

*В. Д. ДМИТРИЕНКО*, д-р техн. наук,  
*В.И. НОСКОВ*, канд. техн. наук,  
*Н.И. ЗАПОЛОВСКИЙ*, канд. техн. наук,  
*Н.В. МЕЗЕНЦЕВ*

## **ИССЛЕДОВАНИЕ ДИНАМИКИ ДИЗЕЛЬ-ПОЕЗДА С СИСТЕМОЙ УПРАВЛЕНИЯ НА ОСНОВЕ АКОР И НЕЙРОННЫХ СЕТЕЙ**

Розглядається можливість покращення характеристик системи управління ТАД, яка синтезована на основі методу АКОР, шляхом введення в її структуру нейронних мереж. Описується алгоритм настройки параметрів нейронних мереж. Надаються результати моделювання при різному навантаженні дизель-потяга.

The possibility of the improvement of the features managerial system TAD synthesized on base of the method AKOR, to account of the introduction to this structure neuron networks is considered. The algorithm of the adjustment parameter neuron networks is described. The results of the modeling under different capacity diesel-train are described.

**Постановка проблемы.** Синтез системы управления (СУ) энергетической системой дизель-поезда можно осуществить с помощью метода аналитического конструирования регуляторов по критерию обобщенной работы (АКОР). Поскольку поиск оптимальных параметров регулятора в этом методе связан с большим объемом вычислений, то в данной работе рассматриваются возможности улучшения качества управления на основе использования нейронных сетей. Оптимизировать полученную систему можно путем введения дополнительных корректирующих блоков на основе нейронных сетей (НС) системы. Совместная работа регулятора, полученного методом АКОР, и НС обеспечивает выполнение заданных требований к системе управления.

**Анализ литературы.** Моделирование сложных энергетических объектов, к которым относится электропередача дизель-поезда с асинхронным тяговым электроприводом, а также проблема синтеза оптимальных систем управления рассматривается в значительном количестве работ [1 – 6]. 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 [2 – 8], дают основание ожидать, что применение НС при разработке моделей и САР позволит по-новому решить комплекс вопросов, связанных с анализом и синтезом систем управления энергетической системой дизель-поезда.

**Целью статьи** является оптимизация работы энергетической системы дизель-поезда за счет введения в ее структуру управления корректирующих устройств на основе нейронных сетей.

**Применение НС в качестве корректирующих блоков СУ.** Рассматривается задача управления каналами напряжения и частоты тяговых двигателей. Оптимальный сигнал управления  $U$  может быть получен как

$$U = U_1 + U^*, \quad (1)$$

где  $U_1$  – сигнал, формируемый с помощью метода АКОР;  $U^*$  – дополнительный сигнал, получаемый на выходе нейронной сети и выполняющий коррекцию основного сигнала.

Исследование на математических моделях показало, что система в этом случае обладает хорошей устойчивостью, а все наблюдаемые переменные находится в допустимых диапазонах.

Система управления электроприводом дизель-поезда имеет два канала: канал формирования амплитуды управляющего воздействия и канал формирования частоты. Поэтому в исходную структуру системы управления необходимо добавить две нейронные сети (для каждого канала). В качестве нейронных сетей выбран многослойный перцептрон, имеющий входной, выходной и два скрытых слоя. Структура сети идентична для каждого из каналов: 4 входа, 4 нейрона в первом скрытом слое, 7 нейронов во втором скрытом слое и 1 выходной нейрон. В качестве активационной функции каждого из нейронов выбрана сигмоидальная функция вида (2)

$$f(x) = (e^{2x} - 1) / (e^{2x} + 1). \quad (2)$$

На входы сетей подаются модули сигналов потокосцепления и тока фазы статорной обмотки, частота вращения ротора и коэффициент, пропорциональный массе состава. На выходе нейронной сети формируется дополнительный сигнал  $U^*$ , с помощью которого улучшается функционирование электропривода.

При настройке сети к регуляторам можно предъявлять те или иные оптимизационные свойства, например, при одних и тех же энергетических затратах (когда нейронная сеть включена в систему управления) получить меньшее время разгона либо больший пройденный путь, либо при одинаковых конечных скоростях уменьшить энергетические затраты на разгон дизель-поезда. Рассматриваются и различные комбинации этих критериев.

При обучении нейронных сетей использовался генетический алгоритм (ГА). С его помощью настраивались параметры НС в соответствии с заданным критерием. В качестве генов хромосомы в ГА используются все весовые коэффициенты между слоями нейронных сетей, при этом первая часть хромосомы представляет собой параметры нейронной сети,

выполняющей коррекцию закона управления по частоте, а вторая – по амплитуде. На рис. 1 приведена обобщенная структура настройки параметров нейронных сетей, входящих в состав синтезированной системы управления. Исходная популяция состояла из 150 хромосом и генерировалась случайным образом. Каждый параметр сетей кодировался 16 битами. Причем такие генетические операторы как мутация и кроссовер осуществлялись для каждой из двух частей хромосомы отдельно. Поскольку диапазон изменения каждого из параметров принят от  $-1$  до  $+1$ , то 16-разрядное кодирование обеспечивает дискретность изменения параметров не хуже чем  $2^{-15}$ .

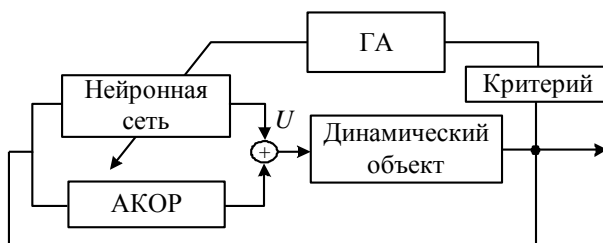


Рис. 1. Обобщенная структура настройки параметров нейронных сетей системы

Словесно алгоритм можно описать следующим образом: на первом этапе случайным образом генерируется исходная популяция бинарных хромосом. Вычисляется критерий функционирования системы управления без использования корректирующих нейронных сетей. Затем определяется индекс приспособленности каждой хромосомы при функционировании объекта и по его значениям выполняется упорядочивание популяции. Вычисляется средняя по популяции приспособленность. Опираясь на нее, определяется вероятность, с которой каждая особь, обладающая приспособленностью больше средней, может стать родителем. При этом для каждого родителя в процессе генерации хромосомы потомка имеется две возможности: либо просто быть скопированным в следующее поколение, либо подвергнутся воздействию генетических операторов. Таким образом генерируется заданное число  $M$  потомков. Поскольку потомки получены от лучших родителей, то их приспособленность может быть более высокой. Работа алгоритма заканчивается при достижении популяцией состояния адаптации, которая идентифицируется по стягиванию ядра популяции сначала в плотное облако, а потом в точку. Кроссовер как механизм изменчивости теряет в таких условиях свою силу. Мутация и инверсия будут, как и раньше, модифицировать потомство, тестируя новые и новые точки пространства поиска. В результате находится некоторый экстремум, хотя характер его неизвестен. На рис. 2 представлена упрощенная схема генетического алгоритма.

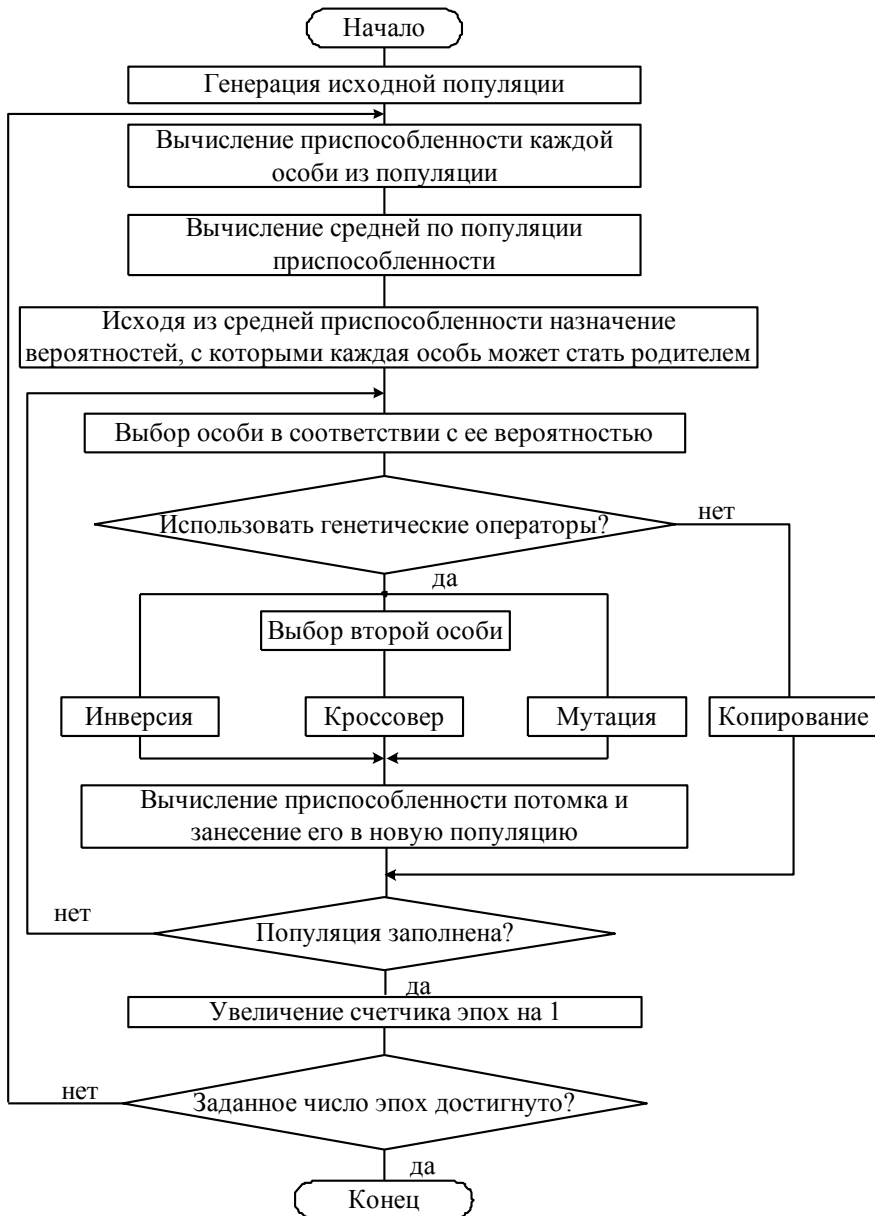


Рис. 2. Упрощенная схема генетического алгоритма

На рис. 3 представлены кривые изменения амплитуды и частоты сигналов управления, для исходной (базовой) модели системы управления (кривые 1 и 3) и модели с использованием нейронных сетей (кривые 2 и 4) при одной и той же массе состава ( $P/J=0.0001$ ), где  $P$  – число пар полюсов;  $J$  – момент инерции.

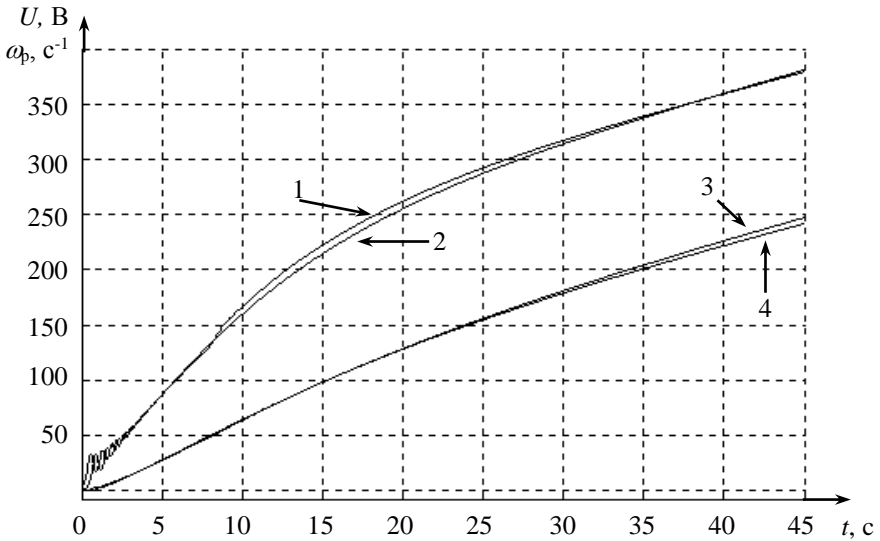


Рис. 3. Зависимости  $U(t)$  и  $\omega_p(t)$  с использованием и без использования НС

В качестве критерия оптимальности использовался критерий минимума энергетических затрат при выполнении ограничений по величине пройденного пути и скорости в конечный момент времени. Рассматривались различные режимы работы электропривода, в частности, разгон дизель-поезда за заданное время  $t$  и оценивались полученные характеристики (скорость, пройденный путь и энергетические затраты) в конечный момент времени. Полученные результаты (скорость в конечный момент времени, пройденный путь и энергетические затраты) для различных масс состава (второй столбец таблицы, задается через отношение числа пар полюсов  $P$  к моменту инерции  $J$ ) представлены в таблице. Задачей было минимизировать энергетические затраты и максимизировать конечную скорость и пройденный путь.

В первой строке таблицы приведены результаты разгона дизель-поезда за время 45 с до скорости 38,16 м/с без использования НС, при этом энергетические затраты составили 5255 кВт/ч, а пройденный путь 255,3 м. При включении в СУ нейронных сетей получен выигрыш по энергетическим затратам 4,5%, хотя конечная скорость в данном случае оказалась меньшей на 0,55 м/с. Однако при увеличении загруженности состава (строка 3) получены энергетические затраты на 3,2% меньше при практически равных конечных скоростях и пройденных путях.

Результаты исследований

№	$P/J$	$t$ , с	$V$ , км/ч		$S$ , м		$E$ , кВт/ч	
			без НС	с НС	без НС	с НС	без НС	с НС
1	0,0001	45	38,16	37,61	255,3	257,1	5255	5014
2	0,0002	30	69,92	68,93	298,8	305,7	8755	8351
3	0,00009	30	24,27	24,12	103,4	103,9	2416	2337
4	0,0001	45	38,16	40,06	255,3	259,2	5255	5251
5	0,0002	30	69,92	72,44	298,8	302,6	8755	8759
6	0,00009	30	24,27	26,31	103,4	104,2	2416	2422
7	0,0001	40	32,54	32,61	234,2	243,5	4762	4621
8	0,0002	35	75,53	75,51	324,3	335,2	9867	9754
9	0,00009	30	24,27	24,32	103,4	110,6	2416	2384

В строках 4 – 6 таблицы представлены результаты разгона дизель-поезда за время  $t$ . В этом случае максимизировалась конечная скорость состава при одинаковых энергетических затратах. В строках 7 – 9 таблицы приведены результаты решения задачи с двухкомпонентным критерием, одна из компонент которого максимизировала пройденный путь, а вторая – минимизировала энергетические затраты.

**Выводы.** Исходя из проведенных результатов исследования можно сделать вывод, что введение нейронных сетей в структуру системы управления позволяет оптимизировать работу энергетической системы дизель-поезда в процессе разгона, обеспечивая при этом уменьшение энергетических затрат не менее чем на 3,2% при любой массе состава.

**Список литературы:** 1. Сандлер А.С., Сарбатов Р.С. Автоматическое частотное управление асинхронными двигателями. – М.: Энергия, 1974. – 328 с. 2. Баленко А.И. К вопросу определения коэффициентов функционала в задаче аналитического конструирования регуляторов по критерию обобщенной работы // Вестник ХГПУ. – Харьков: ХГПУ, 1997. – № 21. – С. 35 – 38. 3. Баленко А.И., Заполовский Н.И. Синтез оптимальной системы управления для объекта, описываемого системой нелинейных дифференциальных уравнений // Вестник ХГПУ. – Харьков: ХГПУ, 1997. – № 21. – С. 26 – 27. 4. Верлань А.Ф., Дмитриенко В.Д., Корсунов Н.И., Шорох В.А. Эволюционные методы компьютерного моделирования. – К.: Наук. думка, 1992. – 256 с. 5. Красовский А.А. Системы автоматического управления полетом и их аналитическое конструирование. – М.: Наука, 1973. – 451 с. 6. Даниленко А.Ф., Дмитриенко В.Д., Заполовский Н.И. Математические модели оптимальных систем управления тяговым асинхронным приводом тепловозов // Электронное моделирование. – 1991. – Т. 13. – № 2. – С. 40–44. 7. Носков В.И., Дмитриенко В.Д., Заполовский Н.И., Леонов С.Ю. Моделирование и оптимизация систем управления и контроля локомотивов. – Харьков: ХФИ "Транспорт Украины", 2003. – 248 с. 8. Дмитриенко В.Д., Заполовский Н.И., Баленко А.И., Носков В.И. Равновесные математические модели динамических процессов электропривода переменного тока // Научные ведомости БелГУ. – Белгород: БелГУ, 2004. – Т. 1. – № 1 (19). – С. 52 – 62.

Поступила в редакцию 15.09.2004