

УДК 519.71:004.89

В.И. Носков<sup>1</sup>, М.В. Липчанский<sup>1</sup>, Н.В. Мезенцев<sup>1</sup>, В.С. Блиндюк<sup>2</sup><sup>1</sup>Национальный технический университет "Харьковский политехнический институт", Харьков<sup>2</sup>Украинский государственный университет железнодорожного транспорта, Харьков

## ПРИМЕНЕНИЕ НЕЙРОННОЙ СЕТИ ПРИ ОПТИМИЗАЦИИ ПРОЦЕССОВ УПРАВЛЕНИЯ ПОДВИЖНЫМ СОСТАВОМ МЕТРОПОЛИТЕНА

Выполнен анализ систем регулирования режимов работы тяговых двигателей (ТД) постоянного тока вагонов метрополитена и процессов движения поездов харьковского метрополитена. Учитывая высокую динамику разгона и торможения вагонов, и относительно небольшие расстояния между станциями, наиболее реальным представляется оптимизация движения поездов с помощью нейронных сетей (НС) адаптивной резонансной теории (АРТ). Предложена архитектура ассоциативной памяти, включающая два модуля, хранящие коды перегонов и законы движения поездов в виде графиков.

**Ключевые слова:** нейронная сеть, адаптивная резонансная теория, ассоциативная память, оптимальное управления движением поездов.

### Постановка проблемы

В настоящее время для управления движением поездов метрополитена используются системы автоматического ведения, выполненные с использованием средств вычислительной техники. В этих системах в памяти компьютера хранятся законы управления поездами на каждом перегоне с учетом графика движения и загрузки составов. В процессе эксплуатации появляется дополнительная информация, например, появление новых станций, что требует перенастройки системы. Необходимо выполнение памяти на основе НС, которая способна запоминать новую информацию без искажения имеющейся или полного переобучения.

### Анализ последних исследований и публикаций

Невозможность с помощью уже известных нейронных сетей решить проблему восприятия новой информации без полного или частичного разрушения уже имеющейся, привело к разработке нового вида нейронных сетей АРТ [1 – 3]. Эти сети относят предъявленное входное изображение к одному из запомненных классов только в том случае, если оно достаточно похоже на прототип этого класса, то есть на изображение, хранящееся в весах связей нейронной сети.

Целью данной работы является разработка архитектуры НС на основе АРТ, способной хранить коды перегонов и законы движения поездов в виде графиков и запоминать новую информацию без искажения имеющейся.

### Изложение основного материала

Оптимальное управление моторвагонным подвижным составом предполагает решение задачи

обеспечения движения поезда с минимальными затратами энергии при условии выполнения графика движения по перегону и соблюдения действующих ограничений на скорость движения, ускорение и управления.

Поезда метрополитена отличаются высокой динамикой и обеспечением комфортности перевозки пассажиров. Основная масса эксплуатируемых вагонов метрополитена (Е, ЕЖ, 81-717 и др.) оборудована тяговыми двигателями (ТД) постоянного тока с последовательным возбуждением [4]. Регулирование частоты вращения ТД осуществляется изменением напряжения на их зажимах, которое осуществляется путем переключения соединения двигателей с последовательного на параллельное, включения дополнительного резистора в цепь якоря и ослабления возбуждения с помощью шунтирования обмотки возбуждения [5 – 8]. Ступеням ослабления обмотки возбуждения соответствуют ходовые позиции, когда напряжение на зажимах ТД не ограничивается пуско-тормозными резисторами.

Для регулирования сопротивления в режиме пуска используется групповой контроллер. При последовательном соединении ТД предусмотрено 16 пусковых позиций реостатного контроллера (РК), 17-я позиция соответствует автоматической характеристике полного возбуждения. Вращение вала РК на всех ходовых позициях происходит под контролем реле ускорения и торможения (РУТ) с помощью электродвигателя постоянного тока. Скорость вращения РК и его хронометрический ход регулируются переменными сопротивлениями в цепи электродвигателя привода РК. РУТ, в зависимости от степени загрузки вагона, подъема или спуска на перегоне, - настраивается на определенный ток уставки. Так при грузе

вагоно, или при движении на предельном подъеме, РУТ настраивается на максимальное пусковое значение тока двигателя ( $I_{\text{пуск.max}}$ ), для порожнего вагона, или при движении на спуске, - на значение

$\sim 0,8 I_{\text{пуск.max}}$ . Пускотормозные характеристики вагона метрополитена, по которым ведется управление ТД приведены на рис. 1.

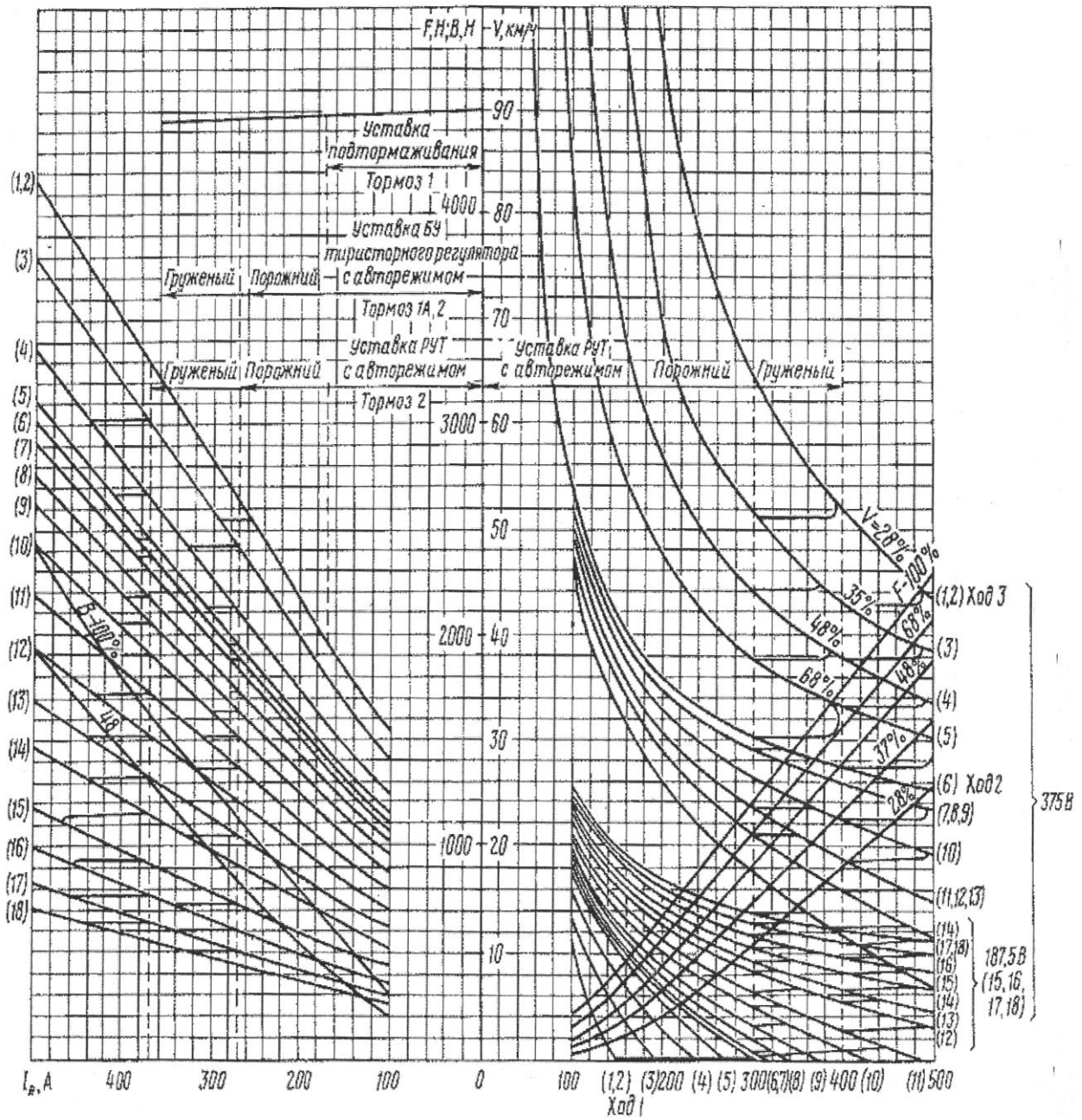


Рис. 1. Пускотормозная диаграмма вагона метрополитена

При управлении сложными объектами, к которым относится и моторвагонный подвижной состав, выбор того или иного режима управления решается человеком на основе распознавания ситуации, в которой находится объект [9, 10].

На рис. 2 приведена типовая диаграмма процесса движения поезда Харьковского метрополитена по перегону между двумя станциями, расстояние между которыми  $S_n$  км.

Учитывая достаточно быстрые процессы пуска и торможения вагонов метрополитена и относительно небольшие расстояния между станциями, представляет практический интерес оптимизация движения поезда по всей линии метрополитена, которая может быть выполнена с помощью нейронных сетей АРТ.

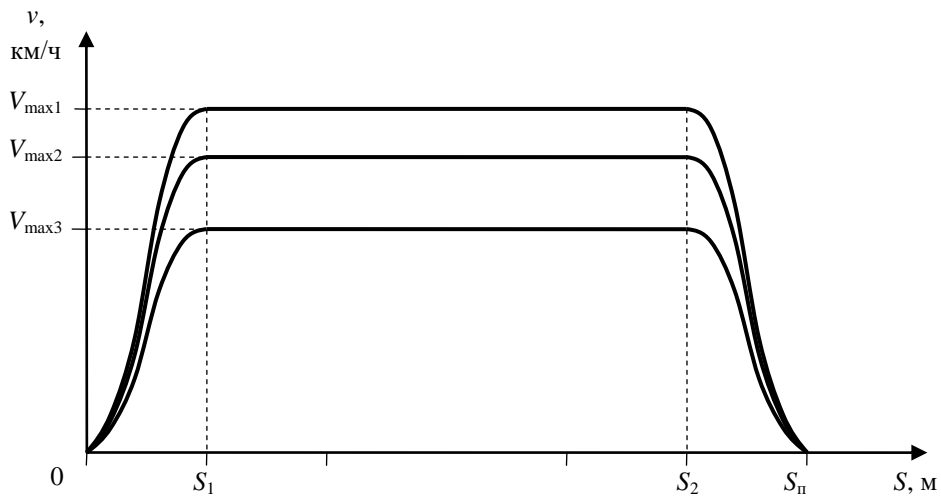


Рис. 2. Типовая диаграмма процесса движения поезда Харьковского метрополитена

Основу архитектуры нейронной сети (рис. 3) образуют три слоя нейронов: слой входных бинарных  $S$ -нейронов; слой интерфейсных бинарных  $Z$ -нейронов и слой распознающих  $Y$ -нейронов. Управление нейронами  $Z$ - и  $Y$ -слоев осуществляется с помощью управляющих нейронов  $G_1, G_2$  и решающего нейрона  $R$ . Входной слой бинарных нейронов воспринимает входную информацию, закодированную нулями и единицами, и передает ее  $Z$ -элементам интерфейсного слоя и нейронам  $G_1, G_2$  и  $R$ . Нейроны  $Z$ - и  $Y$ -слоев переходят в активное состояние по правилу "два из трех" – при наличии сигналов из двух различных источников. Поэтому  $Z$ -нейроны могут перейти в активное состояние только при наличии единичного

сигнала на выходе  $S$ -нейрона и единичного сигнала с выхода  $Y$ -нейрона или управляющего нейрона  $G_1$ . Управляющие нейроны  $G_1$  и  $G_2$  переводятся в активное состояние единичными сигналами с выходов  $S$ -нейронов. Любой нейрон  $Y$ -слоя своим единичным сигналом затормаживает управляющий нейрон  $G_1$ , поэтому нейроны  $Z$ -слоя могут быть переведены в активное состояние только при наличии единичных сигналов на выходах элементов входного слоя. При первоначальной подаче на вход нейронной сети некоторого входного изображения нейроны  $Z$ -слоя переводятся в активное состояние по правилу "два из трех" единичными сигналами элементов  $S$ -слоя и управляющего нейрона  $G_1$ .

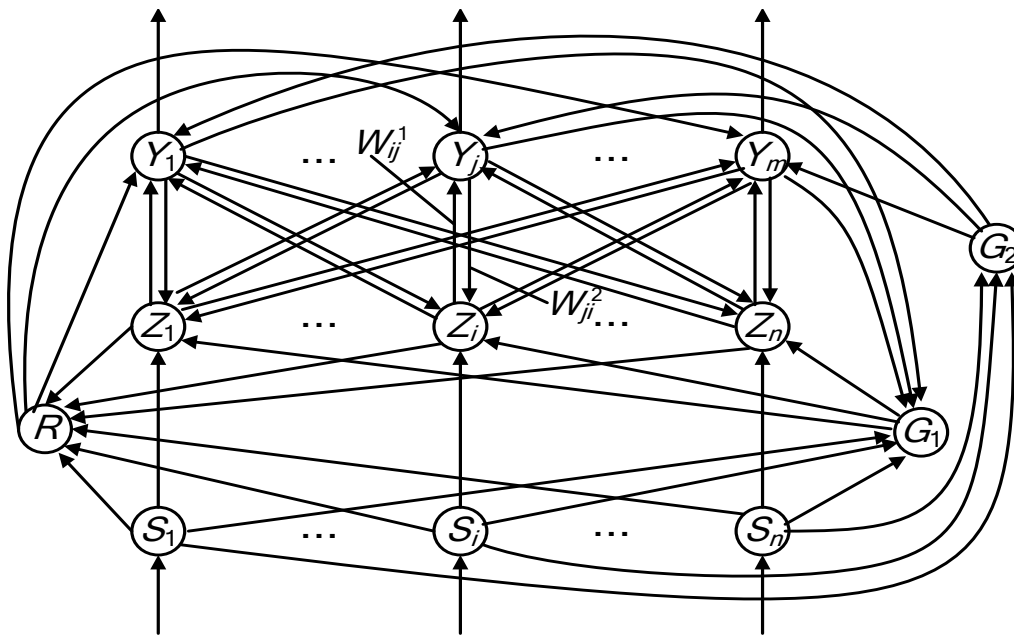


Рис. 3. Архитектура нейронной сети АРТ-1

Единичные сигналы с выходов  $Z$ -нейронов поступают на входы  $Y$ -элементов по связям с весами

$W_{ij}^1 (i = \overline{1, n}; j = \overline{1, m})$ . Каждый  $Y$ -нейрон рассчитывает свой входной и выходной сигналы. Слой

распознающих  $Y$ -нейронов является слоем конкурирующих нейронов. С помощью дополнительной сети, (на рис.3 непоказанной) из  $Y$ -слоя выбирается один нейрон-победитель с максимальным выходным сигналом (если несколько  $Y$ -нейронов имеют одинаковые выходные сигналы, то выбирается  $Y$ -элемент с минимальным индексом). После этого в слое распознающих элементов активным остается только один нейрон-победитель  $Y_j$  ( $U_{\text{вых}Y_j} = 1$ ), остальные нейроны имеют нулевые или отрицательные выходные сигналы. Нулевой сигнал на выходе  $Y$ -нейрона означает, что нейрон неактивен, но может участвовать в соревновании при следующем предъявлении входного изображения. Отрицательный сигнал на выходе некоторого распознающего элемента  $Y_j$  ( $U_{\text{вых}Y_j} = -1$ ) означает, что нейрон  $Y_j$  заторможен и не допускается к участию в соревнованиях нейронов при текущем входном изображении. Выходной сигнал нейрона-победителя переводит в неактивное состояние управляющий нейрон  $G_1$  и поступает на входы всех нейронов интерфейсного слоя. В активное состояние переходят только те  $Z$ -нейроны, на входы которых одновременно поступают единичные сигналы с выходов входных нейронов и нейрона-победителя  $Y_j$ . Единичные сигналы активных  $Z$ - и  $S$ -элементов поступают на входы решающего нейрона  $R$ , который рассчитывает параметр сходства между входным изображением и изображением, хранящемся в весах связей нейрона-победителя  $Y_j$ :

$$p = \|Z_{\text{вых}}\| / \|S_{\text{вых}}\|,$$

где  $p$  – параметр сходства изображений;

$\|Z_{\text{вых}}\|$  – норма изображения, хранящегося в

весах связей нейрона-победителя,  $\|Z_{\text{вых}}\| = \sum_{i=1}^n U_{\text{вых}Z_i}$ ;

$\|S_{\text{вых}}\|$  – норма входного изображения,

$$\|S_{\text{вых}}\| = \sum_{i=1}^n U_{\text{вых}S_i};$$

$U_{\text{вых}Z_i}$  – выходной сигнал нейрона  $Z_i$ .

Если полученное значение параметра сходства равно или больше заданного значения параметра сходства ( $p_3$ ) и нейронная сеть функционирует в режиме распознавания, то входное изображение распознается как относящееся к классу, эталонное изображение которого хранится в весах связей

нейрона  $Y_j$ . Если нейронная сеть функционирует в режиме обучения, то при  $p \geq p_3$  происходит обучение весов связей нейрона  $Y_j$  входным изображением. Если выполняется условие  $p < p_3$ , то нейрон-победитель затормаживается и начинается поиск нового нейрона-победителя в слое распознающих нейронов. Если в режиме обучения все распределенные нейроны  $Y$ -слоя (то есть все элементы, хранящие в весах связей какие-то изображения) окажутся заторможенными, то входное изображение запоминается одним из нераспределенных  $Y$ -нейронов. Если оказываются заторможенными все распределенные  $Y$ -нейроны в режиме распознавания, то это означает, что входное изображение не относится ни к одному из классов, хранящихся в весах связей нейронной сети [11].

На основе дискретной нейронной сети АРТ-1 предлагается архитектура ассоциативной памяти, изображенная на рис. 4 и состоящая из двух модулей, каждый из которых является нейронной сетью АРТ-1. Модуль 1 используется для запоминания кодов перегонов, а модуль 2 – для хранения законов движения электропоезда по перегону, например, в виде графиков  $v = v(S)$ , где  $v$  – скорость движения электропоезда;  $S$  – расстояние от начала перегона (рис. 2).

Машинист с помощью блока управления задает код перегона, который подается на входные нейроны модуля 1. Этот код определяет нейрон-победитель  $Y_j$  в слое распознающих элементов, выходной сигнал которого через нейрон  $A_j$  ассоциативного  $A$ -слоя нейронов (при наличии сигнала определения ассоциации на выходе блока управления) поступает на вход нейрона  $Y_j$  второго модуля ассоциативной памяти.

В памяти каждого  $Y$ -нейрона хранится траектория движения электропоезда по соответствующему перегону. По входному сигналу с выхода модуля 1 любой  $Y$ -нейрон модуля 2 через нейроны слоев  $Z$  и  $S$  выдает на экран монитора машиниста изображение траектории движения состава по перегону. На этом же экране отображается не только рекомендуемая (оптимальная) траектория движения, но и текущая траектория движения. Наличие этих двух траекторий позволяет машинисту поддерживать энергосберегающий режим движения электропоезда.

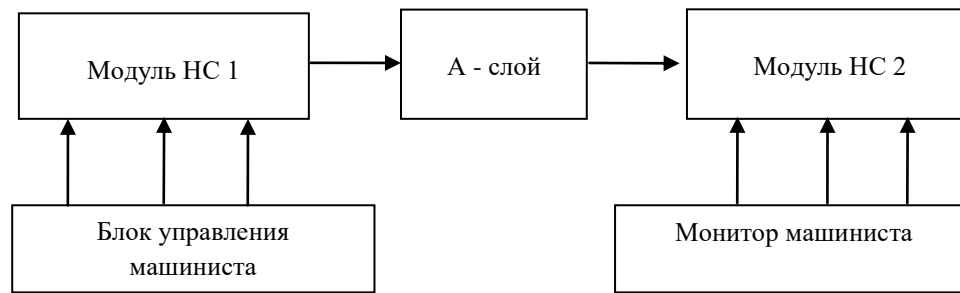


Рис. 4. Ассоциативная память на основе дискретной сети АРТ-1

## Выводы

Таким образом, на основе нейронных сетей адаптивной резонансной теории разработана оригинальная структура ассоциативной памяти для хранения законов управления движением составами метрополитена, позволяющими минимизировать энергетические затраты и обеспечивающая график движения и комфортные условия перевозки пассажиров.

Реализация системы не требует внесения изменений в силовую схему электропривода вагона и в ее систему управления. Для организации работы нейронной сети достаточно иметь программно-аппаратное устройство, в состав которого входит бортовой компьютер с соответствующим программным обеспечением и аппаратный блок, с помощью которого фиксируется прохождение поезда через контрольные пункты, расположенные на определенном расстоянии от станции, с последующим определением в бортовом компьютере всех параметров движения поезда: скорость, ускорение, координата и выводом на дисплей информации в виде реальной и рекомендуемой траектории движения поезда.

Разработанный метод оптимизации движения поезда метрополитена обладает универсальностью и может быть распространен к использованию на всех видах подвижного состава.

## Литература

1. Fausett I. *Fundamentals of Neural Networks. Architectures, Algorithms, and Application.* – New Jersey: Prentice Hall International, Inc., 1994. – 461 p.
2. Дмитриенко В.Д., Корсунов Н.И. *Основы теории нейронных сетей. Учебное пособие.* – Белгород: БИИММАП, 2001. – 159 с.
3. *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.
4. *Устройство и ремонт электропоездов метрополитена. Механическое и электрическое оборудование / Семеновский Э.А., Богданов А.А., Гусев В.С., Могильвер Ю.Я.* – М.: "Транспорт", 1991. – 335 с.

5. *Neue Teilstrecke der vollautomatischen Metro in Paris in Betrieb [Text] // Signal+Draht.* – 2004. – Vol. 96, № 3. – P. 42.
6. *SIEMENS-Un VAL olimpique [Text] // La viedu rail.* – 2005. – № 3007. – P. 31.
7. Mattis, W.E. *Modelling and minimum energy control of traction motor system [Text] / W.E. Mattis // International Journal of Energy systems.* – 1989. – Vol. 9, № 2. – P. 78-82.
8. Khmelnsky, E. *On an optimal control problem of train operation [Text] / E. Khmelnsky // IEEE Transactions on Automatic Control.* – 2000. – Vol. 45, № 7. – P. 1257-1266.
9. Chang, C.S. *Differential evolution based tuning of fuzzy automatic train operation for mass rapid transit system [Text] / C.S. Chang, D.Y. Xu // IEE Proceedings Electric Power Applications.* – 2000. – Vol. 147, № 3. – P. 206-212.
10. Mei, T.X. *Log and GA solutions for active steering of railway vehicles [Text] / T.X. Mei, R.M. Goodall // IEE Proceedings Control Theory and Applications.* – 2000. – Vol. 147, № 1. – P. 111-117.
11. Hill, R.J. *Electric railway traction. Part 4. Signalling and interlocking [Text] / R.J. Hill // Power Engineering Journal.* – 1995. – Vol. 9, № 4. – P. 201-206.

## References

1. Fausett I. *Fundamentals of Neural Networks. Architectures, Algorithms, and Application.* – New Jersey: Prentice Hall International, Inc., 1994. – 461 p.
2. Dmitrienko V.D., Korsunov N.I. *Osnovy teorii neyronnyh setej. Uchebnoe posobie.* – Belgorod: BIIMMAP, 2001. – 159 s.
3. *Modelirovanie i optimizacija sistem upravlenija i kontrolja lokomotivov / Noskov V.I., Dmitrienko V.D., Zapolovskij N.I., Leonov S.Ju.* – Har'kov: HFI "Transport Ukrainy", 2003. – 248 s.
4. *Ustrojstvo i remont jelektropoezdov metropolitena. Mehanicheskoe i jelektricheskoe oborudovanie / Semenovskij Je.A., Bogdanov A.A., Gusev V.S., Mogil'ver Ju.Ja.* – M.: "Transport", 1991. – 335 s.
5. *Neue Teilstrecke der vollautomatischen Metro in Paris in Betrieb [Text] // Signal+Draht.* – 2004. – Vol. 96, № 3. – P. 42.
6. *SIEMENS-Un VAL olimpique [Text] // La viedu rail.* – 2005. – № 3007. – P. 31.
7. Mattis, W.E. *Modelling and minimum energy control of traction motor system [Text] / W.E. Mattis // International Journal of Energy systems.* – 1989. – Vol. 9, № 2. – P. 78-82.
8. Khmelnsky, E. *On an optimal control problem of train operation [Text] / E. Khmelnsky // IEEE Transactions on Automatic Control.* – 2000. – Vol. 45, № 7. – P. 1257-1266.

9. Chang, C.S. *Differential evolution based tuning of fuzzy automatic train operation for mass rapid transit system [Text]* / C.S. Chang, D.Y. Xu // *IEE Proceedings Electric Power Applications*. – 2000. – Vol. 147, № 3. – P. 206-212.

10. Mei, T.X. *Log and GA solutions for active steering of railway vehicles [Text]* / T.X. Mei, R.M. Goodall // *IEE Proceedings Control Theory and Applications*. – 2000. – Vol. 147, № 1. – P. 111-117.

11. Hill, R.J. *Electric railway traction. Part 4. Signalling and interlocking [Text]* / R.J. Hill // *Power Engineering Journal*. – 1995. – Vol. 9, № 4. – P. 201-206.

**Автор:** НОСКОВ Валентин Иванович  
Национальный технический университет "ХПИ",  
Харьков, доктор технических наук, профессор,  
E-mail – val1942@mail.ru

**Автор:** ЛИПЧАНСКИЙ Максим Валентинович  
Национальный технический университет "ХПИ",  
Харьков, кандидат технических наук, доцент,  
E-mail – maxl@meta.ua

**Автор:** МЕЗЕНЦЕВ Николай Викторович  
Национальный технический университет "ХПИ",  
Харьков, кандидат технических наук, доцент,  
E-mail – besitzer@rambler.ru

**Автор:** БЛИНДЮК Василий Степанович  
Украинский государственный университет  
железнодорожного транспорта, Харьков, доктор  
технических наук, профессор,  
E-mail – academy\_bvs@ukr.net

### ЗАСТОСУВАННЯ НЕЙРОННОЇ МЕРЕЖІ ПРИ ОПТИМІЗАЦІЇ ПРОЦЕСІВ УПРАВЛІННЯ РУХОМОГО СКЛАДУ МЕТРОПОЛІТЕНУ

В.І. Носков<sup>1</sup>, М.В. Липчанський<sup>1</sup>, Н.В. Мезенцев<sup>1</sup>, В.С. Блиндюк<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Національний технічний університет "Харківський політехнічний інститут", Харків

<sup>2</sup>Український державний університет залізничного транспорту, Харків

*Виконано аналіз систем регулювання режимів роботи тягових двигунів постійного струму вагонів метрополітену і процесів руху поїздів харківського метрополітену. З огляду на високу динаміку розгону і гальмування вагонів, і відносно невеликі відстані між станціями, найбільш реальним представляється оптимізація руху поїздів за допомогою нейронних мереж адаптивної резонансної теорії. Запропонована архітектура асоціативної пам'яті, що включає два модулі, які зберігають коди перегонів і закони руху поїздів у вигляді графіків.*

**Ключові слова:** нейронна мережа, адаптивна резонансна теорія, асоціативна пам'ять, оптимальне управління рухом поїздів.

### NEURAL NETWORK USAGE FOR PROCESS OPTIMIZATION OF ROLLING STOCK SUBWAY

V.I. Noskov<sup>1</sup>, M.V. Lipchanskyi<sup>1</sup>, N.V. Mezentsev<sup>1</sup>, V.S. Blindyk<sup>2</sup>

<sup>1</sup>National Technical University «Kharkiv Polytechnic Institute», Kharkiv

<sup>2</sup>Ukrainian State University of Railway Transport, Kharkiv

*The analysis of the control systems operating modes of traction motors DC subway cars and trains processes Kharkov Metro. Given the highly dynamic acceleration and braking cars, and relatively short distances between stations, seems the most real optimization of trains using neural networks adaptive resonance theory. The architecture of associative memory, which includes two modules storing code spans and the laws of motion of trains in the form of graphs. On the basis of neural networks adaptive resonance theory has developed an original associative memory structure for the storage of trains underground control laws to minimize energy costs and provides a timetable and comfortable transportation of passengers.*

**Keywords:** neural network, adaptive resonance theory, associative memory, the optimal traffic control.