

# Обробка інформації в складних технічних системах

УДК 004.89:519.71

А.Ю. Заковоротный

*Национальный технический университет "ХПИ", Харьков*

## СТАБИЛЬНО-ПЛАСТИЧНЫЕ НЕЙРОННЫЕ СЕТИ НА ОСНОВЕ ПЕРЦЕПТРОНА В ЗАДАЧАХ ПРОГНОЗИРОВАНИЯ БУКСОВАНИЯ

*Разработаны стабильно-пластичные нейронные сети на основе перцептрона, способные дообучаться без потерь запомненной ранее информации. Разработанные нейронные сети позволяют на основе сигналов частот вращения роторов двигателей прогнозировать возможность возникновения процесса буксования колесных пар в процессе движения тягового подвижного состава.*

**Ключевые слова:** *стабильно-пластичная нейронная сеть, перцептрон, способный дообучаться, прогнозирование буксования.*

### Введение

#### Постановка проблемы и анализ литературы.

Процессы буксования в режимах разгона и тяги чаще всего возникают при движении дизель-поезда на низких скоростях и проявляются в виде проскальзывания колеса относительно рельса. Процессы буксования во время движения подвижного состава развиваются достаточно быстро и могут нанести существенный ущерб железнодорожному полотну, а также увеличивают износ колесных пар дизель-поездов. В связи с этим, одним из основных подходов по своевременному обнаружению буксования является подход, связанный с прогнозированием моментов возникновения пробуксовки колесных пар на основе сигнала, полученного как разность частот вращения роторов соответствующих двигателей. Это связано, в первую очередь, с тем, что в рассматриваемом дизель-поезде нет технической возможности непосредственно контролировать скорость вращения колесных пар. Однако конструктивные особенности тяговой тележки, на которой расположены тяговые двигатели, связанные с тем, что колесные пары через редуктор практически жестко связаны с роторами, позволяют использовать в качестве сигнала для обнаружения буксования, сигнал разности частот вращения роторов двигателей.

Для прогнозирования возникновения буксования могут использоваться системы на основе искусственных нейронных сетей, которые широко применяются для решения самых различных задач. Это обусловлено их универсальностью, возможностью замены различных традиционных проблем, возникающих при решении конкретных прикладных задач, обучением нейронных сетей на примерах, воз-

можностью самообучения и разработки нейронных сетей под решаемую задачу, и т.д. [1 – 6].

При наличии полной информации об объекте исследования, возможно использование множества различных видов нейронных сетей, но при разработке систем для реальных объектов зачастую возникают ситуации, когда информация об объекте далеко не полная или будет уточняться в процессе функционирования объекта. Это существенно сокращает круг нейронных сетей, которые целесообразно использовать в таких ситуациях, поскольку обучение новому образу в общем случае приведет к полному переобучению нейронной сети. Подобного недостатка лишены нейронные сети адаптивной резонансной теории (АРТ) [7, 8] в которых решена проблема стабильности-пластичности, то есть проблема восприятия и запоминания новой информации при сохранении уже имеющейся. Эта способность нейронных сетей АРТ обеспечивается наличием дополнительных нейронов, на которые и записывается новая информация. Принцип функционирования распознающих нейронов сети АРТ заключается в том, что часть нейронов распознающего слоя хранит информацию (эталонные изображения) об известных классах изображений, а оставшиеся нейроны могут использоваться для записи новой информации. При этом каждый распознающий нейрон хранит или будет хранить информацию в весах своих связей только об одном изображении. Если в слой распознающих нейронов сети перцептрон ввести дополнительные нейроны, способные запоминать новую информацию (эталонные изображения новых классов), то такая сеть также сможет дообучаться и будет обладать свойствами стабильности и пластичности, то есть свойствами нейронной сети АРТ.

Целью статьи является разработка стабильно-пластичных нейронных сетей на основе перцептрона для прогнозирования возможности возникновения процесса буксования колесных пар в процессе движения тягового подвижного состава.

### Разработка архитектуры стабильно-пластичных нейронных сетей на основе перцептрона

Стабильность дискретных нейронных сетей АРТ-1 [8] обеспечивается наличием дополнительных нейронов, на которые и записывается новая информация.

Подобные дополнительные нейроны в скрытом А-слое и выходном Y-слое нейронов может иметь и трехслойный перцептрон. Будем использовать эту сеть для запоминания и распознавания только k различных классов изображений, каждый из которых

задается сигналом близким к единице на выходе одного Y-нейрона и сигналами близкими к "−1" на выходах других Y-нейронов (при биполярном кодировании информации).

При подаче на входы X-нейронов изображения, относящегося к одному из классов изображений, хранящихся в памяти сети, суммарный выходной сигнал нейронов будет близок к  $(k-1) \cdot (-1) + 1 = -(k-2)$ . Если входное изображение не относится ни к одному из классов, хранящихся в памяти нейронной сети, то суммарный выходной сигнал будет отличаться от  $-(k-2)$ .

Архитектуру сети условно можно разбить на  $(N+1)$  однотипных блоков (рис. 1), каждый из которых хранит в весах своих связей множество изображений

$$M_l = \{S^{l1}, S^{l2}, \dots, S^{ln_l}\}, l = 0, 1, \dots, N.$$

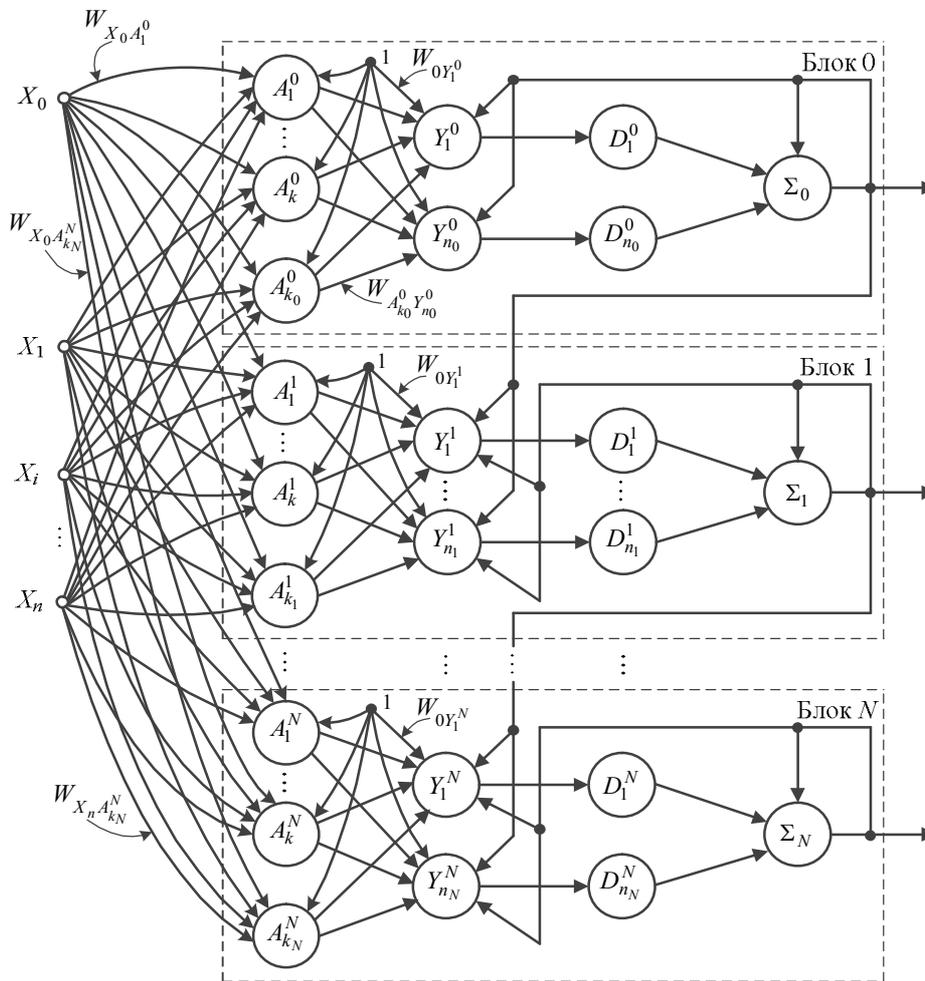


Рис. 1. Архитектура трехслойного перцептрона, который может дообучаться N раз

Любой l-й  $(l=0, 1, \dots, N)$  блок содержит  $k_l$  A-нейронов скрытого слоя  $A_1^l, A_2^l, \dots, A_{k_l}^l$ ,  $n_l$  Y-нейронов распознающего или выходного слоя:  $Y_1^l, Y_2^l, \dots, Y_{n_l}^l$ ,  $n_l$  D-нейронов  $D_1^l, D_2^l, \dots, D_{n_l}^l$ .

D-нейроны имеют функцию активации следующего вида

$$U_{\text{выхD}} = \begin{cases} 1, & \text{если } (1-\delta) \leq U_{\text{вхD}} < 1, \\ 0, & \text{если } (-1+\delta) < U_{\text{вхD}} < 1-\delta, \\ -1, & \text{если } -1 < U_{\text{вхD}} \leq -1+\delta, \end{cases} \quad (1)$$

где  $U_{\text{выхD}}$ ,  $U_{\text{вхD}}$  – соответственно выходной и входной сигнал D-нейрона;  $\delta$  – максимально допустимая ошибка приближения сигналов "1" и "-1" с помощью нейронов с биполярной сигмоидальной функцией активации.

Каждый блок нейронной сети содержит также управляющий  $\Sigma$ -нейрон, с помощью которого определяется принадлежность входного вектора к соответствующему множеству изображений.

Входы A-нейронов всех  $(N + 1)$  блоков сети соединены с выходами сенсорных нейронов  $X_1, X_2, \dots, X_n$ .

Нейроны  $A_1^0, \dots, A_{k_0}^0, Y_1^0, \dots, Y_{n_0}^0$  нулевого блока используются для запоминания исходной информации в виде множества изображений  $M_0$ .

Блок 1 и последующие блоки нейронной сети используются для обучения перцептрона по мере накопления новой информации и последовательного запоминания множеств изображений  $M_1, M_2, \dots, M_N$ .

В каждом блоке выходные сигналы  $Y$ -нейронов поступают на входы D-нейронов, имеющих функцию активации вида (1) и преобразующих непрерывные сигналы  $Y$ -нейронов в дискретные сигналы: 1, 0 и -1.

В каждом блоке нейронов сигналы D-нейронов поступают на входы управляющего нейрона, имеющего функцию активации вида

$$U_{\text{вых}\Sigma_d} = \begin{cases} 0, & \text{если } U_{\text{вх}\Sigma_d} = \sum_{k=1}^{n_d} U_{\text{вых}D_k^d} = -(n_d - 2), \\ 1, & \text{если } U_{\text{вх}\Sigma_d} \neq -(n_d - 2), \quad d = 0, 1, \dots, N, \end{cases} \quad (2)$$

где  $U_{\text{вых}\Sigma_d}$ ,  $U_{\text{вх}\Sigma_d}$  – соответственно выходной и входной сигнал нейрона  $\Sigma_d$ ,  $d = 0, 1, \dots, N$ ;  $U_{\text{вых}D_k^d}$  – выходной сигнал нейрона  $D_k^D$  ( $d = 0, 1, \dots, N$ ;  $k = 1, \dots, n_d$ );  $n_d$  – число  $Y$  и  $D$  нейронов в блоке  $d$  ( $d = 0, 1, \dots, N$ ).

Если  $U_{\text{вых}\Sigma_d} = 0$ , то это является признаком, что входное изображение принадлежит множеству  $M_d$ , а его конкретный класс определяется комбинацией выходных сигналов D-нейронов. Если  $U_{\text{вых}\Sigma_d} = 1$ , то это означает, что входное изображение не принадлежит множеству  $M_d$ . В этом случае выходной сигнал  $U_{\text{вых}\Sigma_d}$  по цепи обратной связи фиксирует единичный выходной сигнал нейрона  $\Sigma_d$ , блокирует нейроны  $Y_1^d, Y_2^d, \dots, Y_{n_d}^d$  и подключает к распознаванию нейроны группы  $(d + 1)$ . Благодаря этому и реализуется возможность по

дообучению трехслойного перцептрона в процессе его функционирования.

Разработанная нейронная сеть может эффективно использоваться для контроля и выявления процессов буксования колесных пар. Она позволяет осуществлять прогнозирование моментов возникновения пробуксовки колесных пар на основе данных, с одной стороны, полученных заранее при анализе множества реальной информации о моментах возникновения буксования, а с другой стороны, полученных в реальных условиях движения дизель-поезда, которыми может быть дообучена данная стабильно-пластичная нейронная сеть.

Анализ множества реальных сигналов разницы частот соответствующих двигателей, показал, что она имеет постоянную положительную или отрицательную составляющую, а в моменты буксования абсолютная разность частот оборотов соответствующих двигателей значительно превышает эту постоянную составляющую. В предлагаемом подходе по прогнозированию возникновения пробуксовки колесных пар используется стабильно-пластичная нейронная сеть на основе перцептрона, которая по изменению сигнала разности частот соответствующих двигателей позволяет предсказать возможное возникновение и развитие процесса буксования. При этом на нейроны входного X-слоя подаются  $q$  последних отсчетов

$$x(t_n), \dots, x(t_{n-1}), \dots, x(t_{n-q})$$

из последовательности

$$x(t_1), x(t_2), \dots, x(t_n),$$

которая представляет собой сигнал разности частот соответствующих двигателей. В свою очередь, на выходе нейронов распознающего  $Y$ -слоя формируется сигнал, по которому определяется возможность возникновения процесса буксования.

Для обучения нейронной сети на основе перцептрона использовались обучающие выборки (табл. 1), полученные в результате анализа большого количества характеристик, полученных на реальном дизель-поезде.

В табл. 1 приведена часть выборки, которая использовалась для обучения стабильно-пластичной нейронной сети на основе перцептрона, при этом обучающие выборки были нормированы по скорости, так как величина сигнала разности частот соответствующих двигателей зависит от текущей скорости дизель-поезда.

В результате обучения стабильно-пластичной нейронной сети на основе перцептрона были получены весовые коэффициенты между слоями A- и  $Y$ -нейронов.

Тестирование работы нейронной сети выполнено с использованием выборок, полученных из реальных процессов движения дизель-поезда.

Таблиця 1

Обучающие выборки для стабильно-пластичной сети на основе перцептрона

Номер вы-борки	$x(t_{m-5})$	$x(t_{m-4})$	$x(t_{m-3})$	$x(t_{m-2})$	$x(t_{m-1})$	$x(t_m)$	Буксование
1	0,515	0,770	0,510	-0,770	-1,280	-2,560	Есть
2	0,215	0,272	0,273	-0,110	-1,329	-2,160	Есть
3	0,323	0,430	0,542	-1,080	-2,055	-1,920	Есть
4	0,269	0,218	0,110	-0,705	-1,680	-2,326	Есть
5	0,323	0,246	-0,810	-1,950	-2,600	-2,198	Есть
6	0,165	0,400	0,897	-1,910	-2,685	-2,279	Есть
7	0,240	0,355	0,600	-0,120	-1,192	-2,260	Есть
8	0,240	0,474	0,360	0,120	0,239	0,355	Нет
9	0,080	0,246	0,410	0,165	0,080	0,162	Нет
10	0,180	0,270	0,360	0,180	0,275	0,180	Нет
11	0,175	0,300	0,350	0,235	0,115	0,292	Нет
12	0,284	0,430	0,717	0,145	0,570	0,284	Нет
13	0,420	0,315	0,740	0,630	0,840	0,528	Нет
14	0,325	0,519	0,450	0,260	0,190	0,389	Нет
15	0,120	0,060	0,175	0,235	0,179	0,120	Нет

## Выводы

Таким образом, разработана архитектура трех-слойного перцептрона способного дообучаться в процессе своего функционирования.

На основании разработанной стабильно-пластичной нейронной сети и данных, полученных на реальном объекте управления, была решена проблема обнаружения нестандартных режимов работы тягового подвижного состава, к которым относится режим буксования. Разработанная нейронная сеть позволяет на основе сигналов частот вращения роторов двигателей прогнозировать возможность возникновения процесса буксования колесных пар в процессе движения тягового подвижного состава.

## Список литературы

1. Suzuki K. *Artificial Neural Networks: Architectures and Applications* / K. Suzuki. – Publisher: InTech, 2013. – 256 p.
2. Bianchini M. *Handbook on Neural Information Processing (Intelligent Systems Reference Library)* / M. Bianchini. – Publisher: Springer, 2013. – 499 p.
3. Cirrincione M. *Power Converters and AC Electrical Drives with Linear Neural Networks (Energy, Power*

*Electronics, and Machines)* / M. Cirrincione, M. Pucci, G. Vitale. – Publisher: CRC Press, 2012. – 631 p.

4. Галушкин А.И. *Нейронные сети. Основы теории* / А.И. Галушкин. – М.: Горячая линия – Телеком, 2012. – 496 с.

5. Капля В.И. *Системы искусственного интеллекта: учебное пособие* / В.И. Капля. – Волгоград: ИУНЛ ВолгГУ, 2011. – 97 с.

6. Russell S. *Artificial Intelligence: A Modern Approach, Third Edition* / S. Russell, P. Norvig. – Publisher: Prentice Hall, 2010. – 1152 p.

7. Дмитриенко В.Д. *Нейросетевое устройство направленных ассоциаций* / В.Д. Дмитриенко, А.Ю. Заковоротный, И.П. Хавина // *Научные ведомости. Серия: История, политология, экономика, информатика*. – Белгород: БГУ, 2010. – № 7(78). Вып. 14/1. – С. 110-119.

8. Дмитриенко В.Д. *Ассоциативная нейронная сеть АРТ* / В.Д. Дмитриенко, А.Ю. Заковоротный, В.А. Бречко // *Сборник трудов Международной молодежной конференции "Прикладная математика, управление и информатика"*. – Белгород: ИД "Белгород", 2012. – Т. 1. – С. 115-118.

Поступила в редколлегию 10.03.2016

**Рецензент:** д-р техн. наук, проф. А.А. Серков, Национальный технический университет «Харьковский политехнический институт», Харьков.

## СТАБІЛЬНО-ПЛАСТИЧНІ НЕЙРОННІ МЕРЕЖІ НА ОСНОВІ ПЕРЦЕПТРОНА В ЗАДАЧАХ ПРОГНОЗУВАННЯ БУКСУВАННЯ

О.Ю. Заковоротный

Розроблено стабільно-пластичні нейронні мережі на основі перцептрона, здатні донавчатися без втрат інформації, що вже була запам'ятована. Розроблені нейронні мережі дозволяють на основі сигналів частот обертання роторів двигунів прогнозувати можливість виникнення процесу буксування колісних пар в процесі руху тягового рухомого складу.

**Ключові слова:** стабільно-пластична нейронна мережа, перцептрон, здатний донавчатися, прогнозування буксування.

## STABLE PLASTIC NEURAL NETWORK BASED PERCEPTRON IN FORECASTING PROBLEMS SLIPPAGE

A.Yu. Zakovorotnyi

Designed stable-plastic neural networks based on Perceptron capable to learn without losing information stored previously. The developed neural networks allow to predict the possibility of a process of slipping wheel sets in motion a traction rolling stock based on engine rotor speed signals.

**Keywords:** stable plastic neural network, perceptron, ability to learn, forecasting slipping.