

## Применение нейросетевых методов прогнозирования электропотребления на железнодорожном транспорте

В. Э. Осипова\*, Д. А. Яковлев

ФГБОУ ВО «Иркутский государственный университет путей сообщения», г. Иркутск, Российская Федерация

Адрес: 664074, Российская Федерация, г. Иркутск, ул. Чернышевского, д. 15

\* Valeri3307@mail.ru

### Аннотация

В статье показана актуальность прогнозирования электропотребления с использованием автоматизированной системы учёта электрической энергии, учитывающей различные уровни иерархии системы тягового электроснабжения. Рассмотрены особенности современного управления топливно-энергетическими ресурсами предприятия, на примере Забайкальской дирекции по энергообеспечению – структурного подразделения Трансэнерго – филиала открытого акционерного общества «Российские железные дороги». Рациональное использование топливно-энергетических ресурсов, внедрение энергосберегающих и ресурсосберегающих технологий являются одними из наиболее актуальных как в целом в России, так и на железнодорожном транспорте в частности. Специфика экономического развития России и особенности формирования тарифов на рынке электрической энергии повлекли за собой рост ее стоимости. В связи с этим, снижение затрат на приобретение топливно-энергетических ресурсов одна из основных целей энергетической стратегии железнодорожного транспорта. Результатом энергосберегающей политики железнодорожного транспорта, почти по всем составляющим потребления топливно-энергетических ресурсов, исключая тягу поездов, является снижение затрат на покупку электрической энергии в ситуации реформирования электроэнергетики путем выхода на оптовый рынок электрической энергии (ОРЭ). Что позволяет значительно снизить стоимость потребляемой энергии, так как стоимость электроэнергии, получаемой железной дорогой с ОРЭ, будет существенно ниже стоимости электроэнергии, получаемой от гарантирующего поставщика – региональной энергосистемы. В работе проведен анализ факторов, влияющих на величину потребления электрической энергии на тягу поездов. Рассмотрены нейросетевые модели, обладающие высокой аппроксимирующей способностью, позволяющие обрабатывать статистическую информацию и выполнять прогнозные оценки. Показано, что наиболее приемлемыми для прогноза электропотребления следует считать многослойные нейронные сети. Рассмотрен метод нейросетевого прогнозирования потребления электрической энергии.

**Ключевые слова:** нейронные сети, прогнозирование электропотребления, сеть прямого распространения, персептрон, железная дорога, тяга поездов

*Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.*

**Для цитирования:** Осипова В. Э., Яковлев Д. А. Применение нейросетевых методов прогнозирования электропотребления на железнодорожном транспорте // Современные информационные технологии и ИТ-образование. 2022. Т. 18, № 1. С. 107-118. doi: <https://doi.org/10.25559/SITITO.18.202201.107-118>

© Осипова В. Э., Яковлев Д. А., 2022



Контент доступен под лицензией Creative Commons Attribution 4.0 License.  
The content is available under Creative Commons Attribution 4.0 License.



## Place of Neural Network Methods for Predicting Power Consumption in Railway Transport

V. E. Osipova\*, D. A. Yakovlev

Irkutsk State Transport University, Irkutsk, Russian Federation

Address: 15 Chernyshevsky St., Irkutsk 664074, Russian Federation

\* Valeri3307@mail.ru

### Abstract

The article shows the relevance of forecasting electricity consumption using an automated electric energy metering system that takes into account various levels of the hierarchy of the power supply system. The features of modern management of fuel and energy resources of the enterprise are considered, using the example of the Trans-Baikal Directorate for Energy Supply – a structural subdivision of Transenergo – a branch of the open joint stock company “Russian Railways”. The rational use of fuel and energy resources, the introduction of energy-saving and resource-saving technologies are among the most relevant both in Russia as a whole and in railway transport in particular. The specifics of Russia’s economic development and the specifics of the formation of tariffs in the electric energy market have led to an increase in its cost. In this regard, reducing the cost of purchasing fuel and energy resources is one of the main goals of the energy strategy of railway transport. The result of the energy-saving policy of railway transport, in almost all components of the consumption of fuel and energy resources, excluding train traction, is a reduction in the cost of buying electric energy in the situation of reforming electric energy by entering the wholesale electric energy market (RE). It makes possible to reduce the cost of the consumed energy significantly, so the cost of electricity received by the railway from the EPR will be greatly lower than the cost of electricity received from the guaranteeing supplier – the regional power system. The paper analyzes the factors affecting on the amount of electric energy consumption for train traction. Neural network models with high approximating ability are considered, which allow processing statistical information and performing predictive estimates. It is shown that multilayer neural networks should be considered the most acceptable for predicting power consumption. The method of neural network forecasting of electric energy consumption is considered.

**Keywords:** neural networks, power consumption forecasting, direct distribution network, perceptron, railway, train traction

*The authors declare no conflict of interest.*

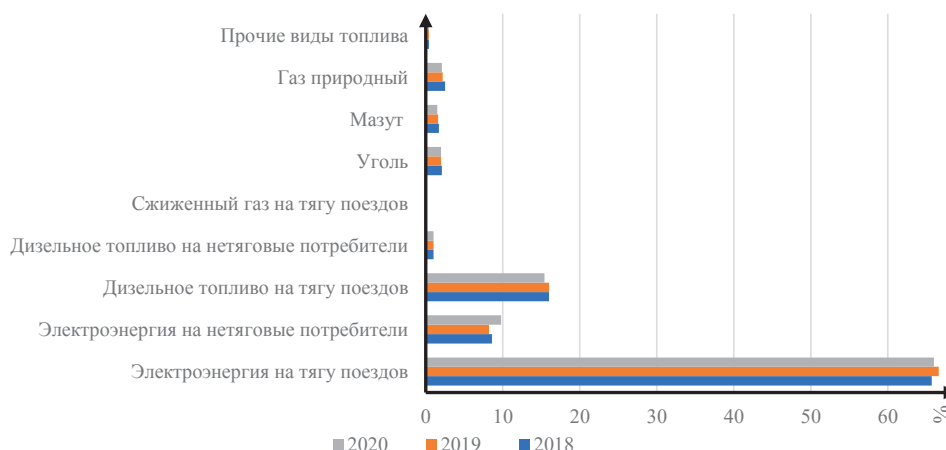
**For citation:** Osipova V.E., Yakovlev D.A. Place of Neural Network Methods for Predicting Power Consumption in Railway Transport. *Sovremennye informacionnye tehnologii i IT-obrazovanie = Modern Information Technologies and IT-Education*. 2022; 18(1):107-118. doi: <https://doi.org/10.25559/SITITO.18.202201.107-118>



## Введение

Одним из основных направлений перевозочного процесса сегодня является железнодорожный транспорт, главной задачей которого является транспортировка груза большого объема на дальние расстояния. На железные дороги России приходится 85% грузооборота страны, обеспечивая непрерывное взаимо-

действие промышленных центров с потребителями, организуя тем самым взаимодействие многих видов транспорта. Кроме того, железные дороги обеспечивают 35% пассажирских перевозок страны. Таким образом, железнодорожный транспорт является одним из крупных и стабильных транспортных энергопотребителей страны. Динамика расхода энергоресурсов ОАО «РЖД» за три года представлена на рисунке 1.



Р и с. 1. Динамика потребления топливно-энергетических ресурсов объектами железнодорожного транспорта  
F i g. 1. Dynamics of consumption of fuel and energy resources by railway transport facilities

Вопросы рационального использования топливно-энергетических ресурсов (ТЭР), внедрения энергосберегающих и ресурсосберегающих технологий являются одними из наиболее актуальных как в целом в России, так и на железнодорожном транспорте<sup>1</sup> в частности [2-4]. Энергетика железнодорожного транспорта характеризуется разветвлённой структурой. К основным видам потребляемых энергоресурсов относятся электроэнергия и дизельное топливо на тягу поездов, электроэнергия и дизельное топливо на нетяговые потребители, а также топочное топливо (уголь, мазут, природный газ) для выработки тепловой энергии на собственных котельных [9; 11]. Большое потребление электроэнергии способствует развитию направления энергосбережения в отрасли, что соответствует стратегии энергетики страны в целом. С целью развития данного направления в рамках ОАО «РЖД» разработана «Энергетическая стратегия железнодорожного транспорта на период до 2030 года»<sup>2</sup>, согласно которой для обеспечения энергосбережения система железнодорожного транспорта требует оптимизация управления, которая достигается путем качественного улучшения структуры управления потреблением ТЭР. Применение современных информационных технологий, систем учета, нормирования и мониторинга потребления энер-

горесурсов, а также систем коммуникации производителей и потребителей энергоресурсов направлено на снижение затрат на приобретение топливно-энергетических ресурсов.

Результатом энергосберегающей политики железнодорожного транспорта, почти по всем составляющим потребления ТЭР, исключая тягу поездов, является снижение затрат на покупку электрической энергии в ситуации реформирования электроэнергетики, путем выхода на оптовый рынок электрической энергии (ОРЭ) [6]. Это позволяет значительно снизить стоимость потребленной энергии за счет разницы между розничной стоимостью электроэнергии и оптовой ценой за поставку электроэнергии от гарантирующего поставщика (региональной энергосистемы).

На сегодняшний день договорные отношения по приобретению электроэнергии осуществляются по установленным тарифам, согласно которых отклонение величины фактического электропотребления в большую или меньшую сторону облагается штрафом со стороны региональной энергетической компании<sup>3</sup>.

Анализ существующих соотношений диапазонов и коэффициентам к тарифам позволяет сделать вывод о том, что для потребителя приемлемым диапазоном с минимальными

<sup>1</sup> Моделирование и прогнозирования процессов электропотребления на железнодорожном транспорте / В. П. Закарюкин, А. В. Крюков, Н. В. Раевский, Д. А. Яковлев; под ред. профессора А. В. Крюкова. Иркутск, 2007. 115 с.

<sup>2</sup> Энергетическая стратегия холдинга «Российские железные дороги» на период до 2015 года и на перспективу до 2030 года: утв. Распоряжением ОАО «РЖД» 15 декабря 2011 г. № 2718 р. [Электронный ресурс]. URL: [http://www.rzd-expo.ru/doc/Energ\\_Strateg\\_new.pdf](http://www.rzd-expo.ru/doc/Energ_Strateg_new.pdf) (дата обращения: 16.02.2022).

<sup>3</sup> Распоряжение ОАО «РЖД» от 11.02.2008 № 269 «Об энергетической стратегии ОАО «РЖД» на период до 2010 года и на перспективу до 2030 года». [Электронный ресурс]. URL: <https://base.garant.ru/70787688> (дата обращения: 16.02.2022).



штрафными санкциями можно считать погрешность  $\pm 5\%$ . В связи с этим одним из способов снижения затрат является оптимизация процента погрешности прогнозируемой величины электропотребления до минимума. На основании сказанного, в настоящее время к методам прогнозирования электропотребления предъявляются жесткие требования.

## Особенности системы электроснабжения железнодорожного транспорта на примере Забайкальской железной дороги

Оптимизация топливно-энергетического баланса основывается на качественном прогнозировании потребляемого энергоресурса. Прогнозы могут охватывать различные уровни объекта: от микроуровня, рассматривающего развитие отдельных структурных подразделений железнодорожного транспорта; до макроуровня, анализирующего процессы в масштабе отрасли.

Особенностью сложившейся системы электроснабжения железнодорожного транспорта является питание от тяговых подстанций не только электрического подвижного состава, но и нетяговых потребителей, нагрузка которых может достигать до 25% от общего электропотребления. Рассмотрим особенности системы электроснабжения железнодорожного транспорта на примере Забайкальской железной дороги.

Особенностью структуры управления Забайкальской железной дороги (ЗабЖД) является безотделенческий путь развития, при котором управление структурными подразделениями осуществляется соответствующими дирекциями и службами дороги.

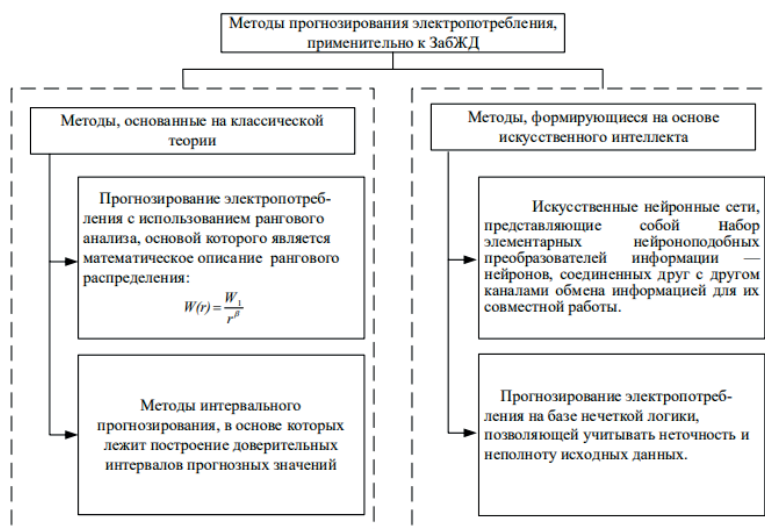
Система управления ЗабЖД представляет собой совокупность управляющего и управляемого объектов. Применительно к системе управления ЗабЖД эта совокупность представляет собой систему взаимодействия начальника дороги (или его заместителей) и структурных (линейных) подразделений дороги соответственно.

Организационная структура управления ОАО «РЖД» имеет все возможности для формирования эффективной системы управления топливно-энергетическими ресурсами на всех уровнях управления. Анализ современного состояния системы управления процессом формирования топливно-энергетическими ресурсами баланса показал, что в границах ЗабЖД данным направлением занимаются дирекции тяги и электроснабжения, а также служба гражданских сооружений.

На сегодняшний день в структуре ОАО «РЖД» сложилась децентрализованная система управления топливно-энергетическими ресурсами [10], а принятие управленческих решений для формирования топливно-энергетического баланса на предприятии осуществляется либо на основе традиционных методов управления: экспертного мнения или теории ограничения; либо на основе прогнозных значений, получивших наибольшее распространение.

Выбор способа и метода прогнозирования зависит от специфики исходной информации, характеризующей объект прогнозирования, длительности прогноза, желаемого экономического эффекта и уровня научно-технического прогресса.

Методы прогнозирования, разработанные на классических математических концепциях, ориентированы на условия стационарности, наличие достаточной и полноценной информации, характеризующей состояние объекта, а также применение удельных норм расхода электрической энергии<sup>4</sup> [3; 7].



Р и с. 2. Структурная схема методов прогнозирования электропотребления, применительно к Забайкальской железной дороге

Fig. 2. Block diagram of methods for predicting electricity consumption for the Trans-Baikal Railway

<sup>4</sup> Литвинцев В. Г. Краткосрочное и оперативное прогнозирование потребления электрической энергии на тягу поездов методом интервальной регрессии: дис...канд.тех.наук. Чита, 2011. 153 с.



Современные условия работы характеризуются неравномерностью загрузки и неполнотой и точностью исходных данных, что требует совершенствования методов анализа и прогнозирования электропотребления<sup>5</sup>.

Структурная схема методов прогнозирования электропотребления, применительно к Забайкальской железной дороге представлена на рисунке 2.

Согласно представленной схеме существующие методы прогнозирования можно разделить на две группы:

- 1) методы, основанные на классической теории;
- 2) методы, формирующиеся на основе искусственного интеллекта.

Особенностью традиционных методов прогнозирования является наличие большого объема достоверных статистических данных, характеризующих состояние объекта. К классическим методам прогнозирования относится прогнозирование расхода электрической энергии с использованием технокенологического подхода – рангового распределения, основой которого является процесс выделения ценза, с целью определения в нем объектов исследования, ранжируемых за период предыстории, и исследуемый параметр.

Наряду с ранговым анализом, сегодня к традиционным методам прогнозирования относят методы интервального прогнозирования, особенностью которых является определение результирующего прогнозного значения в определенном количественном диапазоне (доверительном интервале). Интервальное прогнозирование широко используется при формировании заявки на электропотребление, для анализа технико-экономических параметров системы и лежит в основе многих программных комплексов по прогнозированию, одним из которых является программный комплекс «Энергостат», получивший широкое распространение на территории дальневосточной области.

К современным методам прогнозирования относят методы прогнозирования на основе искусственного интеллекта, одним из которых является нейросетевое прогнозирование.

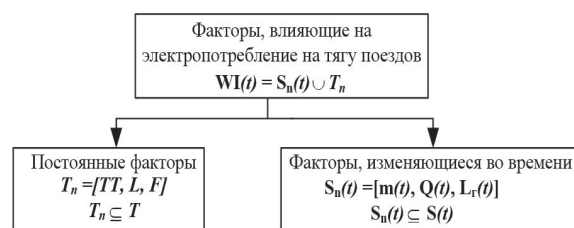
Применение методов интеллектуального прогнозирования представляется перспективным, в виду наличия большого числа факторов, затрудняющих прогнозирование потребления расхода ТЭР. К ним следует отнести: большое количество точек отбора мощности, сложный профиль пути, питание тяговых подстанций от двух энергосистем («Трансэнерго» – МРСК Сибири (Читаэнерго) и ДРСК (Амурские сети)), различие в климатических условиях на протяжении более двух тысяч трехсот километров магистрали, значительную долю нетяговых потребителей в составе нагрузки. Рассмотрим факторы, влияющие на величину электропотребления.

## Факторы, влияющие на величину электропотребления

К факторам, влияющим на величину электропотребления можно отнести: объемы грузоперевозок; тип тягового состава и его эксплуатационные характеристики (изношенность); график движения поездов; особенности технической конструк-

ции поездоучастков (продольный профиль пути); грузооборот участка (масса поезда, количество поездов на участке); тип тягового электроснабжения, конструктивные особенности системы тягового электроснабжения; квалификация персонала и др. [7], [12], [14-17], [19-25].

Рассматриваемые показатели условно можно разделить на устойчивые (тип тягового электроснабжения, расстояние между тяговыми подстанциями, продольный профиль пути участка) и амбеберические (величина грузопотока электрифицированного участка, поездная скорость, величина линейного пробега), фиксируемые в установленные моменты времени. Решение задачи по формированию топливно-энергетического баланса предприятия осуществляется на основе сложных математических моделей, описывающих имеющиеся взаимозависимости и закономерности в исследуемой системе и в определенном временном диапазоне.



Р и с. 3. Факторы, влияющие на величину электропотребления  
F i g. 3. Factors affecting the amount of power consumption

В силу невозможности использования данных по влиянию технологических и других, специфических для железнодорожного транспорта, факторов, энергосистема вынуждена пользоваться для прогнозирования в основном временными рядами, а также рядом экзогенных факторов, такими, как  $S_n(t)$  – вектор-функция, характеризующая совокупность влияющих факторов, изменяющихся во времени;  $m(t)$  – вектор-функция, характеризующая массу состава;  $t(t)$  – вектор-функция, характеризующая величину межпоездного интервала;  $Q(t)$  – вектор-функция, характеризующая величину грузооборота;  $L_r(t)$  – вектор-функция, характеризующая линейный пробег;  $S(t)$  – вектор, характеризующий величину грузоперевозок.

Согласно представленного рисунка, к постоянным факторам относятся:  $TT$  – вектор-функция, характеризующая тип тягового электроснабжения;  $L$  – вектор-функция, характеризующая длину участка;  $F$  – вектор-функция, характеризующая расстояние между тяговыми подстанциями;  $T_n$  – вектор-функция, характеризующая совокупность влияющих факторов, неизменяющихся во времени;  $T$  – вектор, характеризующий состояние системы тягового электроснабжения участка.

## Применение нейросетевых методов для прогнозирования электропотребления на железнодорожном транспорте

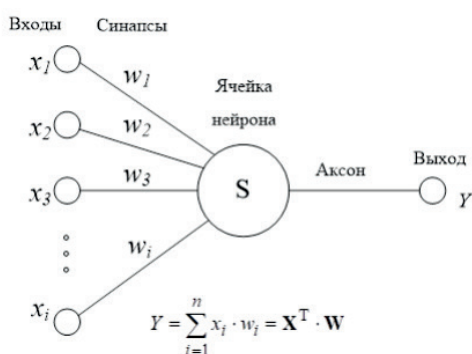
Основу нейросетевого прогнозирования составляют взаимосвязи между нейронами многослойной сети прямого распространения («персептрона») [18], [21].

<sup>5</sup> Рутковская Д., Пилинский М., Рутковский Л. Нейронные сети, генетические алгоритмы и нечеткие системы. 2-е изд. М.: Горячая линия-Телеком, 2013. 384 с.



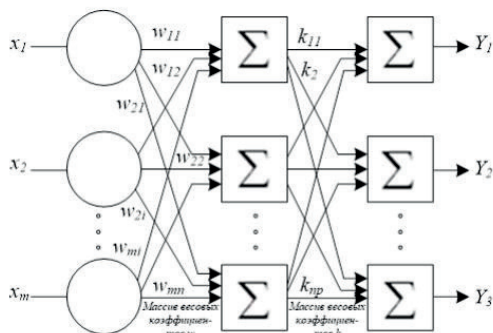


Каждый нейрон имеет ряд входов, для получения нескольких сигналов, характерных для основных параметров рассматриваемой системы, и один выходной сигнал, характеризующий соответствующее преобразование. Каждому входному сигналу соответствует свой синапс – коэффициент, характеризующий «вес» входа. Процесс получения преобразовательной функции осуществляется в два такта: 1) определение величины возбуждения нейрона; 2) преобразование полученного суммарного возбуждения в выходной  $Y_o = F(Y)$  сигнал через активационную функцию  $F(\cdot)$ . [1], [5], [13]. Принцип работы нейрона представлен на рисунке 4.



Р и с. 4. Принцип работы искусственного нейрона  
F i g. 4. Principle of artificial neuron operation

Возбуждение нейрона определяется, если выходной сигнал нейрона близок к единице, а функция выходного сигнала зависит от интенсивности и собственных характеристик. Принцип работы сетей прямого распространения представлен на рисунке 5.



Р и с. 5. Принцип работы «персептрона»  
F i g. 5. Principle of "perceptron" operation

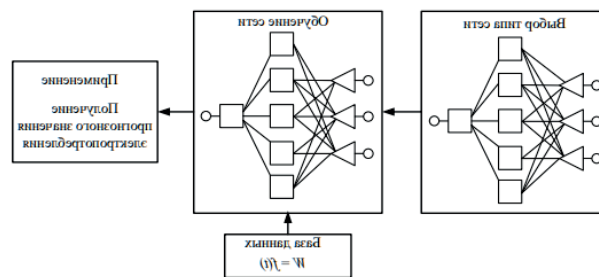
Такая сеть состоит из нескольких слоев нейронов: входного слоя, выходного слоя и нескольких «скрытых» слоев. Нейроны входного слоя предназначены для получения и распределения входного сигнала между нейронами первого скрытого слоя (без этапа преобразования сигнала). Связь между слоями осуществляется таким образом, что выходной сигнал с каждого

нейрона предыдущего слоя поступает на входы всех нейронов следующего слоя. Далее поступивший сигнал проходит по очереди через все слои, претерпевая преобразования в каждом из них, и выделяется с выходов нейронов выходного слоя. Степень связи между соседними слоями также характеризуется коэффициентом «весов», а характер преобразования сигнала зависит от активационной функции. Правильность выбранного значения весов связей между нейронами адекватно поставленной задачи влияет на точность результатов и функционирование сети.

Данный тип сетей хорошо зарекомендовал себя как эффективное средство для прогнозирования, классификации и анализа. Особенностью нейросетевого прогнозирования является возможность обучения построенной сети, процесс обучения которой состоит в настройке ее параметров. В процессе обучения происходит поэтапное изменение синаптических весов и типа активационной функции [1], [5], [6], что приводит к различным значениям выходного сигнала при неизменных входных параметрах системы<sup>6</sup>.

Процесс обучения состоит в настройке параметров сети. При этом, как правило, топология сети остается неизменной, а к настраиваемым параметрам обычно относятся параметры нейронов и величины синаптических весов. Под обучением принято понимать процесс изменения весов связей между нейронами [7-9].

Структурная схема обучения сети для целее прогнозирования электропотребления представлена на рисунке 6.



Р и с. 6. Структурная схема обучения сети, в процессе прогнозирования электропотребления  
F i g. 6. Block diagram of network training, in the process of predicting power consumption

Согласно представленному рисунку можно говорить о том, что для «обучения» нейронной сети используется следующий принцип: нейронной сети представляется набор входных параметров системы и соответствующее значение выходного параметра, полученного каким-либо способом ранее. Нейронная сеть должна сама построить алгоритм преобразования входного сигнала таким образом, чтобы полученный результат совпал с ранее выданным. Для улучшения ожидаемых результатов в процессе «обучения» необходимо смоделировать как можно больше готовых вариантов соответствия между входными и выходными параметрами. По окончании процесса «обучения» такой модели предполагается, что при предъявлении неизвестных ранее входных параметров системы, полученное значение выходного сигнала

<sup>6</sup> Круглов В. В., Борисов В. В. Гибридные нейронные сети. Смоленск: Русич, 2001. 222 с.



будет соответствовать реальному результату. Основным достоинством нейросетевого моделирования следует считать то, что с его помощью можно решать достаточно сложные задачи. Данные модели позволяют просто учитывать случайные воздействия и другие факторы, которые создают трудности при аналитическом исследовании. Способность НС формировать достаточно сложные функции дает возможность их применения в задачах имитационного моделирования. Одним из положительных качеств нейросетевых имитационных моделей по сравнению с традиционными следует считать незначительные затраты по их созданию. К недостатку применения данных видов моделей следует отнести ложную имитацию. Однако ложная имитация может быть устранена посредством дообучения нейросетевой модели. Основной проблемой при обучении нейронных сетей является наличие такого количественного и качественного состава образов из числа имеющихся, который, с одной стороны, позволил бы получить после обучения нейронной сети высокий процент верных классификаций, а с другой – сократил бы затраты машинного времени на построение системы, исключив из выборки малозначимые в смысле обучения образы. Практика использования нейронных сетей дала возможность выработать несколько вариантов к решению задачи подготовки обучающей выборки. Одним из приемлемых вариантов можно считать включение в обучающую выборку расширенного объема факторов. Для достижения наибольшего эффекта образы добавляются или извлекаются из обучающей выбор-

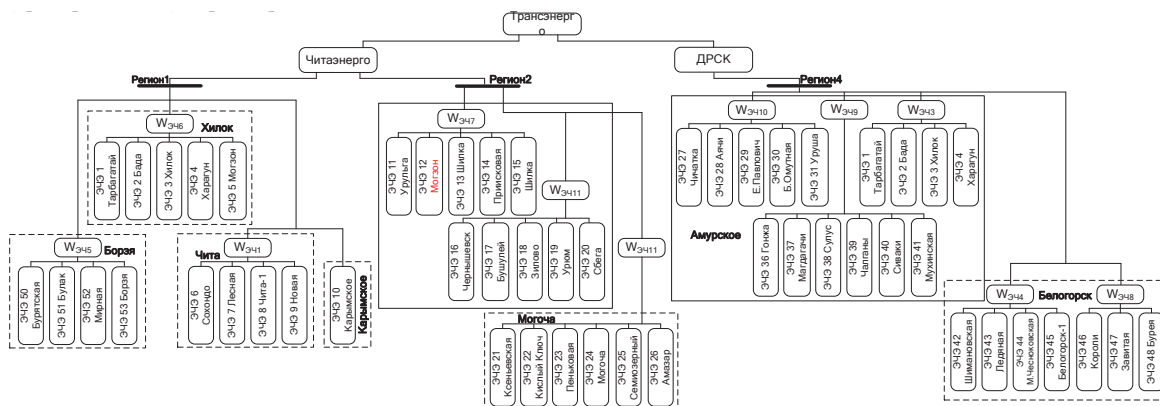
ки. Такой вариант формирования обучающей выборки позволяет в процессе обучения нейронной сети достаточно быстро достигать определения оптимальных значений весовых коэффициентов посредством выхода процесса обучения из локальных минимумов функции ошибки.

### Практическое применение нейросетевого прогнозирования электропотребления на примере Забайкальской железной дороги

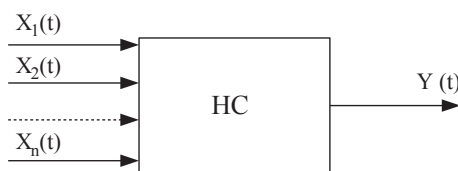
Оценим практическое применение нейросетевого моделирования на основе годового прогнозирования электроэнергии, путем декомпозиции задачи электропотребления по уровням, согласно рисунка 7:

- I уровень – тяговая подстанция (ЭЧЭ) → Трансэнерго;
- II уровень – дистанция электроснабжения (ЭЧ) → Трансэнерго;
- III уровень – региональное подразделение (РП) → Трансэнерго;
- IV уровень – энергообеспечивающая организация (ЭСО) → Трансэнерго.

Реализация факторного нейросетевого прогнозирования осуществляется посредством использования модели, представленной на рисунке 8. Здесь  $Y(t)$  и  $X_i(t)$  – соответственно выходной (прогнозируемый) и входные (критериальные) параметры.



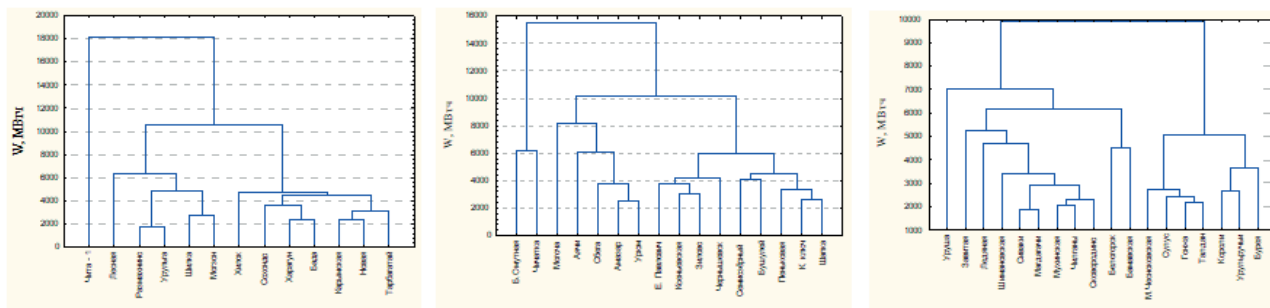
Р и с. 7. Представление исходной информации о потреблении активной электроэнергии по Забайкальской железной дороге  
Fig 7. Presentation of initial information on the consumption of active electricity on the Trans-Baikal Railway



Р и с. 8. Модель факторного нейросетевого прогноза  
Fig 8. Factorial neural network prediction model

Используемая модель перцептрона является простейшей и ориентирована на прогнозную оценку одного параметра. Эффективность в обучении достигается за счет изменения числа слоев, нейронов внутренних слоев и других операций. Данная модель практически реализована для решения задачи прогноза электропотребления активной энергии тяговыми подстанциями Забайкальской железной дороги в целом и по ее отделениям с использованием рангового анализа [16]. При этом возникает задача прогнозирования электропотребления  $W_1$  объектов с первым рангом. Проведенный кластерный анализ показал (рисунок 9), что потребители первого ранга для каждого территориального отделения являются следующие тяговые подстанции: ТП Чита; ТП Читатка; ТП Уруша.





Р и с. 9. Определение потребителей первого ранга для каждого территориального отделения в пределах Забайкальской железной дороги  
F i g. 9. Determination of the first rank consumers for each territorial office within the Trans-Baikal Railway

Для осуществления прогноза параметра  $W_1$  следует выделить факторы, на него влияющие. На основе проведенного анализа имеющихся статистических данных о имеющихся факторах, влияющих на электропотребление определим за критерии выборки прогнозируемых показателей определим факторы, изменяющиеся во времени. Для выявления взаимозависимости между прогнозируемой величиной и набором критериев в виде некоторой функции проведем корреляционный анализ по отделениям дороги, результаты которого представлены в таблице 1.

Т а б л и ц а 1. Значение коэффициентов корреляции  
T a b l e 1. The correlation coefficients

Расход энергии по РП	$W_1$	$W_2$	$W_3$
Грузооборот РП1	0,69	0,65	0,82
Грузооборот РП2	0,60	0,64	0,79
Грузооборот РП3	0,52	0,66	0,71
Средний вес брутто РП1	-0,02	0,45	0,15
Средний вес брутто РП2	-0,04	0,45	0,11
Средний вес брутто РП3	0,02	0,53	0,17

Анализ представленной таблице свидетельствует о том, что наиболее сильным влиянием обладают грузооборот  $x_1$  (тыс. тонн) и средний вес брутто  $x_2$  (тыс. тонн).

В качестве параметрической зависимости принимается регрессионная модель вида

$$W = P_n(x_1, x_2, A),$$

где  $P_n$  – полином степени  $n$ ,

$A$  – вектор параметров

Выполнив проверку значимости коэффициентов при степенях выше первой, можно сделать вывод об их незначительном влиянии на прогнозируемый параметр  $W$ . В итоге приемлемой регрессионной зависимостью можно считать линейную функцию вида  $W = a_0 + a_1x_1 + a_2x_2$ . По методу наименьших квадратов рассчитываются коэффициенты зависимости:

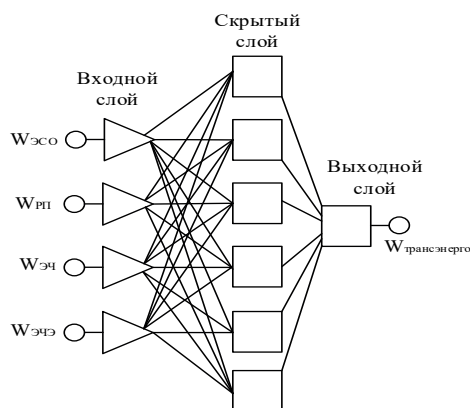
$$W_1 = 14514,49 + 3,15 x_1 - 4,96 x_2;$$

$$W_2 = -1202,34 + 1,79 x_1 + 0,79 x_2;$$

$$W_3 = 6400,04 + 1,62 x_1 - 1,71 x_2.$$

Проверка сформулированной модели на адекватность дает положительный результат.

Непараметрическую зависимость  $W = f(x_1, x_2)$  можно смоделировать на нейронной сети, в которой в качестве входных параметров принимаются факторы  $x_1$  и  $x_2$ , а выходного – электропотребление  $W$ . Структура НС представлена на рисунке 10.



Р и с. 10. Многослойный перцептрон при прогнозировании ИНС  
F i g. 10. Multilayer Perceptron in ANN Prediction

Для оценки возможности применения предлагаемой модели воспользуемся апостериорный способ оценки точности полученных результатов, основанный на сопоставлении фактических и прогнозных значений электро- и энергопотребления соответственно.

Определение величины отклонений полученных результатов проведем на основании формулы:

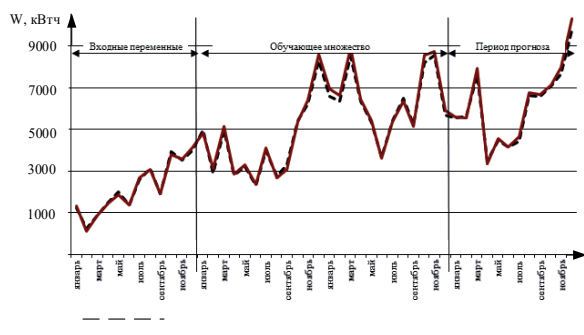
$$\delta = \frac{X - X_m}{X} \cdot 100 \%$$

где  $X$  – фактическое значение исследуемого параметра;  $X_m$  – прогнозное значения исследуемого параметра, полученное на основании нейросетевого моделирования.

Данная структура сети позволила добиться в процессе обучения точности, характеризующейся максимальной ошибкой  $\delta_{max} = 1,42 \%$ , что можно считать вполне приемлемым. Результаты сравнения представлены на рисунке 11.







Р и с. 11. Истинные значения электропотребления и построенные ИНС  
Fig. 11. True values of power consumption and constructed ANNs

Построение прогноза таким образом обеспечивает оптимальное сочетание в себе таких характеристик как быстрдействие и высокая аппроксимирующая способность.

## Заключение

Таким образом, формирование топливно-энергетического баланса на основе заявки на закупку электроэнергии, сформированной на основе результатов нейросетевого прогнозирования, позволяет получить результаты, обеспечивающие приемлемую точность для заключения договоров с энергосистемами. Преимущество разработанной модели заключается в том, что она не требует привлечения большого количества данных, как это требуется в многофакторных моделях. Применение данной методики на Забайкальской железной дороге позволит снизить значение эксплуатационных расходов на закупку потребляемой электроэнергии на 2,4%.

## Список использованных источников

- [1] Борисов В. В., Федулов А. С. Способы интеграции нечетких и нейронных сетей // Нейрокомпьютеры, разработка, применение. 2007. № 1. С. 5-11. URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=9433779> (дата обращения: 16.02.2022).
- [2] Железнов Д. В. Нейронные сети и прогнозирование размеров движения // Мир транспорта. 2012. Т. 10, № 4(42). С. 114-117. URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=18060058> (дата обращения: 16.02.2022).
- [3] Бурдинский С. А., Кистенев В. К., Торопов А. С. Прогнозирование электропотребления на основе устойчивого Н-распределения // Известия Томского политехнического университета. 2005. Т. 308, № 5. С. 159-161. URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=9117606> (дата обращения: 16.02.2022).
- [4] Комогорцев М. Г., Осипова В. Э. Разработка модели определения межпоездных интервалов с использованием аппарата искусственных нейронных сетей // Известия Транссиба. 2016. № 4(28). С. 87-94. URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=28906499> (дата обращения: 16.02.2022).
- [5] Дронова Ю. В., Коростелев С. В., Тупкина А. А. Прогнозирование электропотребления железнодорожного транспорта на примере Новосибирского участка Западно-сибирской железной дороги // Научные проблемы транспорта Сибири и Дальнего Востока. 2012. № 2. С. 293-297. URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=18806954> (дата обращения: 16.02.2022).
- [6] Закарюкин В. П., Крюков А. В. Моделирование режимов систем электроснабжения железных дорог // Современные технологии. Системный анализ. Моделирование. 2004. № 4. С. 68-73. URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=21388309> (дата обращения: 16.02.2022).
- [7] Раевский Н. В., Литвинцев В. Г. Построение модели прогнозирования тягового электропотребления на основе интервальной регрессии // Современные технологии. Системный анализ. Моделирование. 2010. № 4(28). С. 192-196. URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=16225141> (дата обращения: 16.02.2022).
- [8] Комогорцев М. Г., Осипова В. Э. Использование аппарата нейронных сетей и координатных определений местоположения поездов для автоматизированного оперативного расчета межпоездных интервалов // Транспортная инфраструктура Сибирского региона. 2016. Т. 1. С. 634-637. URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=26416334> (дата обращения: 16.02.2022).
- [9] Яковлев Д. А., Осипова В. Э. Применение математического аппарата нечеткой логики при определении объемов энергоресурсов для обеспечения объектов инфраструктуры железнодорожного транспорта // Проблемы проектирования, строительства, диагностики и технического содержания объектов железнодорожного транспорта: материалы Всероссийской НПК. Чита: Изд-во ЗаБИЖТ, 2013. С. 91-95. URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=25593243> (дата обращения: 16.02.2022).
- [10] Яковлев Д. А., Осипова В. Э. Применение нечеткой логики в управлении энергетическими ресурсами на примере Забайкальской железной дороги // Транспортная инфраструктура Сибирского региона. 2011. Т. 2. С. 8-12. URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=21201138> (дата обращения: 16.02.2022).
- [11] Shurova N., Li V. Increase of energy efficiency of electric power distribution networks by adjustment of reactive energy consumption in a traction network // MATEC Web of Conferences. 2018. Vol. 239. Article number: 01049. doi: <https://doi.org/10.1051/mateconf/201823901049>
- [12] Wang P., Lin X., Li Y. Optimization analysis on the energy saving control for trains with adaptive genetic algorithm // 2012 International Conference on Systems and Informatics (ICSAI2012). Yantai, China: IEEE Press, 2012. P. 439-443. doi: <https://doi.org/10.1109/ICSAI.2012.6223653>
- [13] Minimal-Energy Driving Strategy for High-Speed Electric Train With Hybrid System Model / L. Li [и др.] // IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems. 2013. Vol. 14, no. 4. P. 1642-1653. doi: <https://doi.org/10.1109/TITS.2013.2265395>



- [14] Москалев Ю. В., Ахмедзянов Г. Г. Определение места размещения и мощности компенсирующего устройства в системе тягового электроснабжения переменного тока двухпутного участка по минимуму потерь активной мощности // Известия Транссиба. 2016. № 2(26). С. 100-107. URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=26643828> (дата обращения: 16.02.2022).
- [15] Савина Н. В., Мясоедов Ю. В., Казакул А. А. Управление эксплуатационными издержками в распределительных сетевых компаниях посредством оптимальной компенсации реактивной мощности // Вестник Иркутского государственного технического университета. 2011. № 6(53). С. 130-137. URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=16519768> (дата обращения: 16.02.2022).
- [16] Osipova V. E., Yakovlev D. A. Generation of a rational training sample when predicting power consumption for train traction // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. 2020. Vol. 760. Article number: 012040. doi: <https://doi.org/10.1088/1757-899X/760/1/01204>
- [17] Lee T., Cho H., Kim S., Kim K. Measurement and analysis of consumption energy for Korean high-speed trains // 2012 IEEE PES Innovative Smart Grid Technologies (ISGT). Washington, DC, USA: IEEE Press, 2012. P. 1-5. doi: <https://doi.org/10.1109/ISGT.2012.6175629>
- [18] Furutani R., Kudo F., Moriwaki N. Utilization of AI in the Railway Sector: Case Study of Energy Efficiency in Railway Operations // Hitachi Review. 2016. Vol. 65, no. 6. P. 128-133. URL: [https://www.hitachi.com/rev/archive/2016/r2016\\_06/pdf/r2016\\_06\\_105.pdf](https://www.hitachi.com/rev/archive/2016/r2016_06/pdf/r2016_06_105.pdf) (дата обращения: 16.02.2022).
- [19] Xiufeng S., Jian Z. Electric power consumption forecast of life energy sources based on fuzzy neural network // 2011 IEEE International Symposium on IT in Medicine and Education. Cuangzhou: IEEE Press, 2011. P. 309-312. doi: <https://doi.org/10.1109/ITiME.2011.6130840>
- [20] Wang Q., Zhu J. Analysis and Simulation of Energy-Efficient Control of a Train // Proceedings of the 33rd Chinese Control Conference (July 28-30, 2014, Nanjing, China). IEEE Press, 2014. P. 3373-3380. URL: <https://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?arnumber=6895498> (дата обращения: 16.02.2022).
- [21] O'Hagan M. A fuzzy neuron based upon maximum entropy ordered weighted averaging // Uncertainty in Knowledge Bases. IPMU 1990. Lecture Notes in Computer Science; B. Bouchon-Meunier, R. R. Yager, L. A. Zadeh (eds.). Vol. 521. Springer, Berlin, Heidelberg, 1991. doi: <https://doi.org/10.1007/BFb0028148>
- [22] Kobayashi S., Plotkin S., Ribeiro S. K. Energy efficiency technologies for road vehicles // Energy Efficiency. 2009. Vol. 2, no. 1. P. 125-137. doi: <https://doi.org/10.1007/s12053-008-9037-3>
- [23] Miyatake M., Ko H. Optimization of train speed profile for minimum energy consumption // IEEE Transactions on Electrical and Electronic Engineering. 2010. Vol. 5, issue 3. P. 263-269. doi: <https://doi.org/10.1002/tee.20528>
- [24] Franke R., Terwiesch P., Meyer M. An algorithm for the optimal control of the driving of trains // Proceedings of the 39th IEEE Conference on Decision and Control (Cat. No.00CH37187). Vol. 3. Sydney, NSW, Australia: IEEE Press, 2000. P. 2123-2128. doi: <https://doi.org/10.1109/CDC.2000.914108>
- [25] Energy-efficient control of a train considering multi-trains power flow / Y. Rao [и др.] // IET Intelligent Transport Systems. 2021. Vol. 16, issue 3. P. 380-393. doi: <https://doi.org/10.1049/itr2.12149>

*Поступила 16.02.2022; одобрена после рецензирования 14.03.2022; принята к публикации 20.03.2022.*

#### Об авторах:

**Осипова Валерия Эдуардовна**, старший преподаватель кафедры «Электроснабжение», Забайкальский институт железнодорожного транспорта – филиал ФГБОУ ВО «Иркутский государственный университет путей сообщения» в г. Чите (672040, Российская Федерация, Забайкальский край, г. Чита, ул. Магистральная, д. 11), **ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-7080-8756>**, Valeri3307@mail.ru

**Яковлев Дмитрий Александрович**, доцент кафедры «Электроснабжение», Забайкальский институт железнодорожного транспорта – филиал ФГБОУ ВО «Иркутский государственный университет путей сообщения» в г. Чите (672040, Российская Федерация, Забайкальский край, г. Чита, ул. Магистральная, д. 11), кандидат технических наук, доцент, **ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-5926-392X>**, d5028280@mail.ru

*Все авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.*

## References

- [1] Borisov V.V., Fedulov A.S. *Sposoby integracii nechetkih i nejronnyh setej* [Methods of Combination of Fuzzy and Neural Nets]. *Nejrokompjutery, razrabotka, primenenie* = Neurocomputers. 2007; (1):5-11. Available at: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=9433779> (accessed 16.02.2022). (In Russ., abstract in Eng.)
- [2] Zheleznov D.V. *Nejronnye seti i prognozirovanie razmerov dvizhenija* [Neural networks: forecasting of traffic volumes]. *Mir Transporta* = World of Transport and Transportation. 2012; 10(4):114-117. Available at: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=18060058> (accessed 16.02.2022). (In Russ., abstract in Eng.)
- [3] Burdinsky S.A., Kistenev V.K., Toropov A.S. *Prognozirovanie jelektropotreblenija na osnove ustojchivogo H-raspredelenija* [Predicting electricity consumption based on stable H-distribution]



- tion of electricity consumption based on a stable H-distribution]. *Izvestija Tomskogo politehnicheskogo universiteta* = Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. 2005; 308(5):159-161. Available at: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=9117606> (accessed 16.02.2022). (In Russ., abstract in Eng.)
- [4] Komogorcev M.G., Osipova V.E. *Razrabotka modeli opredelenija mezhpoezdnyh intervalov s ispol'zovaniem apparata iskusstvennyh neyronnyh setej* [Development of Models of Intertrain Intervals with Use of the Device of Artificial Neural Networks]. *Izvestia Transsiba* = Journal of Transsib Railway Studies. 2016; (4):87-94. Available at: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=28906499> (accessed 16.02.2022). (In Russ., abstract in Eng.)
- [5] Dronova Yu.V., Korostelev S.V., Tupikina A.A. *Prognozirovanie jelektropotreblenija zheleznodorozhnogo transporta na primere Novosibirskogo uchastka Zapadno-sibirskoj zheleznoj dorogi* [Forecasting of the power consumption of railway transport on the example of the Novosibirsk site of West Siberian Railway]. *Nauchnye problemy transporta Sibiri i Dalnego Vostoka* = Scientific problems of transport Siberia and Far East. 2012; (2):293-297. Available at: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=18806954> (accessed 16.02.2022). (In Russ., abstract in Eng.)
- [6] Zakaryukin V.P., Kryukov A.V. The Modeling of Railway Electric Power Systems' State. *Sovremennye tehnologii. Sistemnyj analiz. Modelirovanie* = Modern Technologies. System Analysis. Modeling. 2004; (4):68-73. Available at: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=21388309> (accessed 16.02.2022). (In Eng.)
- [7] Raevski N.V., Litvintsev V.G. *Postroenie modeli prognozirovaniya tjagovogo jelektropotreblenija na osnove interval'noj regressii* [Traction power consumption forecasting model construction on the basis of interval regress]. *Sovremennye tehnologii. Sistemnyj analiz. Modelirovanie* = Modern Technologies. System Analysis. Modeling. 2010; (4):192-196 Available at: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=16225141> (accessed 16.02.2022). (In Russ., abstract in Eng.)
- [8] Komogorcev M.G., Osipova V.E. *Ispol'zovanie apparata neyronnyh setej i koordinatnyh opredelenij mestopolozhenija poezdov dlja avtoma-tizirovannogo operativnogo rascheta mezhpoezdnyh intervalov* [Using the Apparatus of Neural Networks and Coordinate Locations of Trains for Automated Operational Calculation of Intertrain Intervals]. *Transportnaja infrastruktura Sibirskogo regiona* = Proceedings of the International Scientific Conference on Transport Infrastructure of the Siberian region. 2016; 1:634-637. Available at: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=26416334> (accessed 16.02.2022). (In Russ.)
- [9] Yakovlev D.A., Osipova V.E. *Primenenie matematicheskogo apparata nechetkoj logiki pri opredelenii ob'emov jenergoresursov dlja obespechenija ob'ektov infrastruktury zheleznodorozhnogo transporta* [Application of the mathematical apparatus of fuzzy logic in determining the volume of energy resources to provide railway infrastructure facilities]. *Problemy proektirovanija, stroitel'stva, diagnostiki i tehničeskogo sodержanija ob'ektov zheleznodorozhnogo transporta* = Problems of Design, Construction, Diagnostics and Technical Maintenance of Railway Transport Facilities. Zabaikal Railway Transport Institute Publ., Chita; 2013. p. 91-95. Available at: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=25593243> (accessed 16.02.2022). (In Russ.)
- [10] Yakovlev D.A., Osipova V.E. *Primenenie nechetkoj logiki v upravlenii jenergetičeskimi resursami na primere Zabajkal'skoj zheleznoj dorogi* [The use of fuzzy logic in the management of energy resources on the example of the Trans-Baikal Railway]. *Transportnaja infrastruktura Sibirskogo regiona* = Proceedings of the International Scientific Conference on Transport Infrastructure of the Siberian region. 2011; 2:8-12. Available at: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=21201138> (accessed 16.02.2022). (In Russ.)
- [11] Shurova N., Li V. Increase of energy efficiency of electric power distribution networks by adjustment of reactive energy consumption in a traction network. *MATEC Web of Conferences*. 2018; 239:01049. (In Eng.) doi: <https://doi.org/10.1051/mateconf/201823901049>
- [12] Wang P., Lin X., Li Y. Optimization analysis on the energy saving control for trains with adaptive genetic algorithm. *2012 International Conference on Systems and Informatics (ICSAI2012)*. IEEE Press, Yantai, China; 2012. p. 439-443. (In Eng.) doi: <https://doi.org/10.1109/ICSAI.2012.6223653>
- [13] Li L., Dong W., Ji Y., Zhang Z., Tong L. Minimal-Energy Driving Strategy for High-Speed Electric Train With Hybrid System Model. *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*. 2013; 14(4):1642-1653. (In Eng.) doi: <https://doi.org/10.1109/TITS.2013.2265395>
- [14] Moskalev Yu.V., Ahmedzyanov G.G. The definition of the location and capacity of the compensating device in the ac electrical power system of railways by minimum of active power losses. *Izvestia Transsiba* = Journal of Transsib Railway Studies. 2016; (2):100-107. Available at: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=26643828> (accessed 16.02.2022). (In Russ., abstract in Eng.)
- [15] Savina N., Myasoedov Yu., Kazakul A. Management of operating costs in distribution grid companies through the optimal compensation of reactive power. *Vestnik Irkutskogo gosudarstvennogo tehničeskogo universiteta* = Proceedings of Irkutsk State Technical University. 2011; (6):130-137. Available at: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=16519768> (accessed 16.02.2022). (In Russ., abstract in Eng.)
- [16] Osipova V.E., Yakovlev D.A. Generation of a rational training sample when predicting power consumption for train traction. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. 2020; 760:012040. (In Eng.) doi: <https://doi.org/10.1088/1757-899X/760/1/012040>
- [17] Lee T., Cho H., Kim S., Kim K. Measurement and analysis of consumption energy for Korean high-speed trains. *2012 IEEE PES Innovative Smart Grid Technologies (ISGT)*. IEEE Press, Washington, DC, USA; 2012. p. 1-5. (In Eng.) doi: <https://doi.org/10.1109/ISGT.2012.6175629>
- [18] Furutani R., Kudo F., Moriwaki N. Utilization of AI in the Railway Sector. Case Study of Energy Efficiency in Railway Operations. *Hitachi Review*. 2016; 65(6):128-133. Available at: [https://www.hitachi.com/rev/archive/2016/r2016\\_06/pdf/r2016\\_06\\_105.pdf](https://www.hitachi.com/rev/archive/2016/r2016_06/pdf/r2016_06_105.pdf) (accessed 16.02.2022). (In Eng.)



- [19] Xiufeng S., Jian Z. Electric power consumption forecast of life energy sources based on fuzzy neural network. *2011 IEEE International Symposium on IT in Medicine and Education*. IEEE Press, Cuangzhou; 2011. p. 309-312. (In Eng.) doi: <https://doi.org/10.1109/ITiME.2011.6130840>
- [20] Wang Q., Zhu J. Analysis and Simulation of Energy-Efficient Control of a Train. *Proceedings of the 33rd Chinese Control Conference* (July 28-30, 2014, Nanjing, China). IEEE Press; 2014. p. 3373-3380. Available at: <https://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?arnumber=6895498> (accessed 16.02.2022). (In Eng.)
- [21] O'Hagan M. A fuzzy neuron based upon maximum entropy ordered weighted averaging. In: Bouchon-Meunier B., Yager R.R., Zadeh L.A. (eds.) *Uncertainty in Knowledge Bases. IPMU 1990. Lecture Notes in Computer Science*. Vol. 521. Springer, Berlin, Heidelberg; 1991. (In Eng.) doi: <https://doi.org/10.1007/BFb0028148>
- [22] Kobayashi S., Plotkin S., Ribeiro S.K. Energy efficiency technologies for road vehicles. *Energy Efficiency*. 2009; 2(1):125-137. (In Eng.) doi: <https://doi.org/10.1007/s12053-008-9037-3>
- [23] Miyatake M., Ko H. Optimization of train speed profile for minimum energy consumption. *IEEJ Transactions on Electrical and Electronic Engineering*. 2010; 5(3):263-269. (In Eng.) doi: <https://doi.org/10.1002/tee.20528>
- [24] Franke R., Terwiesch P., Meyer M. An algorithm for the optimal control of the driving of trains. *Proceedings of the 39th IEEE Conference on Decision and Control (Cat. No.00CH37187)*. Vol. 3. IEEE Press, Sydney, NSW, Australia; 2000. p. 2123-2128. (In Eng.) doi: <https://doi.org/10.1109/CDC.2000.914108>
- [25] Rao Y., Feng X., Wang Q., Sun P., Xiao Z., Chen H. Energy-efficient control of a train considering multi-trains power flow. *IET Intelligent Transport Systems*. 2021; 16(3):380-393. (In Eng.) doi: <https://doi.org/10.1049/itr2.12149>

*Submitted 16.02.2022; approved after reviewing 14.03.2022; accepted for publication 20.03.2022.*

#### About the authors:

**Valeriya E. Osipova**, Senior Lecturer of the Power Supply Department, Zabaikal Railway Transport Institute, a branch of Irkutsk State Transport University (11 Magistralnaya St., Chita 672040, Russian Federation), **ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-7080-8756>**, Valeri3307@mail.ru

**Dmitry A. Yakovlev**, Associate Professor of the Chair of Power supply, Zabaikal Railway Transport Institute, a branch of Irkutsk State Transport University, (11 Magistralnaya St., Chita 672040, Russian Federation), Cand.Sci. (Tech.), Associate Professor, **ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-5926-392X>**, d5028280@mail.ru

*All authors have read and approved the final manuscript.*

