

А. С. Голубков, Г. Р. Ермачков, О. А. Сидоров, А. Н. Смердин

Омский государственный университет путей сообщения, г. Омск, Российская Федерация

ПРИМЕНЕНИЕ НЕЙРОННЫХ СЕТЕЙ ПРИ МОДЕЛИРОВАНИИ СИСТЕМЫ ТОКОСЪЕМА НА ЭЛЕКТРИФИЦИРОВАННЫХ ЖЕЛЕЗНЫХ ДОРОГАХ

Аннотация. В статье рассматривается анализ способов получения статистически достоверных данных о контактном нажатии, которые базируются на результатах инспекционных поездок и данных о проектных значениях расположения контактных проводов в вертикальной плоскости и в плане пути. Предложен метод расчета контактного нажатия с помощью искусственных нейронных сетей. Рассмотрены способы получения статистически достоверных данных о контактном нажатии токоприемников электроподвижного состава без необходимости прямого измерения, на основе видеоизображения процесса токосъема и анализа внешних факторов (погодных, эксплуатационных), сопровождающих взаимодействие.

Ключевые слова: токоприемник, нейронная сеть, контактное нажатие, среднеквадратичная ошибка, прогнозирование по замкнутому циклу.

Anton S. Golubkov, Gleb R. Ermachkov, Oleg A. Sidorov, Alexander N. Smerdin

Omsk State Transport University (OSTU), Omsk, the Russian Federation

APPLICATION OF NEURAL NETWORKS AT SIMULATION OF A SYSTEM OF CURRENT COLLECTION ON ELECTRIC RAILWAYS

Annotation. The article deals with the analysis of methods for obtaining statistically reliable data on contact pressure, which are based on the results of inspection trips and data on the design values of the location of the contact wires in the vertical plane and in the path plan. A method for calculating contact pressing with artificial neural networks is proposed. The methods of obtaining statistically reliable data on the contact pressing of current collectors of electric rolling stock without the need for direct measurement, based on the video image of the current collection process and analysis of external factors (weather, operational) accompanying the interaction are considered.

Keywords: current collector, neural network, contact force, mean-square error, closed-cycle prediction.

Стратегия развития железнодорожного транспорта в Российской Федерации до 2030 года [1] предусматривает комплексное совершенствование инфраструктуры железных дорог и электроподвижного состава (ЭПС). Намеченные ориентиры модернизации вызывают неизбежное увеличение механических и электрических нагрузок на контактную сеть и токоприемники ЭПС, от надежности работы которых напрямую зависят затраты на содержание, ремонт и безопасность функционирования всей сети железных дорог.

В настоящее время актуальными для мирового железнодорожного транспорта являются проблемы, связанные с взаимодействием токоприемников ЭПС и подвесок контактной сети (ПКС).

Для обеспечения надежной и безаварийной работы токосъемных устройств необходимо на этапе проектирования и реализации инфраструктуры системы токосъема определить наилучшее сочетание конструктивных параметров и характеристик ПКС для взаимодействия с токоприемниками, предназначенными для высокоскоростного движения на всех эксплуатационных режимах.

Неотъемлемой частью такого подхода является проведение имитационных экспериментов и исследовательских поездок по действующим электрифицированным железнодорожным участкам с использованием специальных технических средств и программного обеспечения для определения значений основных параметров токосъема, таких как экономичность, экологичность, надежность и оценка прогнозирования срока службы контактных проводов и вставок полозов токоприемников ЭПС.

Концепция развития инфраструктуры ОАО «РЖД» предусматривает техническое единообразие контактной сети на всех полигонах, предназначенных для скоростного движения. Отличия проектных решений, обусловленные особенностями сочетаний эксплуатационных факторов, не носят принципиального характера [2]. Это дает возможность распространить закономерности, выявленные на одном из полигонов скоростного движения, на все подобные участки.

В ходе моделирования (математического и натурного) появляется возможность выбора наилучших сочетаний высотного положения, жесткости ПКС и расположения проводов в плане пути. Проведение вычислительных экспериментов сопряжено со значительной трудоемкостью и длительностью расчетов, однако эти затраты не сравнимы со сложностью и стоимостью выполнения натуральных экспериментов с подобным набором факторов, влияние которых требуется оценить.

Известны следующие модели для исследования динамического взаимодействия ПКС с токоприемниками: модель А. В. Ефимова, А. Г. Галкина и В. В. Веселова (УрГУПС); модель А. С. Голубкова (ОмГУПС) [3]; модель Е. В. Кудряшова (ПГУПС) [4], модель Zhigang Liu (School of Electrical Engineering, Southwest Jiaotong University, China) [5].

Указанные математические модели характерны тем, что элементы в них представлены в виде материальных точек, а выполнение статических и динамических расчетов связано с соответствующим их числу объемом вычислений дифференциальных уравнений. В этих моделях частично или полностью не учитываются особенности движения подвижного состава или они представлены как сумма колебаний различных частот. Недостоверно представлен токоприемник, отсутствует привязка к местности. Кроме того, расчеты затрудняет неполнота информации о процессе взаимодействия токоприемника и контактной сети, между показателями токосъема имеются нелинейные динамические зависимости.

Разрабатываемая модель должна демонстрировать изменение контактного нажатия ($P_{\text{кт}}$) токоприемника в ответ на изменение влияющих факторов, позволяя определить наилучший вариант регулировок ПКС. Это позволит проводить виртуальную «регулировку» контактной сети до ее физического изготовления, а также прогнозировать изменение статистических параметров токосъема при увеличении скоростей движения (свыше 400 км/ч). По результатам расчета можно дать прогноз, при какой скорости движения начнутся нарушения токосъема.

Определение перечня факторов, имеющих влияние на величину контактного нажатия и пригодных для регистрации с помощью видеокамер.

Основным этапом перед формированием модели является подготовка и обработка ранее полученных экспериментальных данных. В нее входят выбор и оценка пригодности (значимости) массива данных для формирования исходного набора.

В ОмГУПСе разработаны методы исследований магистральных токоприемников в лабораторных и эксплуатационных условиях [6 – 8], которые позволяют получать данные о технических характеристиках и определять ряд дополнительных показателей, используя средства видеонаблюдения. Видеорегистраторы фиксируют параметры взаимодействия токоприемника и ПКС. После завершения сеанса видеозаписи проводится обработка информации.

Экспериментально установлено, что спецчасти (секционные изоляторы, воздушные стрелки и др.) ПКС приводят к появлению искажений установившихся значений $P_{\text{кт}}$ за счет ударов и отскоков полоза от контактных проводов. Анализ исследований, проведенных в 2012 г. на Октябрьской железной дороге, позволяет сделать вывод о том, что колебания высотного положения контактного провода имеют циклический характер (рисунок 1). В работе [9] показано, что отжатие ПКС, измеренное в ходе экспериментальных поездок при скорости 5 км/ч, коррелирует с высотным положением контактных проводов в нормальном положении ($h_n(l)$) и при отжатии их токоприемником ($h_p(l)$). Можно отметить, что эластичность достаточно равномерна на анкерном участке (коэффициент неравномерности эластичности не более 1,2) и оказывает незначительное влияние на отжатия.

Увеличение скорости ЭПС приводит к увеличению колебаний основания токоприемника, которые передаются в точку контакта, а также к увеличению аэродинамической составляющей $P_{\text{кт}}$. Данный факт делает скорость самым важным фактором, влияющим на $P_{\text{кт}}$.

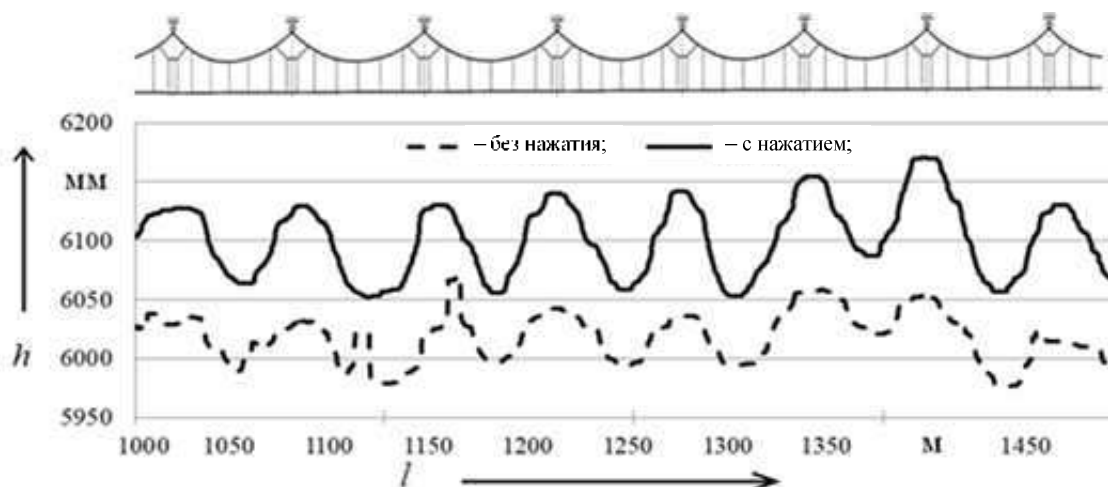


Рисунок 1 – Фрагмент записи высотного положения контактного провода без нажатия $h_n(l)$, с нажатием ($P_{\text{стат}} = 90 \text{ Н}$) $h_p(l)$ при скорости 5 км/ч

На высокоскоростных участках магистральных железных дорог ЭПС движется преимущественно с постоянной скоростью. Разгоны и торможения занимают незначительную часть поездки. В связи с этим актуальными задачами являются определение допустимой скорости движения по условиям токосъема на рассматриваемом участке, расчет показателей его качества, ранжирование участков и конфигураций ПКС по качеству токосъема.

Специалистами ОмГУПСа накоплен массив данных о вертикальной и горизонтальной регулировках ПКС на скоростных участках Октябрьской железной дороги и Северокавказской железной дороги, а также получены экспериментальные данные о $P_{\text{кт}}$ при использовании специального ЭПС (вагон-лаборатории ВИКС, электропоезда ЭВС2 «Сапсан», электровазов ЭП20, ЧС200 и др.).

Таким образом, входной вектор модели составлен из следующих наборов моментальных значений экспериментальных данных, привязанных к путевой координате и времени:

- высотное положение провода, отжатого токоприемником (h_n);
- высотное положение провода с контактным нажатием (h_p);
- зигзаг контактного провода (z);
- скорость ЭПС (U);
- контактное нажатие ($P_{\text{кт}}$).

Проведение анализа моделей прогнозирования.

Для решения задачи прогнозирования $P_{\text{кт}}$ можно использовать подходы с применением различных моделей. Основные результаты сравнения этих подходов приведены в таблице 1.

Результат корреляционного анализа эксплуатационных данных, полученных на скоростном испытательном полигоне Белореченск – Майкоп (2012 г.), сведен в таблицу 2, из данных которой следует, что предикторные переменные имеют слабую корреляционную зависимость с искомой величиной и друг с другом. Можно сделать вывод о том, что зависимость величин имеет сложный нелинейный характер, который корреляция не выявляет.

В случае составления нелинейной зависимости с несколькими предикторными величинами регрессионный анализ становится достаточно трудоемкой задачей.

После выполнения линеаризации и преобразования значений отклика, предикторов и коэффициентов уравнения (перевод нелинейных зависимостей в линейную форму и обратно) определяется вид нелинейной зависимости, который наилучшим образом описывает связь переменных при каждом парном анализе. Данный регрессионный анализ можно выполнить методом Брандона [10].

Таблица 1 – Основные результаты сравнения подходов с применением различных моделей

Модель	Преимущества	Недостатки
Регрессионная линейная модель: $P(t) = a_0 + a_n X_n(t) + \varepsilon_t$ Нелинейная модель: $P(t) = F(X(t), A)$	Простота, прозрачность моделирования	Трудоемкость определения коэффициентов и вида функциональной зависимости; сложность моделирования нелинейных процессов с несколькими предикторными переменными
Авторегрессионная: $P(t) = C + \varphi_n P_n(t - n) + \varepsilon_t$	Единообразие анализа и проектирования	Трудоемкость и ресурсоемкость идентификации моделей, сложность моделирования нелинейной зависимости; низкая адаптивность
Экспоненциального сглаживания	Простота моделирования	Недостаточная гибкость, низкая точность прогноза
Нейросетевая: $P(t) = \sum_{i=1}^m \omega_i X(t-1) + b;$ $X(t) = \varphi(P(t))$	Нелинейность масштабируемость, адаптивность, обучаемость	Отсутствие прозрачности, сложность выбора архитектуры и алгоритма обучения
Цепей Маркова	Простота моделирования	Невозможность моделирования процессов с длинной памятью
Классификационно-регрессионные деревья	Масштабируемость; быстрая и простота процесса обучения	Неоднозначность алгоритма построения дерева; сложность вопроса останова

Таблица 2 – Корреляционная таблица предикторных переменных

Переменные	h_n	$\Delta h(h_n - h_p)$	$ z $	U	$P_{кт}$
h_n	1,00	-0,18	-0,14	0,16	0,16
$\Delta h(h_n - h_p)$	-0,18	1,00	-0,27	0,29	-0,12
$ z $	-0,14	-0,27	1,00	-0,09	-0,29
U	0,16	0,29	-0,09	1,00	0,03
$P_{кт}$	0,16	-0,12	-0,29	0,03	1,00

Для прогнозирования $P_{кт}$ с применением множественной нелинейной регрессионной модели был выбран массив с данными о высотном положении, расположении проводов в плане пути (зигзаг) и отжати контактных проводов на участке длиной 2000 м. Расчеты регрессионного анализа производятся в *MS Excel* с использованием надстройки «BRANDDEN». В таблице 3 представлен фрагмент данных для моделирования динамики процесса.

Таблица 3 – Матрица входных и выходных данных

Номер записи		1	2	3	n	8025	8026	8027
Входная матрица X	h_n , мм	6027	6027	6027	...	5982,11	5982,09	5982,06
	Δh , мм	76	76	76	...	76,28	76,79	77,15
	z , мм	198	197,4	196,38	...	183,85	183,29	182,30
	U , м/с	32,5	32,5	32,5	...	31,9	31,9	31,9
Выходной вектор Y	$P_{кт}$, Н	104	103	105	...	114	115	116

На первом шаге анализа получено логарифмическое регрессионное уравнение:

$$P_{кт}(t) = 110,0128 \cdot (1,1304 \cdot \ln(h_n(t)) - 8,8303). \quad (1)$$

На втором шаге анализа получено степенное регрессионное уравнение:

$$P_{кт}(t) = 110,0128 \cdot (1,1304 \cdot \ln(h_n(t)) - 8,8303)(1,0892(z(t))^{(-0,02)}). \quad (2)$$

На третьем шаге анализа получено степенное регрессионное уравнение:

$$P_{кт}(t) = 110,0128(1,1304 \cdot \ln(h_n(t)) - 8,8303)(1,0892(z(t))^{(-0,02)})(1,1972 \cdot (h_p - h_n(t))^{(-0,04)}). \quad (3)$$

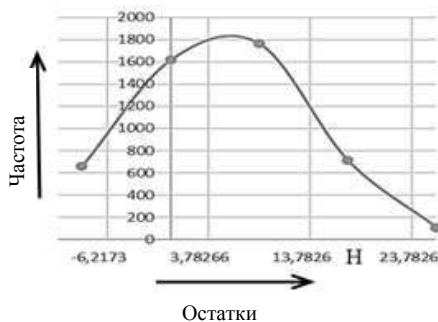


Рисунок 2 – Гистограмма остатков

В результате удалось получить аналитическое выражение, описывающее экспериментальную зависимость $P_{кт}$ от времени. Анализ остатков (разность между наблюдаемыми и предсказываемыми значениями) показал, что критический порог не превышен и гипотеза о нормальности распределения остатков (ошибки прогноза) принимается (рисунок 2). Среднеквадратическая ошибка (MSE) составила 82 Н (рисунок 3) [13].

С помощью данного метода спрогнозировать $P_{кт}$ удалось с невысокой точностью, что не позволяет проводить ранжирование участков и сравнивать различные конфигурации настроек.

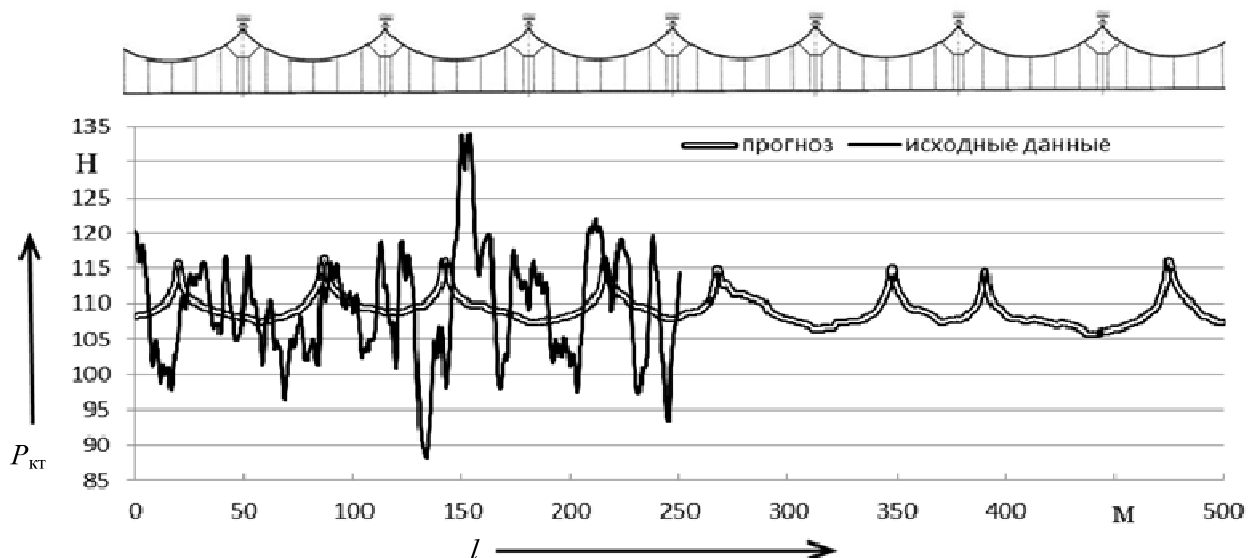


Рисунок 3 – Фрагмент прогноза $P_{кт}$ с применением регрессионной модели

Разработка имитационной модели на основе использования нейронной сети для расчета контактного нажатия.

Для реализации имитационной модели на основе нейронной сети (НС) в *Matlab* была подготовлена выборка, описывающая контактную сеть длиной 2000 м, включающая в себя входную матрицу ($h_n, \Delta h, z, U$) и сведения о $P_{кт}$, полученные экспериментально. Часть этой выборки (1600 м) выделена в тренировочный набор данных, используемый для обучения, остальная часть выборки используется в валидационном наборе данных, предназначенном для прекращения обучения, когда обобщение перестает улучшаться. В качестве тестового набора данных используется участок длиной 5000 м. Для обеспечения независимой оценки сети сведения о $P_{кт}$ на тестовом участке в модель не подавались.

В качестве базовой архитектуры применялась нелинейная авторегрессионная сеть (*Nonlinear Autoregressive Network – NARX*). *NARX* содержит в себе два слоя нейронов. В качестве функции активации в первом (скрытом) слое используется нелинейная сигмоидная функция в виде гиперболического тангенса (*TANSIG*) [11]. Использование нелинейных функций активации позволяет настроить нейронную сеть на реализацию нелинейных связей между входом и выходом. Функция активации вычисляет выход слоя по его входу.

$$\tan \operatorname{sig}(n) = \frac{2}{(1 + e^{-2n})} - 1, \quad (4)$$

где n – матрица входных векторов.

Количество нейронов в скрытом слое согласно теореме Колмогорова, принято равным 9. На практике количество нейронов может быть уменьшено, чтобы избежать переобучения [12].

Выходной слой сети содержит один нейрон. В качестве функции выполнения в выходном слое и оценки эффективности прогнозирования используется среднеквадратичная ошибка (MSE) [13]:

$$MSE = \frac{1}{N} \sum_{t=1}^N (P(t) - \tilde{P}(t))^2, \quad (5)$$

где N – количество отчетов.

В качестве алгоритма обучения сети на основании проделанной опытной тренировки более высокую эффективность прогнозирования из имеющихся алгоритмов в *MatLAB* обеспечивает функция на основе обратного распространения ошибки с использованием Байесовской регуляризации (*trainbr*) (рисунок 4).



Рисунок 4 – Выбор алгоритма обучения NARX-сети на основе метода квадрата минимальной ошибки

TRAINBR – функция обучения сети, которая модифицирует значения весов и смещений в соответствии с алгоритмом оптимизации Левенберга – Марквардта. При этом минимизируется комбинация квадратов ошибок и весов, затем определяется скорректированная комбинация, которая обеспечивает улучшение обобщающей способности сети. Эта процедура называется байесовской регуляризацией [14].

NARX-сеть является сетью прямого распределения, основанной на линейной модели ARX. В работе используются два вида архитектуры сетей NARX:

- последовательно-параллельная (открытый цикл) (рисунок 5);
- параллельная (замкнутый цикл) (рисунок 6).

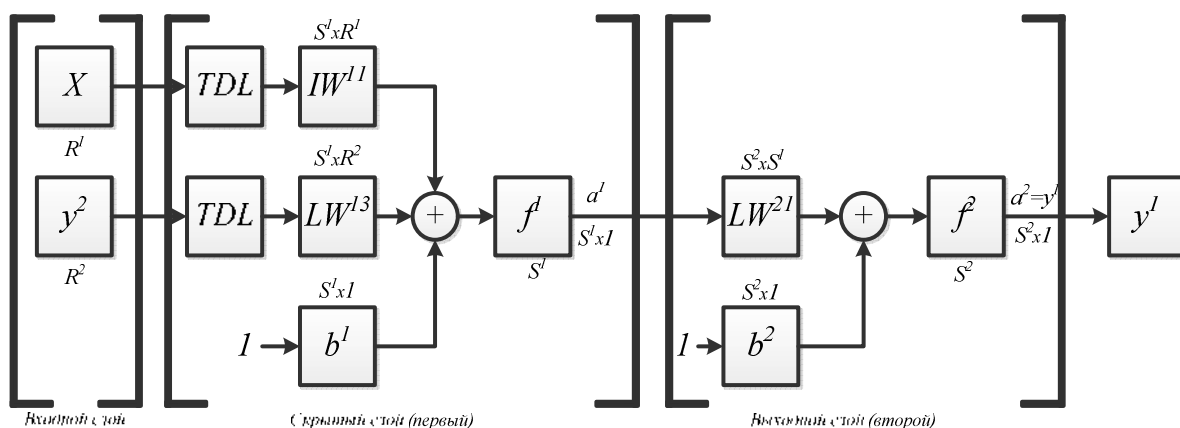


Рисунок 5 – Структурная схема двухслойной нейронной сети (разомкнутый цикл):

X – входной вектор из таблицы 3; TDL – линия задержки;

Y^1 – $P_{\text{кт}}$ расчетное; Y^2 – $P_{\text{кт}}$ экспериментальное

Открытый цикл *NARX* применялся для обучения сети, так как в ней используется истинный вывод вместо того, чтобы возвращать расчетный вывод. Замкнутый цикл хорошо подходит для многоступенчатого прогнозирования, так как в нем присутствует обратная связь (подача расчетного выходного значения обратно на вход). Для преобразования сетей *NARX* из открытого цикла в замкнутый цикл применяется функция *closeloop*.

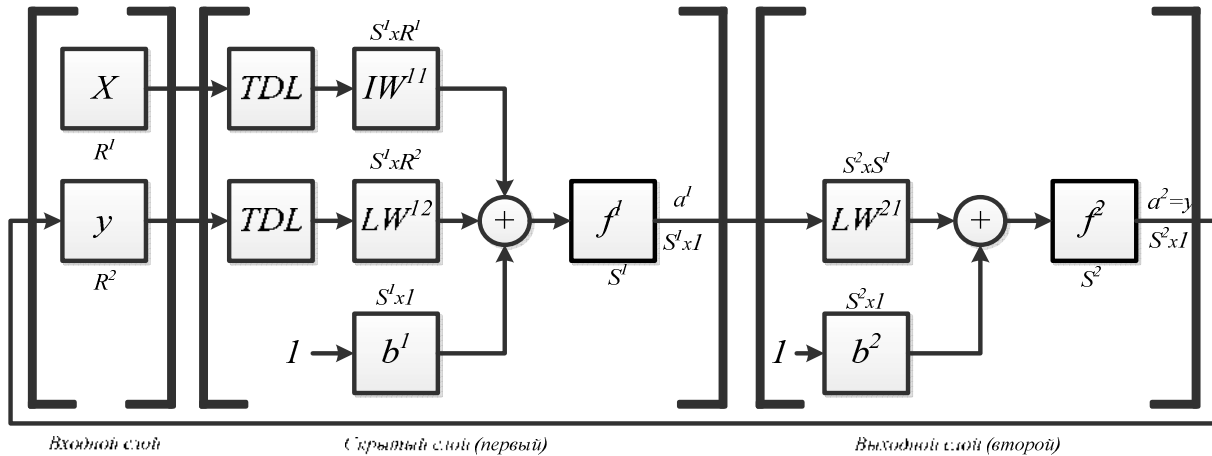


Рисунок 6 – Структурная схема двухслойной нейронной сети (замкнутый цикл)

Векторы выходных данных слоев сети:
разомкнутый цикл:

$$a^1 = f^1(IW^{11}X + LW^{12}Y + b^1); \quad (6)$$

$$a^2 = f^2(LW^{21}a^1 + b^2); \quad (7)$$

замкнутый цикл:

$$a^1 = f^1(IW^{11}X + LW^{12}Y + b^1); \quad (8)$$

$$a^2 = f^2(LW^{21}a^1 + b^2) = Y. \quad (9)$$

Итогом работы НС являются матрица входных весов $IW(9 \times 8)$, матрица весов связей между слоями $LW(9 \times 2)$, матрицы векторов смещений первого $b^1(9 \times 1)$ и второго $b^2(-0.0251)$ слоев). Предложенная имитационная модель на основе использования нейронной сети обучается на основании значений изменения высотного положения, жесткости ПКС, зигзага и скорости ЭПС, а также сведений о контактном нажатии в системе электропоезда ЭП20, оснащенного токоприемником *Faiveley* типа *AX-NG 023*. Модель может быть использована без предварительного обучения для прогнозирования $P_{кт}$ на других участках обращения данного типа ЭПС (рисунок 7). Среднеквадратическая ошибка (*MSE*) составила 56 Н. Среднее значение расчетного $P_{кт}$ отличается от экспериментального на 0,19 Н при скорости 160 км/ч.

С помощью полученной НС было выполнено ранжирование участков скоростной магистрали Санкт-Петербург – Москва без прямых измерений контактного нажатия, на основании данных о регулировке, полученных с помощью вагона-лаборатории в ходе инспекционных поездок (рисунок 8).

В результате ранжирования выделены участки, требующие регулировки контактной подвески по условиям экономичного токосъема. Движение с высокими скоростями по данным участкам нецелесообразно в связи со значительным ухудшением качества токосъема и высоким износом проводов и контактных вставок.

Предлагаемый метод может быть рекомендован для использования при оценке и прогнозировании работы пары «токоприемник – ПКС» для перспективных скоростных и высокоскоростных линий, в том числе Москва – Казань.

Практическая ценность подготовки обученной нейронной сети заключается в возможности проверки различных конфигураций контактной подвески без ее реального монтажа. Подготовленные данные жесткости и высотных положений, загруженные во входную матрицу НС, позволяют рассчитать $P_{кт}$ для рассматриваемого варианта.

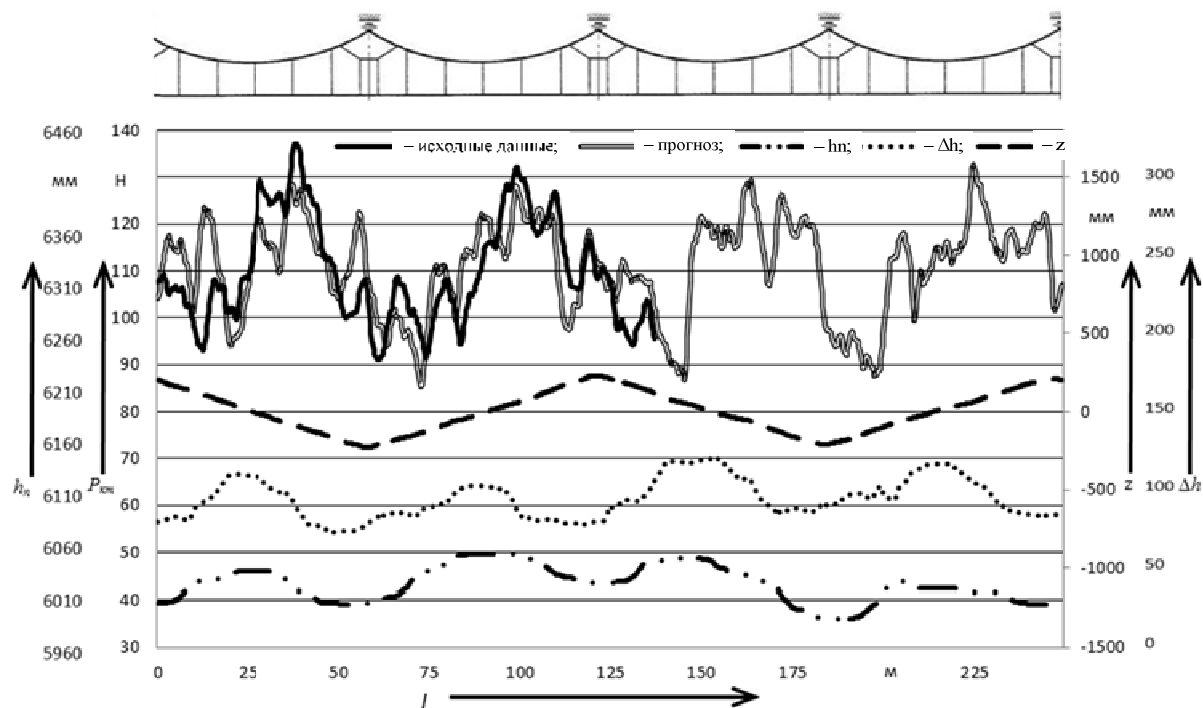


Рисунок 7 – Фрагмент прогноза $P_{кт}$ с применением нейросетевой модели

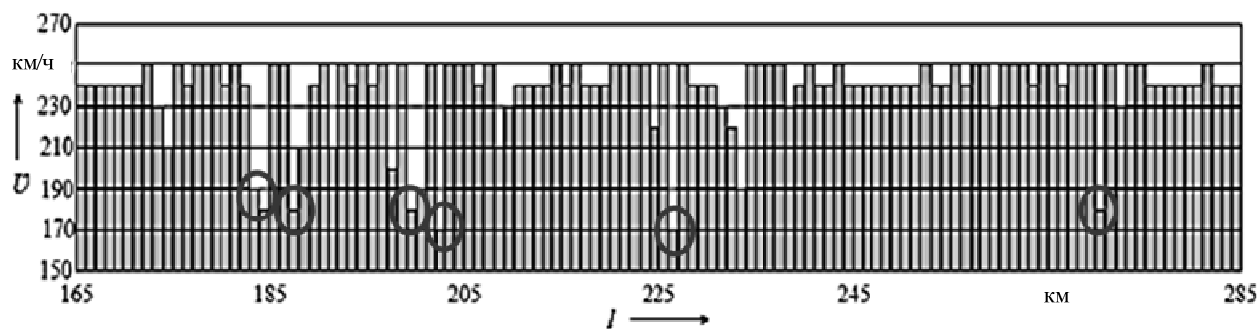


Рисунок 8 – Допустимые скорости движения по условиям экономического токосъема для первого пути фрагмента линии Санкт-Петербург – Москва

Публикация осуществлена в рамках реализации гранта ОАО «РЖД» на развитие научно-педагогических школ в области железнодорожного транспорта.

Список литературы

1. Распоряжение Правительства РФ от 17.06.2008 № 877-р «О Стратегии развития железнодорожного транспорта в Российской Федерации до 2030 года» [Электронный ресурс]. Режим доступа <https://zakonbase.ru/content/part/581318>
2. Кудряшов, Е. В. Информационное сопровождение жизненного цикла контактной сети на основе конечно-элементной математической модели [Текст] / Е. В. Кудряшов // Токосъем и тяговое электроснабжение при высокоскоростном движении на постоянном токе: Сб. науч. тр. ОАО «ВНИИЖТ». – М.: Интекст, 2010. – С. 52 – 66.

3. Голубков, А. С. Совершенствование методики исследования волновых процессов в контактной подвеске на основе конечно-элементной модели [Текст] / А. С. Голубков, А. Н. Смердин, В. А. Жданов // Известия Транссиба / Омский гос. ун-т путей сообщения. Омск. – 2011. – № 1(1). – С. 30 – 37.
4. Математическое моделирование механического взаимодействия токоприемников и контактной подвески для скоростных электрифицированных железных дорог [Текст] / Б. С. Григорьев, О. А. Головин и др. // Научно-технические ведомости СПбГПУ. Наука и образование. – 2012. – № 4 (159). – С. 155 – 162.
5. Zhigang Liu, Song Y, Han Y. et al. Advances of research on high-speed railway catenary. *J. Mod. Transport*, 2018. – no. 26(1). Pp. 1 – 23.
6. Сидоров, О. А. Методика оценки функциональной готовности системы токосъема скоростных участков магистральных железных дорог [Текст] / О. А. Сидоров, А. Н. Смердин, В. А. Жданов // Вестник ВНИИЖТа / Научно-исследовательский ин-т ж.-д. трансп. – М. 2012. – № 1. – С. 27 – 32.
7. Применение цифровых средств измерения для определения динамических характеристик устройств токосъема [Текст] / О. А. Сидоров, В. М. Павлов и др. // Транспорт Урала / Уральский гос. ун-т путей сообщения. – Екатеринбург. – 2007. – № 4. – С. 76 – 79.
8. Павлов, В. М. Использование измерительных полозов для определения параметров токосъема в ходе линейных испытаний высокоскоростного поезда «Сапсан» [Текст] / В. М. Павлов, А. Н. Смердин // Токосъем и тяговое электроснабжение при высокоскоростном движении: Сб. науч. тр. – М.: Интекст, 2010. – С. 109 – 117.
9. Мещеряков, В. А. Предпосылки получения статистически достоверных данных в ходе имитационного моделирования токосъема [Текст] / В. А. Мещеряков, А. Н. Смердин, А. С. Голубков // Вестник всероссийского научно-исследовательского и проектно-конструкторского института электровозостроения. – ВЭЛНИИ. – М. – 2013. – № 2 (66). – С. 104 – 121.
10. Деняк, О. А. Множественный регрессионный анализ методом Брандона в EXCEL [Текст] / О. А. Деняк // Логистика: современные тенденции развития. Материалы междунар. науч.-практ. конф. / ГУМРФ им. адм. С. О. Макарова. – СПб, 2016. – С.108 – 111.
11. MathWorks. Neural Network Toolbox Documentation. [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://www.mathworks.com/help/nnet/ref/tansig.html> (Дата обращения 13.02.2018).
12. Swingler, K. Applying neural networks: a practical guide / K. Swingler, M. Kaufman. – San Francisco. – 1996, – 303 p.
13. Чучуева, И. А. Модель прогнозирования временных рядов по выборке максимального подобию [Текст]: Дис... канд. техн. наук: 05.13.18 / Ирина Александровна Чучуева. – М., 2012. – 242 с.
14. List of Neural Network Toolbox functions. [Электронный ресурс]. Режим доступа: <http://matlab.exponenta.ru/neuralnetwork/book2/index.php> (Дата обращения 13.02.2018).

References

1. Rasporyazhenie Pravitel'stva RF ot 17.06.2008 N 877-r «O Strategii razvitiya zheleznodorozhnogo transporta v Rossijskoj Federacii do 2030 goda» (Ordinance of the Government of the Russian Federation of June 17, 2008 N 877-r «On the Strategy for the Development of Railway Transport in the Russian Federation until 2030»).
2. Kudryashov E. Information support of the life cycle of the contact network based on the finite element mathematical model [Informacionnoe soprovozhdenie zhiznennogo cikla kontaktnoj seti na osnove konechno-ehlementnoj matematicheskoj modeli]. *Current-acquisition and traction power supply in high-speed DC motion: Sat. sci. works of JSC VNIIZhT*. Moscow: Intetext, 2010, pp. 52 – 66.

3. Golubkov A. S., Smerdin A. N., Zhdanov V. A. Perfection of a technique for studying wave processes in a contact suspension based on a finite element model [Sovershenstvovanie metodiki issledovaniya volnovykh protsessov v kontaktnoj podveske na osnove konechno-`elementnoj modeli]. *Izvestiya Transsiba – The journal of Transsib Railway Studies*, 2011, no. 1, pp. 30 – 37.
4. Grigoriev B. S., Golovin O. A., Viktorov E. D., Kudryashov E. V. Mathematical modeling of the mechanical interaction of current collectors and contact suspension for high-speed electrified railways [Matematicheskoe modelirovanie mehanicheskogo vzaimodejstviya tokopriemnikov i kontaktnoj podveski dlja skorostnyh `elektrifitsirovannyh zheleznyh dorog]. *Nauchno-tehnicheskie vedomosti SPbGPU. Nauka i obrazovanie – Scientific and technical statements of SPbPU. Science and education*, 2012, no. 4 (159), pp. 155 – 162.
5. Zhigang Liu, Song Y., Han Y., Wang H., Zhang J., Han Z. Advances of research on high-speed railway catenary. *J. Mod. Transport*, 2018, no. 26 (1), pp. 1 – 23.
6. Sidorov O. A., Smerdin A. N., Zhdanov V. A. A technique for assessing the functional readiness of a current collection system for high-speed sections of main railways [Metodika otsenki funktsional'noj gotovnosti sistemy tokos"ema skorostnyh uchastkov magistral'nyh zheleznyh dorog]. *Research Institute of Railway Engineering. transp.* Moscow, 2012, no 1, pp. 27 – 32.
7. Sidorov O. A., Pavlov V. M., Smerdin A. N., Zarenkov S. V., Golubkov A. S. The use of digital measuring instruments to determine the dynamic characteristics of current collection devices [Primenenie tsifrovyyh sredstv izmereniya dlja opredeleniya dinamicheskikh harakteristik ustrojstv tokos"ema]. *Transport Urala – Transport of the Urals*. 2007, no 4, pp. 76 – 79.
8. Pavlov V. M., Smerdin A. N. Use of measuring strips for determining current collector parameters during linear tests of the Sapsan high-speed train [Ispol'zovanie izmeritel'nyh polozov dlja opredeleniya parametrov tokos"ema v hode linejnyh ispytaniy vysokoskorostnogo poezda «Sapsan»]. *Current-current and traction power supply for high-speed traffic: Sat. sci. tr.* Moscow: Intetext, 2010, pp. 109 – 117.
9. Meshcheryakov V.A., Smerdin A.N., Golubkov A.S. The prerequisites for obtaining statistically reliable data during the simulation of the current collector [Predposylki poluchenija statisticheskogo dostovernogo dannogo v hode imitatsionnogo modelirovaniya tokos"ema]. *Vestnik of the All-Russian Scientific Research and Design Institute of Electric Locomotive Industry*. 2013, no 2 (66), pp. 104 – 121.
10. Denyak O. A. Multiple regression analysis by the Brandon method in EXCEL [Mnozhestvennyj regressionnyj analiz metodom Brandona v EXCEL]. *Logistics: current trends of development. Part 1: materials of the XV International. scientific-practical. Conf. 7, April 8, 2016: Mat. doc. - SPb.: Publishing House GUMRF them. adm. S.O. Makarova*. 2016, pp.108 – 111.
11. MathWorks. Neural Network Toolbox Documentation. Access mode: <https://www.mathworks.com/help/nnet/ref/tansig.html> (Date of circulation 13.02.2018).
12. Swingler K. Applying neural networks: a practical guide / Morgan Kaufman, San Francisco, 1996, 303 p.
13. Chuchueva I. A. Model' prognozirovaniya vremennyh rjadov po vyborke maksimal'nogo podobija (Model of forecasting time series for a sample of maximum similarity). *Cand. Thesis*, Moscow, 2012, 242 p.
14. List of Neural Network Toolbox functions. Access mode: <http://matlab.exponenta.ru/neuralnetwork/book2/index.php> (Date of circulation 13.02.2018).

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Голубков Антон Сергеевич

Омский государственный университет путей сообщения (ОмГУПС).

Маркса пр., д. 35, г. Омск, 644046, Российская Федерация.

Кандидат технических наук, доцент кафедры

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Golubkov Anton Sergeevich

Omsk State Transport University (OSTU).

35, Marx st., Omsk, 644046, the Russian Federation.

Candidate of Technical Sciences, associate professor of the department «Electricity supply of railway transport», OSTU.

«Электроснабжение железнодорожного транспорта»,
ОмГУПС.

Ермачков Глеб Романович

Омский государственный университет путей
сообщения (ОмГУПС).

Маркса пр., д. 35, г. Омск, 644046, Российская
Федерация.

Аспирант кафедры «Электроснабжение железно-
дорожного транспорта», ОмГУПС.

Тел.: +7 (929) 369 06-17.

E-mail: gl.ermachkov@gmail.com.

Ermachkov Gleb Romanovich

Omsk State Transport University (OSTU).

35, Marx st., Omsk, 644046, the Russian Federation.

Post-graduate student of the department «Electricity
supply of railway transport», OSTU.

Phone: +7 (929) 369 06-17.

E-mail: gl.ermachkov@gmail.com.

Смердин Александр Николаевич

Омский государственный университет путей
сообщения (ОмГУПС).

Маркса пр., д. 35, г. Омск, 644046, Российская
Федерация.

Кандидат технических наук, доцент кафедры
«Электроснабжение железнодорожного транспорта»,
ОмГУПС.

E-mail: alexandr.smerdin@omgups.com.

Smerdin Alexander Nikolaevich

Omsk State Transport University (OSTU).

35, Marx st., Omsk, 644046, the Russian Federation.

Candidate of Technical Sciences, associate professor
of the department «Electricity supply of railway
transport», OSTU.

E-mail: alexandr.smerdin@omgups.com.

Сидоров Олег Алексеевич

Омский государственный университет путей
сообщения (ОмГУПС).

Маркса пр., д. 35, г. Омск, 644046, Российская
Федерация.

Доктор технических наук, профессор, заведую-
щий кафедрой «Электроснабжение железнодорожного
транспорта», ОмГУПС.

Sidorov Oleg Alekseevich

Omsk State Transport University (OSTU).

35, Marx st., Omsk, 644046, the Russian Federation.

Doctor of Technical Sciences, Professor, Head of the
department «Electricity supply of railway transport»,
OSTU.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКОЕ ОПИСАНИЕ СТАТЬИ

Применение нейронных сетей при моделировании
системы токосъема на электрифицированных железных
дорогах [Текст] / А. С. Голубков, Г. Р. Ермачков и др. // *Известия Транссиба* / Омский гос. ун-т путей сообще-
ния. – Омск. – 2018. – № 1(33). – С 69 – 79..

BIBLIOGRAPHIC DESCRIPTION

Yermachkov G.R., Smerdin A.N., Golubkov A.S., Si-
dorov O.A. Application of neural networks at simulation of
a system of current collection on electric railways. *Journal
of Transsib Railway Studies*, 2018, vol. 1, no 33,
pp. 69 – 79 (In Russian).

УДК 629.064.5

А. Л. Каштанов, Н. Г. Ананьева

Омский государственный университет путей сообщения (ОмГУПС), г. Омск, Российская Федерация

ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ РАСПРЕДЕЛИТЕЛЬНЫЕ СЕТИ ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНЫХ УЗЛОВ. ПРОБЛЕМЫ И ПУТИ ИХ РЕШЕНИЯ

Аннотация. В статье дана характеристика текущего состояния в электросетевом комплексе нетягово-
го электроснабжения железнодорожного транспорта. Показаны основные недостатки существующей
системы учета электроэнергии в распределительных сетях 0,4 – 10 кВ. Рассмотрены основные направления
по инновационному развитию электросетевого комплекса нетяговой энергетики, в том числе направленные на
повышение энергоэффективности процесса преобразования, передачи и потребления электрической энергии за
счет управления режимами работы распределительных сетей. Приведено описание основных принципов
построения «Цифрового района электроснабжения».

Ключевые слова: электросетевой комплекс, железнодорожный узел, учет электроэнергии, оперативно-
технологическое управление.