4,6} \omega_{hn-1}, \\
 \omega_{Mn} &= \omega_{Mn-1} + w_{5,7} \omega_{Mn-1} + w_{5,16} G_{3n-1} + w_{5,17}.
 \end{aligned} \right\} (17)$$

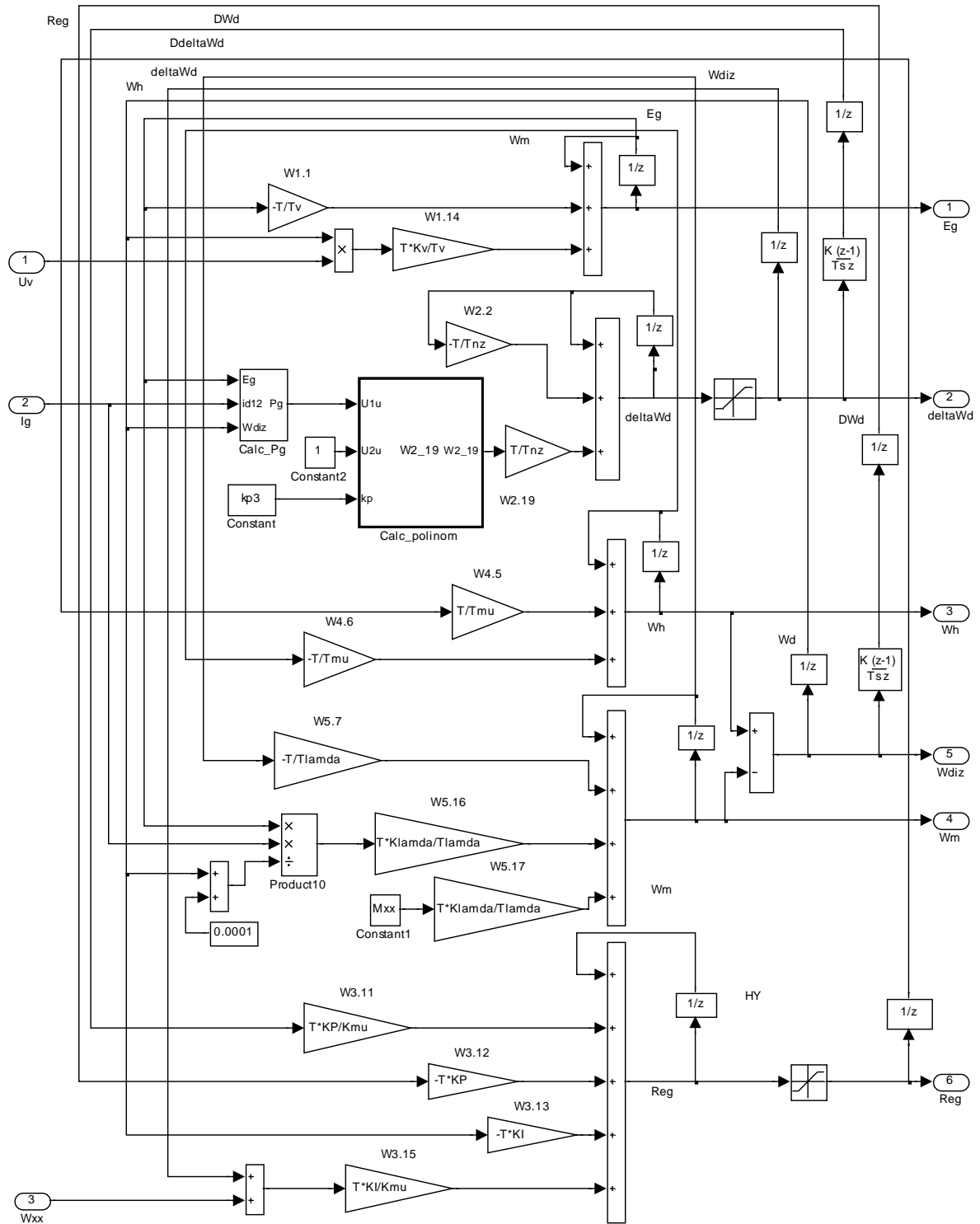


Рис. 3

В системе уравнений (17) элементы вектора состояния, входящие в первое, второе и третье уравнения, измеряются. Поэтому расчёт весовых коэффициентов для первого, второго и третьего нейронов НС может выполняться независимо [10]. Для четвёртого и пятого уравнений невозможно измерить каждые в отдельности значения  $\omega_h$  и  $\omega_M$ , но имеется возможность измерять их разность  $\omega_D = \omega_h - \omega_M$ , т.е. разность выходов двух нейронов. В этом случае расчёт весовых коэффициентов НС (и в дальнейшем её обучение) можно выполнить только при рассмотрении совместной работы этих двух нейронов.

Система уравнений, описывающая совместную работу четвёртого и пятого нейронов, согласно (17) следующая:

$$\left\{ \begin{aligned} \omega_{hn} &= \omega_{hn-1} + w_{4,5} \operatorname{Re} g_{2n-1} + w_{4,6} \omega_{hn-1}, \\ \omega_{Mn} &= \omega_{Mn-1} + w_{5,7} \omega_{Mn-1} + w_{5,16} G_{3n-1} + w_{5,17}, \\ \omega_{Dn} &= \omega_{hn} - \omega_{Mn}, \\ \omega_{Dn-1} &= \omega_{hn-1} - \omega_{Mn-1}. \end{aligned} \right. \quad (18)$$

Для упрощения вычтем из первого уравнения системы (18) второе и, используя третье и четвёртое уравнения, получим

$$\omega_{Dn} = \omega_{Dn-1} + w_{4,5} \operatorname{Re} g_{2n-1} + w_{4,6} \omega_{hn-1} - w_{5,7} \omega_{Mn-1} - w_{5,16} G_{3n-1} - w_{5,17}. \quad (19)$$

Если принять постоянные времени дизеля по управляющему  $T_\mu$  и возмущающему  $T_\lambda$  воздействиям равными друг другу (для рассматриваемого дизеля они одинаковые и равны  $3\text{с}$ ), тогда  $w_{4,6} = w_{5,7}$  и рассматриваемое уравнение имеет вид

$$\omega_{Dn} = \omega_{Dn-1} + w_{4,5} \operatorname{Re} g_{2n-1} + w_{4,6} \omega_{Dn-1} - w_{5,16} G_{3n-1} - w_{5,17}. \quad (20)$$

С учётом уравнения (20) система (17) сводится к четырем уравнениям

$$\left. \begin{aligned} E_{\Gamma n} &= E_{\Gamma n-1} + w_{1,1} E_{\Gamma n-1} + w_{1,14} G_{1n-1} \\ \Delta \omega_{1 Dn} &= \Delta \omega_{1 Dn-1} + w_{2,2} \Delta \omega_{1 Dn-1} + w_{0,2,18} P_{Dn-1}^0 + w_{1,2,18} P_{Dn-1}^1 + \dots + w_{r,2,18} P_{Dn-1}^r, \\ \operatorname{Re} g_{1n} &= \operatorname{Re} g_{1n-1} + w_{3,11} D_{\Delta \omega_{1 Dn-1}} + w_{3,12} D_{\omega_{Dn-1}} + w_{3,13} \omega_{Dn-1} + w_{3,15} G_{2n-1}, \\ \omega_{Dn} &= \omega_{Dn-1} + w_{4,5} \operatorname{Re} g_{2n-1} + w_{4,6} \omega_{Dn-1} - w_{5,16} G_{3n-1} - w_{5,17} \end{aligned} \right\} \quad (21)$$

В системе (21) измеряются все элементы вектора состояния и, следовательно, значения весовых коэффициентов для каждого уравнения этой системы вычисляются независимо. Для получения общего выражения для весовых коэффициентов из данных режима работы оборудования обозначим векторами  $h_{in}$  ( $i = 1, 2, 3, 4$ ) сигналы в системе (21), доступные измерению, согласно формуле (15)

$$\begin{aligned} h_{1n} &= [E_{\Gamma n}, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, G_{1n}, 0, 0, 0, 0]^T, \quad h_{2n} = [0, \Delta \omega_{1 Dn}, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, P_{Dn}^0, P_{Dn}^1, \dots, P_{Dn}^r]^T \\ h_{3n} &= [0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, D_{\Delta \omega_{1 Dn}}, D_{\omega_{Dn}}, \omega_{Dn}, 0, G_{2n}, 0, 0, 0]^T, \quad h_{4n} = [0, 0, 0, 0, \operatorname{Re} g_{2n}, 0, 0, 0, 0, 0, 0, \omega_{Dn}, 0, 0, G_{3n}, 1, 0]^T. \end{aligned} \quad (22)$$

Векторы весовых коэффициентов для этих уравнений следующие:

$$\left. \begin{aligned} w_1 &= [w_{1,1}, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, w_{1,14}, 0, 0, 0, 0], \\ w_2 &= [0, w_{2,2}, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, w_{0,2,18}, w_{1,2,18}, \dots, w_{r,2,18}], \\ w_3 &= [0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, w_{3,11}, w_{3,12}, w_{3,13}, 0, w_{3,15}, 0, 0, 0], \\ w_4 &= [0, 0, 0, 0, w_{4,5}, 0, 0, 0, 0, 0, 0, w_{4,6}, 0, 0, w_{5,16}, w_{5,17}, 0]. \end{aligned} \right\} \quad (23)$$

Вектором состояния для уравнений системы (21) является  $x_n = [E_{\Gamma n}, \Delta \omega_{1 Dn}, \operatorname{Re} g_{1n}, \omega_{Dn}]^T$ . С учётом обозначений (22) и (23) система уравнений (21) запишется следующим образом:

$$w_i h_{in} = \Delta x_{in}, \quad i = 1, 2, 3, 4, \quad (24)$$

где  $\Delta x_{in} = x_{in} - x_{in-1}$ . В первом уравнении системы (21) имеется два, во втором – три, в третьем – четыре и в четвёртом – пять неизвестных весовых коэффициентов. Для работающего дизеля и СГ выполняется число измерений  $M$  входных сигналов и переменных вектора состояния, превышающее число неизвестных. В этом случае каждое из уравнений системы (23) даёт  $M$  уравнений

$$w_i^* h_i^* = \Delta x_{in}^*, \quad (25)$$

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

Определение весовых коэффициентов выполняется расчётом минимального среднеквадратичного отклонения для всех уравнений с помощью псевдообратных матриц  $(h_i^*)^+$  по выражению, аналогичному используемому в работах [9–11]

$$w_i^* = \Delta x_{in}^* (h_i^*)^+ . \quad (26)$$

Если принятое выше условие равенства друг другу  $T_\mu$  и  $T_\lambda$  не выполняется, то расчёт искомым весовых коэффициентов может выполняться численными методами решения системы (17) для имеющихся  $M$  измерений.

**Общие выражения для расчёта внутренних параметров СГ и дизеля с СУ по весовым коэффициентам их моделей на НС.** После получения модели на НС дизеля и СГ из данных режима работы выполняется идентификация их внутренних параметров по весовым коэффициентам НС. Используя уравнения системы (16), значения внутренних параметров вычисляются так:

$$\begin{aligned} T_B &= -T/w_{1,1}, \quad k_B = T_B w_{1,12}/T, \quad T_{H3} = -T/w_{2,2}, \quad k_{H3,i} = T_{H3} w_{i,2,18}/T, \quad (i = 0, \dots, r), \\ k_{II} &= -T/w_{3,12}, \quad k_\mu = T k_{II} / w_{3,11} \text{ либо } k_\mu = T k_i / w_{3,15}, \quad k_i = -T/w_{3,13}, \\ T_\mu &= T/w_{4,5}, \text{ либо } T_\mu = -T/w_{4,6}, \quad T_\lambda = -T/w_{5,7}, \quad k_\lambda = w_{5,16} T_\lambda / T, \quad M_{XX} = w_{5,17} T_\lambda / (T k_\lambda). \end{aligned} \quad (27)$$

Значения параметров  $T_\mu$ ,  $T_\lambda$ ,  $k_\lambda$  и  $k_\mu$  можно использовать для коррекции пропорциональной и интегральной составляющих регулятора скорости дизеля. Значения  $T_{H3}$ ,  $k_{H3}$  и других внутренних параметров позволяют корректировать параметры НЗ для обеспечения работы дизеля на экономичной характеристике. Значения параметров  $T_B$ , и  $k_B$  позволяют корректировать параметры регулятора тока возбуждения СГ (при его использовании).

**Создание имитационных моделей и результаты их исследования.** Исследование разработанных моделей СГ и дизеля с СУ выполнялось в пакете Simulink системы Matlab. Общая структура программы исследования состоит из пяти блоков: блока 1, реализующего модель АД с векторной СУ и механическую часть тягового привода ДП; блока 2, реализующего модель СГ и дизеля с СУ, выполненной согласно системе уравнений (5); блока 3 — модели СГ и дизеля с СУ, выполненной на НС (далее обозначенной НС<sub>НМ</sub>), весовые коэффициенты которой рассчитаны из математических моделей оборудования по выражению (16); блока 4 — модели СГ и дизеля с СУ, выполненной на НС (далее обозначенной НС<sub>Ехр</sub>), весовые коэффициенты которой рассчитаны по формуле (26) из данных режима работы блока 2; блока 5 — программы расчета весовых коэффициентов НС и внутренних параметров оборудования.

При моделировании использовались следующие значения внутренних параметров дизеля 12V183DE и СГ ГС 530У2, установленных на ДП:  $T_\mu = 3с$ ;  $T_\lambda = 3с$ ;  $k_\mu = 1$ ;  $k_\lambda = 0,1 \text{ Н}^{-1} \cdot \text{м}^{-1} \cdot \text{с}^{-1}$ ;  $T_{H3} = 0,01с$ ;  $R = 0,216 \text{ Ом}$ ;  $T_B = 0,5с$ ;  $M_{C0} = 473,2 \text{ Н} \cdot \text{м}$ . Параметры НЗ приведены в табл. 1, значения параметров регулятора скорости дизеля следующие:  $k_{II} = 11,86$ ;  $k_i = 1,98$ . Расчет моделей выполнялся с фиксированным тактом счёта  $T$ , равным 0,001с.

Моделировалась следующая последовательность работы оборудования: разгон дизеля до холостого хода (700 об/мин), включение на второй секунде канала потокосцепления асинхронных двигателей. При достижении заданного значения магнитного потока — подача на АТЭП задания скорости АД (70 рад/сек) и осуществление разгона ДП. При этом дизель увеличивает обороты до максимальных (1900 об/мин). По окончании разгона в момент времени  $t=50с$  обороты дизеля уменьшаются до 1500 об/мин. В момент времени  $t=70с$  увеличивается ток собственных нужд  $I_{CH}$  с 10А до 100А, что приводит к возрастанию оборотов дизеля до 1800 об/мин.

На рис. 4 показаны: результаты отработки вектора состояния СГ и дизеля с СУ блоками 2–4 и ошибки отработки координат — рис. 4,а; ЭДС генератора — рис. 4,б; сигнала корректировки задания скорости дизеля — рис. 4,в; выхода регулятора скорости дизеля — рис. 4,г; составляющих скорости дизеля  $\omega_h$  и  $\omega_m$  (соответственно рис. 4,д и рис. 4,е). Ошибки отработки соответствующих координат объекта моделями НС вычисляются по выражениям

$$\begin{aligned} Err \omega_D NM &= \omega_D - \omega_D NM, & Err \omega_D NE &= \omega_D - \omega_D NE, \\ Err E_\Gamma NM &= E_\Gamma - E_\Gamma NM, & Err E_\Gamma NE &= E_\Gamma - E_\Gamma NE, \\ Err \Delta \omega_D NM &= \Delta \omega_D - \Delta \omega_D NM, & Err \Delta \omega_D NE &= \Delta \omega_D - \Delta \omega_D NE, \\ Err Re g 2 NM &= Re g 2 - Re g 2 NM, & Err Re g 2 NE &= Re g 2 - Re g 2 NE, \\ Err \omega_h NM &= \omega_h - \omega_h NM, & Err \omega_m NM &= \omega_m - \omega_m NM. \end{aligned} \quad (28)$$



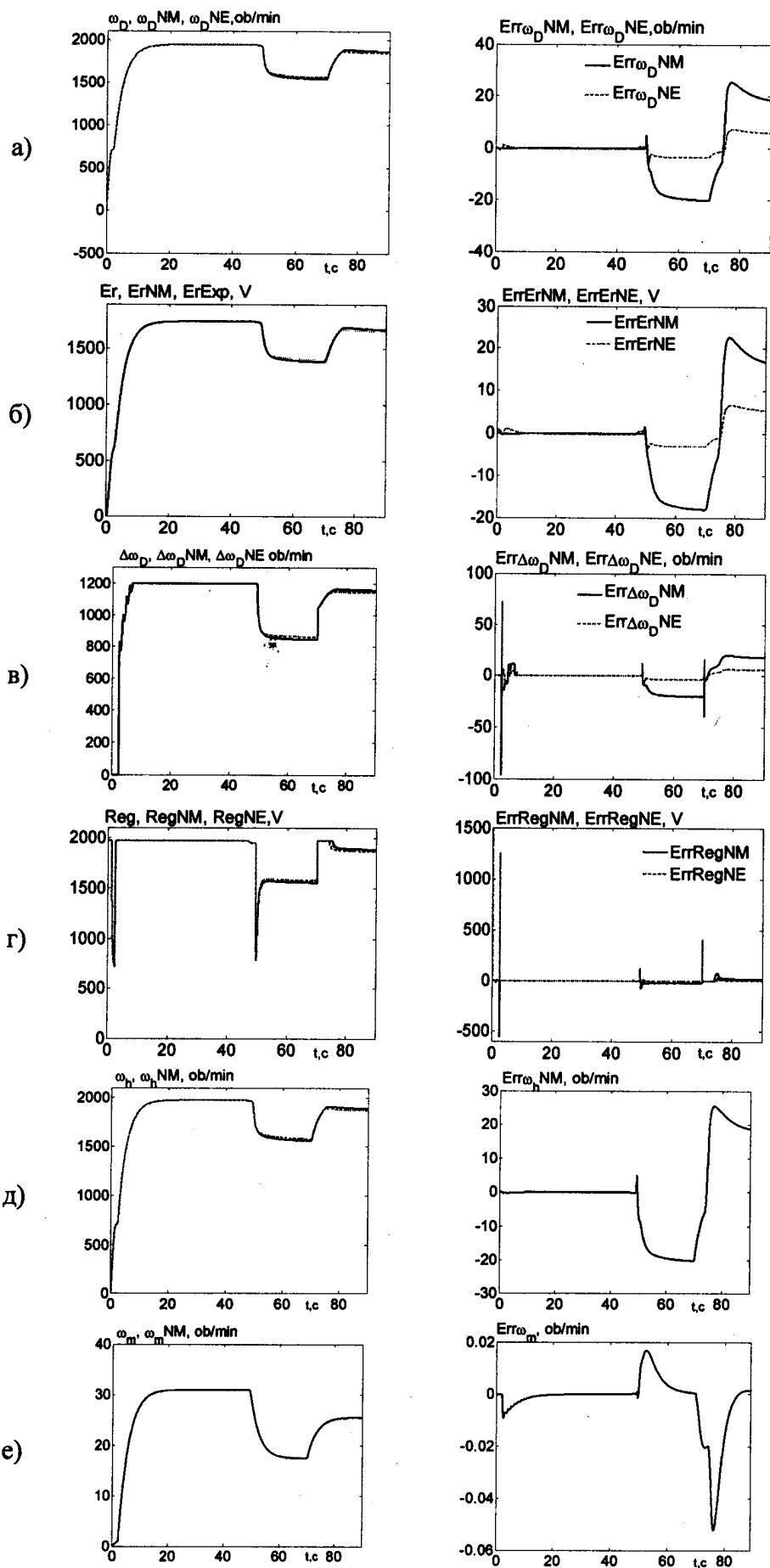


Рис. 4

Из-за отсутствия в программе Matlab букв русского алфавита на графиках рис. 4 и рис. 5 в обозначении индексов сигналов вместо буквы «Д» используется латинская буква «D». В обозначениях выходных сигналов модели HCNM имеются в конце буквы «NM». Для сигналов модели HCExp в конце обозначений имеются буквы «NE». Значения весовых коэффициентов HCNM, рассчитанных по системе уравнений (16), и HCExp представлено соответственно во втором и третьем столбцах табл. 3.

Расчёт весовых коэффициентов HC из данных режима работы оборудования выполнялся для разной длины временного промежутка и в разных начальных точках. На рис. 4 показаны результаты работы HCExp, рассчитанной на 1000 тактах, начиная с 10-го. Из графиков ошибок (правый столбец рис. 4) видно, что результаты работы всех моделей достаточно близкие. Кривые на графиках практически совпадают. Так, при изменении скорости дизеля от 0 до 1900 об/мин максимальные ошибки обработки скорости дизеля моделями HCNM и HCExp составили 25 об/мин и 7 об/мин. Максимальные значения ошибок обработки координат моделями на HC приведены в табл. 4.

По значениям весовых коэффициентов

тов НСExp, приведенным в третьем столбце табл. 3, по формулам (27) выполнена идентификация внутренних параметров объекта. Результаты идентификации приведены в третьем столбце табл. 5. Представление НЗ в HCNM выполнено согласно уравнению (13) в виде полинома третьей степени  $k_{H3\_mat}$ , а в НСExp — полиномом третьей степени  $k_{H3\_Exp}$ , рассчитанного из данных режима оборудования

$$\left. \begin{aligned} k_{H3\_mat} &= -106,2 \cdot P_D^0 + 5,826 \cdot P_D^1 - 0,01066 \cdot P_D^2 + 8,327e-006 \cdot P_D^3, \\ k_{H3\_Exp} &= -88,95 \cdot P_D^0 + 5,598 \cdot P_D^1 - 0,009843 \cdot P_D^2 + 7,471e-006 \cdot P_D^3. \end{aligned} \right\} \quad (29)$$

Таблица 3.

Весов. коэф.	Коэф-ты для HCNM	Коэф-ты для НСExp
w <sub>1,1</sub>	-0,002	-0,0019996
w <sub>1,14</sub>	0,0017895	0,0017855
w <sub>2,2</sub>	-0,1	-0,086741
w <sub>0,2,18</sub>	-10,621	-14,8424
w <sub>1,2,18</sub>	0,58258	0,51976
w <sub>2,2,18</sub>	-0,0010659	-0,0008979
w <sub>3,2,18</sub>	8,3268e-007	6,607e-007
w <sub>3,11</sub>	0,011856	0,011855
w <sub>3,12</sub>	-0,011856	-0,011855
w <sub>3,13</sub>	-0,001976	-0,001976
w <sub>3,15</sub>	0,001976	0,001976
w <sub>4,5</sub>	0,00033333	+0,00033333
w <sub>4,16</sub>	-0,00033333	-0,00033333
w <sub>5,7</sub>	-0,00033333	—
w <sub>5,16</sub>	3,3333e-005	-3,4607e-005
w <sub>5,17</sub>	0,0004386	-0,00060482

Таблица 4.

Элементы вектора состояния	Макс. значе-ние сигнала	Макс. значение ошибки HCNM		Макс. значение ошибки НСExp	
		Абсолютное	Относит., %	Абсолютное	Относит., %
$E_T$ (В)	1800	22	1,22	7	0,4
$\Delta\omega_{2D}$ (об/мин)	1200	20	1,7	5	0,4
Re g 2 (В)	2000	80	4,0	40	2,0
$\omega_h$ (об/мин)	2000	25	1,25	—	—
$\omega_M$ (об/мин)	31	0,02	0,07	—	—
$\omega_D$ (об/мин)	2000	25	1,25	7	0,35

На рис. 5 показаны вычисленные характеристики НЗ: сплошной линией — характеристика НЗ согласно табл. 1; точками — характеристика в виде полинома третьей степени (первое уравнение системы 29); штриховыми линиями — характеристика, вычисленная (идентифицируемая) из данных режима работы оборудования (рис. 5,а — при расчете НСExp на 1000 тактах (второе уравнение системы 29), рис. 5,б — при расчете НСExp на 20000 тактах). Для последнего случая ошибка не превышала 1%. Ошибка идентификации нелинейности объясняется небольшим изменением мощности дизеля в данных, используемых для расчета НС.

Таблица 5

Внутр. параметры	Установл. значения	Расчетные значения из НСExp	Ошибки идентификации, %
$T_\mu$ , с	3	3,0	0
$k_\mu$	1	0,9999	0,1
$k_\lambda / T_\lambda$ , с <sup>-1</sup>	0,0333	0,0346	3,9
$T_{H3}$ , с	0,01	0,0115	15
$T_B$ , с	0,5	0,5001	0,02
$M_{XX}$ , Нм	13,2	17,5	32,6
$k_V$	0,895	0,893	0,21
$k_{II}$	11,856	11,855	0,01
$k_I$	1,98	1,976	0,2

включаются в соответствующие места его модели на НС.

**Заключение.** Предложенные структуры и полученные аналитические зависимости для расчёта ФРНС, представляющих модели нелинейных объектов, подтверждены путём создания с их помощью нелинейных моделей СГ и дизеля с СУ. Результаты моделирования показали, что для НС, вычисленных по математической модели объекта и из данных режима работы оборудования, максимальные ошибки отработки вектора состояния объекта не превышают 4% и 2%, соответственно (табл. 4).

Для обеспечения высокой точности расчёта и "прозрачности" модели на НС объекта, имеющего блоки ограничения сигналов, необходимо измерение сигналов до и после этих блоков. После расчёта НС, имеющиеся в объекте блоки ограничения под-

Ошибка идентификации большинства внутренних параметров объекта по весовым коэффициентам его модели на НС для рассматриваемого примера не превышает 5% (табл. 2).

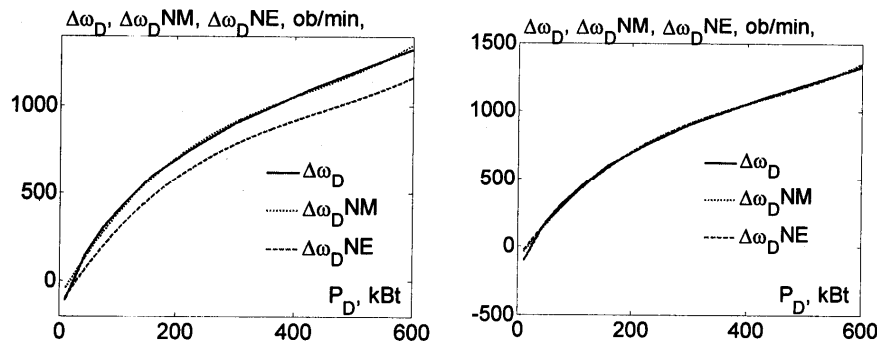


Рис. 5.

1. Басов Г.Г. Прогнозування розвитку дизель-поїздів для залізниць України. – Ч.1–Харків: "Апекс+", 2004. – 240 с.
2. Бодянский Е.В., Руденко О.Г. Искусственные нейронные сети: архитектуры, обучение, применения. – Харьков: ТЕЛТЕХ, 2004. – 372 с.
3. Бычков Д.А. Снижение эксплуатационного расхода топлива тепловозами 2ТЭ116 путем применения микропроцессорной системы управления дизель-генератором. /Дисс. на соиск. уч. степени канд. техн. наук. – М.: РГБ, 2006. – 181 с.
4. Волков А.В., Орловский И.А. Математическая модель многодвигательного частотно-регулируемого асинхронного электропривода дизель-поезда с векторной системой управления// Техн. електродинаміка. Тем. вип. "Проблеми сучасної електротехніки". – 2008. – Ч.6. – С. 31–36.
5. Луков Н.М. Автоматизация тепловозов, газотурбовозов и дизель-поездов. – М.: Машиностроение, 1988. – 272 с.
6. Носков В.И., Дмитриенко В.Д., Заповольский Н.И., Леонов С.Ю. Моделирование и оптимизация систем управления и контроля локомотивов. – Харьков: ХФИ "Транспорт Украины", 2003. – 248 с.
7. Орловский И.А., Страколист Е.В. Математическая модель частотно-регулируемого асинхронного тягового электропривода дизель-поезда с усовершенствованной системой управления //Сб. науч. тр. Днепро-дзержинского гос.техн. ун-та. Тем. вып. «Проблемы автоматизированного электропривода. Теория и практика».– Днепродзержинск: ДГТУ, 2007. – С. 261–264.
8. Орловский И.А. Расчёт моделей нелинейных электромеханических объектов на полиномиальных рекуррентных нейронных сетях из их известных математических моделей // Техн. електродинаміка. – 2009. – №1. – С. 20 – 31.
9. Орловский И.А., Синяевский А.А. Расчёт и обучение моделей нелинейных электромеханических объектов на полиномиальных рекуррентных нейронных сетях// Искусственный интеллект. – 2008. – №3. – С. 579 – 590.
10. Орловский И.А., Синяевский А.А. Расчёт моделей тиристорного электропривода постоянного тока на полиномиальных рекуррентных нейронных сетях // Електротехніка та електроенергетика. – 2008. – №2. – С. 7 – 20.
11. Орловский И.А. Расчёт моделей тягового асинхронного двигателя на полиномиальных рекуррентных нейронных сетях// Вестник НТУ «ХПИ»: Сб. науч. тр. «Проблемы автоматизированного привода. Теория и практика». – Харьков. – 2008. – С. 582–585.
12. Орловский И.А. Идентификация внутренних параметров тиристорного электропривода постоянного тока по его моделям на рекуррентных нейронных сетях. // Техн. електродинаміка. – 2007. – №5. – С. 19 – 24.
13. Хайкин С. Нейронные сети: полный курс / 2-е издание: Пер. с англ. – М.: Издательский дом "Вильямс", 2006. – 1104 с.

Надійшла 06.04.09