

**В. И. НОСКОВ**, канд. техн. наук,  
**Н. И. ЗАПОЛОВСКИЙ**, канд. техн. наук,  
**Н. В. МЕЗЕНЦЕВ**

## **МОДЕЛИРОВАНИЕ САР ЭЛЕКТРОПЕРЕДАЧИ ДИЗЕЛЬ-ПОЕЗДА С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ НЕЙРОННЫХ СЕТЕЙ**

Розглянуті питання використання штучних нейронних мереж для розробки моделей компонент енергетичної системи дизель-потягу та системи регулювання на основі нейроконтролеру. Надаються моделі розроблених пристроїв та результати їх дослідження.

The Considered questions of the use artificial neuron networks for development of the models component energy system diesel-train and syntheses of the system of the regulation on base of the neuron controller. Happen to the models designed device and results of their study.

**Постановка проблемы.** Задачам исследования с помощью моделирования сложных энергетических объектов, к которым можно отнести электропередачу дизель-поезда и системы ее автоматического регулирования (САР), обеспечивающие функционирование объекта согласно заданных критериев качества, посвящено значительное число публикаций [1–7]. В последние годы решение подобных задач предлагается выполнять с помощью прогрессивных информационных технологий на основе искусственных нейронных сетей [8, 9]. До последнего времени применение подобных технологий было проблематично из-за отсутствия ПЭВМ, обладающих высоким быстродействием и соответствующим объемом оперативной памяти для организации процесса моделирования, а также накопления и хранения информации, получаемой в результате моделирования для последующей обработки, анализа, выработки и принятия решений в реальном масштабе времени. Однако появление ПЭВМ с большим быстродействием и объемом оперативной памяти, а также специализированных пакетов моделирования, содержащих программы для работы с нейросетевыми технологиями, позволяют по-новому решать комплекс вопросов по моделированию сложных энергетических объектов, описываемых в общем случае системами нелинейных дифференциальных уравнений высокого порядка, а также вопросы анализа и синтеза систем управления, оптимизирующих работу исследуемых объектов.

**Анализ литературы.** Вопросами моделирования сложных энергетических объектов, к которым относится электропередача дизель-поезда с асинхронным тяговым электроприводом, впервые созданном на Украине, а также проблемам синтеза оптимальных систем управления и их структурных компонент в виде отдельных контуров САР, посвящено

значительное число работ [2, 4–7]. Трудности использования традиционных подходов при решении указанных задач вызывают у специалистов постоянное стремление к поиску новых методов и технологий решения этих задач. Результаты исследований, приведенные в работах [8, 9] по моделированию объектов, описываемых системами нелинейных дифференциальных уравнений высокого порядка, дают основание ожидать, что применение нейросетевых технологий при разработке моделей и САР позволит по-новому решить комплекс вопросов, связанных с анализом и синтезом систем управления энергетической системой создаваемого дизель-поезда.

**Целью статьи** является адаптация известных архитектур нейронных сетей для построения моделей компонент структуры САР энергетической системы дизель-поезда, в частности, моделей блока «синхронный генератор – выпрямитель» с его системой автоматического регулирования, обеспечивающих определение структуры и параметров синтезируемой системы управления, функционирующей согласно заданного критерия качества.

**Решение задачи создания моделей.** При решении задач анализа и синтеза систем управления одной из первоочередных задач является задача разработки модели исследуемого объекта и создания САР, функционирующей согласно заданного критерия качества. В нашем случае объектом исследования является блок «синхронный генератор – выпрямитель» и его САР, состоящая из ряда аналогичных каналов регулирования, каждый из которых выполняет определенные функции (ограничение максимально допустимого тока нагрузки генератора, поддержание постоянства мощности, ограничение максимально допустимого напряжения). САР объекта управления представляет собой структуру, изменяющуюся в процессе функционирования в зависимости от сложившихся эксплуатационных условий (режимов ведения поезда, нагрузки и т.п.), изменяются и параметры структуры САР (например, постоянные времени задатчиков интенсивности каналов регулирования). В соответствии с этим решение вопросов, связанных с моделированием как самого объекта управления, так и его САР, представляется целесообразным осуществить с помощью искусственных нейронных сетей.

Математическую модель блока «синхронный генератор – выпрямитель» можно представить совокупностью моделей синхронного генератора (СГ) и выпрямителя (В).

В соответствии с общепринятыми допущениями математическую модель СГ, представляющего собой идеализированную явнополюсную синхронную машину, имеющую на роторе обмотку возбуждения и по одному короткозамкнутому контуру в продольной и поперечной осях, в координатной

системе  $d, q$  можно представить следующей системой дифференциальных уравнений [1]:

$$\begin{aligned}\frac{d\Psi_d}{dt} &= -i_d \cdot r + w_r \cdot \Psi_q + U_d; \\ \frac{d\Psi_q}{dt} &= -i_q \cdot r + w_r \cdot \Psi_d + U_q; \\ \frac{d\Psi_b}{dt} &= -i_b \cdot r_b + U_b; \\ \frac{d\Psi_{gd}}{dt} &= -i_{gd} \cdot r_{gd}; \\ \frac{d\Psi_{gq}}{dt} &= -i_{gq} \cdot r_{gq},\end{aligned}\tag{1}$$

где  $\Psi_d, i_d, \Psi_q, i_q, \Psi_b, i_b, \Psi_{gd}, i_{gd}, \Psi_{gq}, i_{gq}$  – соответственно потокосцепления и токи обмоток: статора (по осям  $d$  и  $q$ ), возбуждения и демпферных (по осям  $d$  и  $q$ );  $r, r_b, r_{gd}, r_{gq}$  – активные сопротивления обмоток статора, возбуждения и демпферных (по осям  $d$  и  $q$ );  $w_r$  – угловая частота вращения ротора.

Учет насыщения магнитной цепи в явнополюсных синхронных машинах обычно производится только по продольной оси. Для этого в выражениях для потокосцеплений индуктивное сопротивление реакции якоря по продольной оси представляют как функцию продольной составляющей потокосцепления в воздушном зазоре  $\Psi_{\delta}$ . В этом случае выражения для потокосцеплений контуров синхронной машины по продольной оси имеют следующий вид:

$$\Psi_d = X_r \cdot i_d + \Psi_{\delta l};\tag{2}$$

$$\Psi_b = X_{rb} \cdot i_b + \Psi_{\delta l};\tag{3}$$

$$\Psi_{gd} = X_{rgd} \cdot i_{gd} + \Psi_{\delta l};\tag{4}$$

$$\Psi_{\delta l} = X_{\delta l} (i_d + i_b + i_{gd});\tag{5}$$

$$X_{\delta l} = f(\Psi_{\delta l}),\tag{6}$$

где  $X_r, X_{rb}, X_{rgd}$  – соответственно сопротивления рассеяния обмоток статора, возбуждения и демпферной по оси  $d$ ;  $X_{\delta l}$  – сопротивление реакции якоря по продольной оси [6].

В результате решения системы уравнений (1) с учетом выражений (2) – (6) определяются токи статорной обмотки по осям  $d$  и  $q$  –  $i_d$  и  $i_q$ . Фазные токи СГ  $i_{AG}, i_{BG}, i_{CG}$ , являющиеся задающим воздействием для

математической модели неуправляемого трехфазного выпрямителя, получаются с помощью линейных преобразований:

$$i_{A\Gamma} = i_d \cdot \cos \gamma - i_q \cdot \sin \gamma; \quad (7)$$

$$i_{B\Gamma} = i_d \cdot \cos(\gamma - 2\pi/3) - i_q \cdot \sin(\gamma - 2\pi/3); \quad (8)$$

$$i_{C\Gamma} = -i_{A\Gamma} - i_{B\Gamma}; \quad (9)$$

$$\gamma = \int_0^t \omega_r dt + \gamma_0, \quad (10)$$

где  $\gamma_0$  – значение угла при  $t = 0$ .

Напряжения возмущения  $U_d$  и  $U_q$  определяются согласно выражений:

$$U_d = \frac{2}{3} \left[ U_{A\Gamma} \cos \gamma + U_{B\Gamma} \cos(\gamma - 2\pi/3) + U_{C\Gamma} \cos(\gamma + 2\pi/3) \right]; \quad (11)$$

$$U_q = -\frac{2}{3} \left[ U_{A\Gamma} \sin \gamma + U_{B\Gamma} \sin(\gamma - 2\pi/3) + U_{C\Gamma} \sin(\gamma + 2\pi/3) \right], \quad (12)$$

где  $U_{A\Gamma}, U_{B\Gamma}, U_{C\Gamma}$  – фазные напряжения СГ, получаемые с помощью преобразователя, формирующего эти напряжения на основе фазных токов СГ.

Реализация математической модели, заданной системой дифференциальных уравнений (1) и уравнениями (2) – (12) с использованием современных пакетов прикладных программ, например пакетов VisSim, MATLAB, не вызывает особых затруднений. Она сводится к построению структуры модели из имеющейся библиотеки блоков того или иного пакета и расчета параметров модели.

В ряде случаев, как это отмечается в работе [2], моделирование блока «синхронный генератор – выпрямитель» можно осуществить, используя его нагрузочные характеристики, представленные на рис. 1.

Способность искусственных нейронных сетей, обученных на некотором множестве данных, выдавать правильные результаты для достаточно широкого класса новых данных является весьма весомым аргументом для построения моделей различных систем. В данном случае это свойство нейронной сети как нельзя кстати подходит для создания модели блока «синхронный генератор – выпрямитель» по нагрузочным характеристикам. При этом работа модели заключается в следующем: на вход подаются токи возбуждения  $I_B$  и нагрузки  $I_d$ , на выходе должно формироваться выпрямленное напряжение  $U_d/n_\delta$ , значение которого соответствует графикам нагрузочных характеристик (рис. 1). Причем сеть должна работать не только на тренировочных шаблонах, но и выполнять поставленную задачу на всех допустимых значениях входных сигналов.

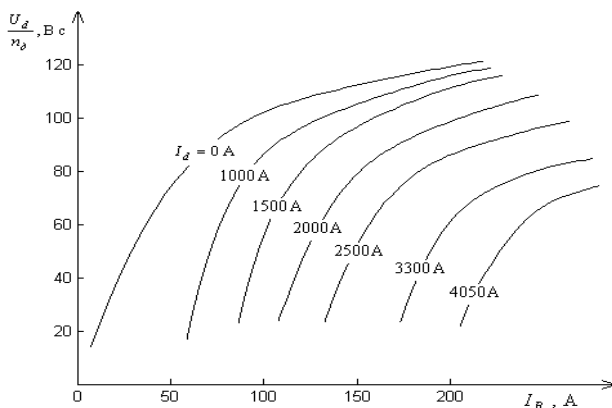


Рис. 1. Нагрузочные характеристики СГ

Для построения модели выбрана многослойная нейронная сеть прямой передачи сигналов с двумя нейронами во входном слое (количество входов), двумя скрытыми слоями и одним нейроном в выходном слое. Для нейронов скрытых слоев использовались нелинейные сигмоидальные функции активации нейронов.

В результате моделирования найдено оптимальное число нейронов для первого и второго скрытых слоев сети, соответственно 10 и 15 нейронов. Для обучения сети использовались данные рис. 1.

Погрешность воспроизведения характеристик во всем рабочем диапазоне с помощью нейронной сети не превышала 1,5%, что лучше, чем у моделей, реализованных традиционным способом.

Система автоматического регулирования служит для формирования управляющего воздействия  $U_{УГ}$  по возбуждению. Формирование сигнала  $U_{УГ}$  с учетом обеспечения динамических показателей системы осуществляется путем включения в контур регулирования устройств, функционирующих согласно определенных алгоритмов, таких как пропорциональных, интегральных, пропорционально-интегральных или более сложных, если нельзя достичь заданных показателей путем применения одного из названных алгоритмов. В случае применения пропорционально-интегрального закона управления (алгоритма) формирование величины  $U_{УГ}$  может быть осуществлено на основании соотношения:

$$U_{УГ} = (U_{Г} - U_{ЗГ1}) \left( K_1 + \frac{1}{T_1 p} \right), \quad (13)$$

где  $U_{\Gamma}$  – напряжение генератора;  $K_1$  – коэффициент усиления пропорциональной составляющей;  $T_1$  – постоянная времени интегрирования;  $p$  – оператор Лапласа.

Величина  $U_{3\Gamma}$  формируется с использованием блока задатчика интенсивности, обеспечивающего темп нарастания соответствующего сигнала в переходном режиме:

$$U_{3\Gamma} = U_{3\Gamma} \frac{1}{T_2 p}, \quad (14)$$

где  $U_{3\Gamma}$  – входной сигнал задатчика интенсивности;  $T_2$  – постоянная времени.

В общем случае величина  $T_2$  является нелинейной функцией, зависящей от скорости изменения входного сигнала.

Связь между сигналом управления  $U_{\text{УГ}}$  и сигналом задания  $U_{\Gamma}$  на основании уравнений (13) и (14) описывается передаточной функцией вида:

$$W_1(p) = \frac{T_1 T_2 p^2}{T_1 T_2 p^2 + K_1 T_1 p + 1}. \quad (15)$$

При исследовании САР, описываемой уравнениями (13) и (14), исходя из вида передаточной функции (15), с целью уточнения ее структуры и параметров, в первом приближении построения модели нейроконтроллера, можем воспользоваться передаточной функцией вида:

$$W_2(p) = \frac{K}{T^2 p^2 + 2T\varepsilon p + 1}, \quad (16)$$

где  $K = T_1 T_2$ ;  $T = \sqrt{T_1 T_2}$ ;  $\varepsilon = \frac{K_1 T}{2T_2}$ .

Используя передаточную функцию САР объекта управления (16), можем составить систему дифференциальных уравнений вида:

$$\begin{cases} \dot{X}_1 = X_2, \\ \dot{X}_2 = (-2T\varepsilon X_2 - X_1 + KU)/T^2, \end{cases} \quad (17)$$

где  $X_1$  – выходной сигнал объекта управления (в нашем случае  $U_{\Gamma}$ );  $U$  – формируемый сигнал управления (в нашем случае  $U_{\text{УГ}}$ ).

Как отмечалось выше, структура САР СГ содержит три аналогичных канала, описываемых однотипными уравнениями вида (13) и (14), каждый из которых включается в работу при определенных условиях. К тому же, в зависимости от условий эксплуатации, необходимо осуществлять некоторую подстройку параметров схем САР каждого из каналов. При условии создания

модели САР с использованием нейросетевых технологий, обобщенную структуру такой модели можно представить в виде, изображенном на рис. 2.

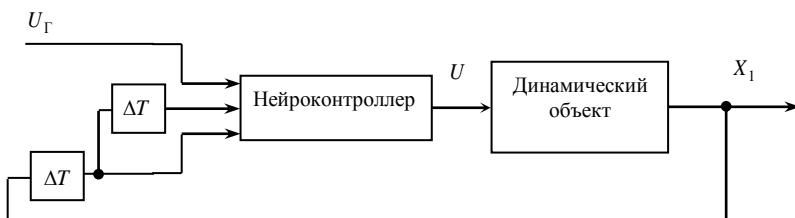


Рис. 2. Обобщенная структура модели САР для одного канала

Здесь в качестве динамического объекта выступает модель СГ и его САР, описываемая уравнениями (13) и (14). В качестве нейроконтроллера выбран перцептрон – прямо направленная нейронная сеть. Структура нейроконтроллера: три ретранслирующих узла на входе сети, пять узлов с сигмоидальными активационными функциями в скрытом слое и один выходной нейрон, задающий изменение напряжения генератора с помощью сигнала управления  $U$ . На входные нейроны поступает сигнал задания  $U_{Г}$  и выходной сигнал  $X_1$ , снимаемый с выхода объекта, задержанный на один и два такта ( $\Delta T$ ). При исследованиях, в качестве сигнала задания  $U_{Г}$ , использовалась типовая функция воздействия в виде единичного сигнала.

Для обучения сети используется генетический алгоритм (ГА), который настраивает параметры нейроконтроллера не по ошибке в управлении  $U$ , а по ошибке на выходе объекта, сравнивая его с выходом эталонной модели (рис. 3).

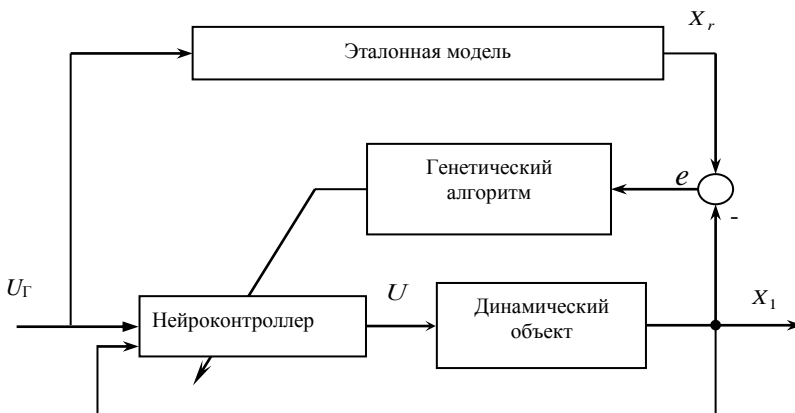


Рис. 3. Применение ГА для настройки параметров нейроконтроллера

Исходная популяция из 100 хромосом генерируется случайным образом. Каждый из 26 параметров сети кодируется 16 битами, таким образом хромосома, кодирующая нейроконтроллер, представляет собой 416-разрядную последовательность нулей и единиц. Диапазон изменения каждого из параметров принят от  $-1$  до  $+1$ . 16-разрядное кодирование обеспечивает дискретность изменения параметра не хуже, чем  $2^{-15}$ .

При единичном входном воздействии на объект управления, описываемый системой уравнений (17), качество системы оценивается переходной характеристикой. При определенных значениях параметров САР наблюдаются процессы, соответствующие неустойчивому характеру работы системы, устойчивому и на границе устойчивости. Задача нейроконтроллера – определение параметров САР, обеспечивающих устойчивость системы и необходимые показатели качества, такие как величина перерегулирования, число перерегулирований и время переходного процесса. При этом САР в этом случае должна формировать такие управляющие воздействия, под воздействием которых сигнал на выходе объекта управления соответствует сигналу задания, который формируется с помощью эталонной модели (разность сигналов  $U_T$  и  $X_1$  должна быть минимальной).

Результаты работы нейроконтроллера приведены в виде осциллограмм на рис. 4, 5.

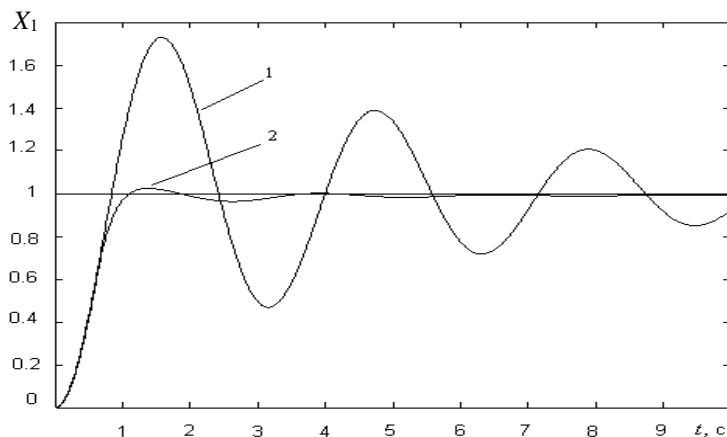


Рис. 4. Зависимость  $X_1$  с использованием нейроконтроллера и без

На рис. 4 приведены переходные процессы переменной  $X_1$  в относительных единицах без использования системы управления на основе нейроконтроллера (кривая 1) и с его использованием (кривая 2) при задании на вход объекта сигнала возмущения единичной амплитуды.



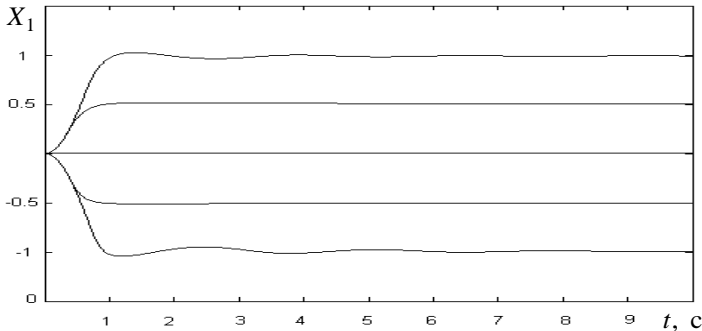


Рис. 5. Зависимость  $X_1$  при различных входных воздействиях

Рис. 5 иллюстрирует поведение объекта не только на тренировочных шаблонах, но и на промежуточных значениях амплитуды входного сигнала, что подтверждает универсальность аппроксимирующих способностей нейронных сетей и возможность использования разработанного нейроконтроллера для формирования сигналов управления напряжением возбуждения синхронного генератора электропередачи дизель-поезда.

**Выводы.** Впервые с помощью нейронных сетей получены модели отдельных компонент электропередачи дизель-поезда и синтезирован нейрорегулятор для управления синхронным генератором. В дальнейшем планируется осуществлять разработку нейроконтроллеров, обеспечивающих возможность не только осуществления функций САР отдельных компонент электропередачи, но и управление дизель-поездом в целом.

**Список литературы:** 1. Ковач К.П., Рац И. Переходные процессы в машинах переменного тока. – М.: Госэнергоиздат, 1963. – 743 с. 2. Тиликин А.П. Математическое моделирование электромеханических процессов в синхронном генераторе при выпрямительной нагрузке // Известия Вузов. Электромеханика. – №1. – 1966. 3. Плахтына Е.Г. Математическое моделирование электромашинно-вентильных систем. – Львов: Вища школа, изд-во при Львов. ун-те, 1980. – 164 с. 4. Кольев Е.В., Метельский В.П. и др. Моделирование тиристорных электроприводов. – К.: Техника, 1980. – 85 с. 5. Сунайлов Г.А., Лоос А.В. Математическое моделирование электрических машин. – М.: Высшая школа, 1980. – 176 с. 6. Заполовский Н.И., Баленко А.И., Пудейко В.А. Математическая модель электропередачи дизель-поезда в режиме тяги. Вестник ХГПУ. Вып. 27, Харьков: ХГПУ, 1998. – С. 18–23. 7. Моделирование и оптимизация систем управления и контроля локомотивов / Носков В.И., Дмитриенко В.Д., Заполовский Н.И. Леонов С.Ю. – Харьков: ХФИ “Транспорт Украины”, 2003. – 248 с. 8. В.Д. Дмитриенко, Н.И. Заполовский, В.И. Носков и др. Адаптивный контроль отклонений в системах управления локомотивов с помощью нейронных сетей. Вісник НТУ “ХПІ”. Збірник наукових праць. Тематичний випуск “Автоматика та приладобудування”. – Харків: НТУ “ХПІ”, 2002. – №18. – С. 45–51. 9. Дмитриенко В.Д., Заполовский Н.И., Носков В.И. и др. Обнаружение разладов в системах управления тягового подвижного состава с помощью искусственных нейронных сетей. Вісник НТУ “ХПІ”. Збірник наукових праць. Тематичний випуск “Інформатика та моделювання”. – Харків: НТУ “ХПІ”, 2003. – №26. – С. 13–24.

Поступила в редакцию 15.04.04