



19. Burkov A.T. Elektronika i preobrazovatel'naya tekhnika [Electronics and converter equipment]: Vol.2. Moscow: UMTs ZhDT Publ., 2015. 307 p. [Elektronik media]: <http://e.lanbook.com/book/59179>

Информация об авторах

Рябченко Наталья Леонидовна – к. т. н., доцент, заведующая кафедрой «Математика», Иркутский государственный университет путей сообщения, e-mail: ryabchenok_nl@irgups.ru

Алексеева Татьяна Леонидовна – к. т. н., доцент кафедры «Математика», Иркутский государственный университет путей сообщения, e-mail: alekseeva_tl@irgups.ru

Астраханцев Леонид Алексеевич – д. т. н., профессор кафедры «Электроподвижной состав», Иркутский государственный университет путей сообщения, e-mail: astrahancev1943@mail.ru

Мартусов Алексей Леонидович – аспирант кафедры «Электроподвижной состав», Иркутский государственный университет путей сообщения, e-mail: aleksey.martusov@yandex.ru

Authors

Natal'ya Leonidovna Ryabchenok – Ph.D. in Engineering Science, Assoc. Prof., Head of the Subdepartment of Mathematics, Irkutsk State Transport University, e-mail: ryabchenok_nl@irgups.ru

Tat'yana Leonidovna Alekseeva – Ph.D. in Engineering Science, Assoc. Prof. of the Subdepartment of Mathematics, Irkutsk State Transport University, e-mail: alekseeva_tl@irgups.ru

Leonid Alekseevich Astrakhantsev – Doctor of Engineering Science, Professor of the Subdepartment of Electric Stock, Irkutsk State Transport University, e-mail: astrahancev1943@mail.ru

Aleksei Leonidovich Martusov – Ph.D. student of the Subdepartment of Electric Stock, Irkutsk State Transport University, e-mail: aleksey.martusov@yandex.ru

Для цитирования

Рябченко Н. Л. Энергетическая эффективность электрической тяги поездов / Н. Л. Рябченко, Т. Л. Алексеева, Л. А. Астраханцев, А. Л. Мартусов // Современные технологии. Системный анализ. Моделирование. – 2019. – Т. 61, № 1. – С. 144–156. – DOI: 10.26731/1813-9108.2019.1(61).144–156

For citation

Ryabchenok N. L., Alekseeva T. L., Astrakhantsev L. A., Martusov A. L. Energeticheskaya effektivnost' elektricheskoy tyagi poyezdov [Energy efficiency in railway electric traction]. *Sovremennyye tekhnologii. Sistemyy analiz. Modelirovaniye* [Modern Technologies. System Analysis. Modeling], 2019, Vol. 61, No. 1, pp. 144–156. DOI: 10.26731/1813-9108.2019.1(61).144–156

УДК 519.6:311

DOI: 10.26731/1813-9108.2019.1(61).156–166

В. Л. Незевак

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

Дата поступления: 06 октября 2018 г.

МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ ЭЛЕКТРОПОТРЕБЛЕНИЯ НА ТЯГУ ПРИ ИЗМЕНЕНИИ ПАРАМЕТРОВ ГРАФИКА ДВИЖЕНИЯ ПЕЗДОВ НА ЭЛЕКТРИФИЦИРОВАННЫХ УЧАСТКАХ С III-М И IV-М ТИПОМ ПРОФИЛЯ ПУТИ

Аннотация. В статье рассмотрены вопросы моделирования процессов электропотребления на тягу на участках с горным профилем пути. Имитационное моделирование проведено для серии вариантов с различными параметрами графика движения грузовых поездов и сохранением неизменными нормообразующих факторов. Полученные в ходе имитационного моделирования результаты изменения объема электропотребления электроподвижным составом и уровня небаланса энергии для существующих участков постоянного и переменного тока позволили перейти к описанию результатов на основе регрессионного анализа и аппарата нейронных сетей. Выполнено сравнение результатов различных моделей для оценки изменения объемов электропотребления и небаланса электроэнергии и выбраны модели с наилучшими результатами приближения, что позволяет их использовать для оценки графиков движения поездов по критерию энергетической эффективности.

Ключевые слова: тяговые расчеты, имитационное моделирование, система тягового электроснабжения, электроподвижной состав, объем электроэнергии на тягу, график движения поездов, небаланс энергии, коэффициент интенсивности, межпоездные интервалы, пакеты поездов, остановки, энергосберегающие нитки, варианты расчетов, аналитическое представление, регрессионная модель, нейронная сеть, многослойный перцептрон.

V. L. Nezevak

Omsk State Transport University, Omsk, Russian Federation

Received: October 06, 2018

MODELING POWER CONSUMPTION FOR TRACTION WHEN CHANGING THE SETTINGS OF THE SCHEDULE OF TRAINS AT ELECTRIFIED SECTIONS WITH THE TRACK PROFILE TYPES III AND IV

Abstract. The article discusses the modeling of power consumption processes for traction at sections with a mountain track profile. Simulation modeling was carried out for a series of variants with different parameters for the schedule of the movement of freight



trains, with standard-setting factors being preserved unchanged. The results obtained in the course of simulation modeling on the change in the volume of electric power consumption by the electric rolling stock and the level of energy imbalance for the existing sections of DC and AC allowed us to proceed to a description of the results based on regression analysis and the means of neural networks. After the results of different models were compared to estimate changes in the volumes of electricity consumption and electricity unbalance, the models with the best approximation results were selected, which allows them to be used to evaluate train traffic schedules by the energy efficiency criterion.

Keywords: traction calculations, simulation modeling, traction power supply system, electric rolling stock, volume of electric power for traction, train schedule, energy imbalance, intensity factor, inter-train intervals, train packages, stops, energy-saving lines, calculation options, basic dependencies, analytical representation, regression model, neural network, multilayer perceptron.

Введение

Построение прогнозных графиков движения поездов на электрифицированных участках железных дорог позволяет подойти к решению задачи повышения энергетической эффективности перевозочного процесса. Указанная задача является одной из приоритетных задач, стоящих перед холдингом РЖД. Целевые ориентиры по достижению уровня энергетической эффективности приняты при стратегическом планировании развития холдинга. При текущем значении удельного расхода электрической энергии в грузовом движении в 2015 г. на уровне 160,7 кВт·ч/10 тыс. т·км нетто целевой ориентир на 2030 г. установлен на уровне 151,9 кВт·ч/10 тыс. т·км нетто. Повышение энергетической эффективности предусматривает выполнение целого комплекса мероприятий как в тяговом электроснабжении, так и при организации перевозок на электрифицированных участках. Решение задачи повышения энергетической эффективности перевозочного процесса в аспекте построения энергосберегающих графиков движения, ориентировано на снижение электропотребления при ведении поезда и сокращение количества остановок грузовых поездов. В тоже время, большой потенциал повышения энергетической эффективности перевозок находится в области решения задач по учету интенсивности движения поездов, определяющей уровень потерь электроэнергии в системе тягового электроснабжения и распределении энергии рекуперации

В связи с вышеизложенным решение указанной задачи представляется актуальным и имеющим большую практическую значимость.

Влияние графика движения поездов (ГДП) на электропотребление тяги по тяговым подстанциям определяется двумя основными факторами – формированием графика электрической нагрузки тяговых подстанций и условиями применения рекуперативного торможения электроподвижного состава (ЭПС). В первом случае изменяется уровень технических потерь электрической энергии в системе тягового электроснабжения (СТЭ), во втором – изменяется эффективность применения рекуперативного торможения. Поскольку уровень энергетической эффективности и удельный расход

электроэнергии на тягу определяется по данным средств измерений тяговых подстанций, действие указанных факторов на суммарное электропотребление необходимо рассматривать совместно.

В общем случае параметры ГДП включают в себя так называемые нормообразующие факторы – масса поезда, серия локомотива, техническая скорость и др., оказывающие влияние на удельный расход электроэнергии локомотива и энергетические характеристики работы СТЭ. Влияние параметров ГДП на объем электропотребления тяги следует рассматривать только ту часть параметров, которая связана с расписанием движения поездов, поскольку влияние указанных выше нормообразующих факторов основано на тягово-энергетическом балансе и определяет энергетические характеристики движения усредненного поезда, но не учитывает формирование графика электрической нагрузки тяговых подстанций и взаимное расположения ЭПС на межподстанционных зонах СТЭ участка железной дороги. Это вытекает из рассмотрения уравнения тягово-энергетического баланса движения поезда, позволяющего определить удельный расход электроэнергии на тягу поезда, кВт·ч/10⁴ т·км брутто:

$$\omega = \frac{10000}{Q \cdot \eta} \cdot \left(\frac{K_x \cdot K_{bx} \cdot \frac{N_{KH}}{V_{tex}} + K_{t.c} - K_x \cdot K_{bx}}{367,2} \right) \cdot (P + Q) \cdot (\omega_0 + i), \quad (1)$$

где P – сцепная масса локомотива, т; Q – масса состава, т; η – номинальный коэффициент полезного действия локомотива; K_x – коэффициент использования мощности вспомогательного оборудования на холостом ходу; K_{bx} – коэффициент, характеризующий относительный расход электроэнергии на холостом ходу; N_{KH} – номинальная касательная мощность локомотива, кВт; V_{tex} – техническая скорость, км/ч; ω_0 – основное удельное сопротивление движению поезда, кгс/т; i – величина уклона пути, ‰.

Выражение (1) не используется при проведении имитационного моделирования взаимодей-



ствия ЭПС и СТЭ. Исходя из этого, следует принять неизменными факторы, содержащиеся в выражении для определения удельного расхода, и оперировать только различными вариантами расписания движения поездов для определения энергетических показателей работы СТЭ.

Объем электроэнергии зависит не только от параметров графика движения поездов, но и от типа профиля пути участка. Основные зависимости изменения объема электроэнергии на тягу целесообразно получать по участкам оборота локомотивных бригад с учетом типов профилей пути участков, оказывающих влияние на объем электропотребления, поскольку эксплуатационная отчетность железнодорожного транспорта детализирована для указанных поездов.

В общем виде объем электроэнергии на тягу, потребленный по тяговым подстанциям в отчетном периоде на рассматриваемом участке определяется по выражению, тыс. кВт·ч:

$$W_{ЭЧЭ} = \sum_i W_{i \text{ ЭПС}} + \sum_j W_{ЭЧЭ \text{ отб}} + \frac{\delta_{\text{участок}}}{100} \cdot W_{\text{участок}}, \quad (2)$$

где $W_{i \text{ ЭПС}}$ – объем электроэнергии, потребленный электроподвижным составом, тыс. кВт·ч; $W_{ЭЧЭ \text{ отб}}$ – объем электроэнергии без учета небаланса на нетяговые нужды (отбор) от присоединений контактной сети, тыс. кВт·ч; $\delta_{\text{участок}}$ – относительная величина небаланса, %; $W_{\text{участок}}$ – объем электроэнергии по вводам преобразовательных трансформаторов тяговых подстанций, тыс. кВт·ч.

Имитационное моделирование показывает, что для равнинных профилей межпоездные интервалы, размеры пакетов, наличие остановок и энергосберегающих ниток в графике движения оказывают влияние на объем электроэнергии на тягу вследствие изменения потерь электроэнергии в тяговой сети и оборудовании тяговых подстанций.

Отличие участков с холмистым (горным) типом профиля пути III и IV типа от участков I и II типа заключается не только в различном уровне энергозатрат на движение поезда, но и в различных уровнях небаланса электроэнергии в системе тягового электроснабжения и объемах электроэнергии рекуперации, оказывающими влияние на суммарный объем электроэнергии на тягу по данным учета тяговых подстанций.

С целью получения основных зависимостей изменения объемов электроэнергии на участках с III-м и IV-м типом профиля пути рассмотрим участки железных дорог с различными системами

тягового электроснабжения – постоянного и переменного тока напряжением 3,3 кВ и 25 кВ соответственно. Для каждого варианта, отличающегося от остальных типом профиля пути и родом тока, выбрано три существующих участка железных дорог, средняя протяженность участков составляет около 200 км. Все участки являются двухпутными. Схема питания и секционирования контактной сети принята нормальной, режим питания межподстанционных зон – параллельным.

Формирование зависимостей изменения объема электроэнергии и небаланса от исследуемых параметров ГДП выполнено на основе тяговых расчетов для поездов массой 4500 т. На участках постоянного тока расчеты выполнены для локомотивов серии 2ЭС6, на участках переменного тока – для локомотивов серии ВЛ80^Р. Тяговые расчеты выполнены для трех вариантов. Первый вариант тягового расчета выполнен для условий следования грузового поезда по участку без остановок, второй – с одной остановкой, третий – без остановок с оптимизацией выбега, так называемых энергосберегающих ниток графика движения. Для каждого варианта тяговые расчеты выполнены для трех участков сети дорог (для каждого типа профиля пути участков постоянного и переменного тока). Результаты расчета удельного расхода электроэнергии для трех вариантов приведены на рис. 1. Представленные значения удельного расхода электроэнергии, полученные для трех рассмотренных участков каждого типа профиля и усредненные для четного и нечетного направлений, отражают тенденцию роста удельного расхода электроэнергии с увеличением типа профиля пути.

Ранее, в работах, было показано, что расписание движения поездов можно описать с помощью ряда параметров, оказывающих влияние на объем электропотребления на тягу, среди которых наиболее значимыми являются: относительное значение времени следования поездов в пакетах (пачках) – α , среднее количество поездов в пакете – $n_{ср}$, удельный вес остановок – β и удельный вес твердых ниток в графике – γ , коэффициент интенсивности для пакетной и внепакетной части графика движения – $k_{и}$. Разработка аналитического выражения, описывающего изменение объема электропотребления на тягу при взаимодействии СТЭ и ЭПС, представляется затруднительным ввиду влияния большого числа факторов, особенностей выполнения расчета и учета местных условий. Получение эмпирических зависимостей изменения объема электропотребления на тягу от параметров ГДП предполагает необходимость

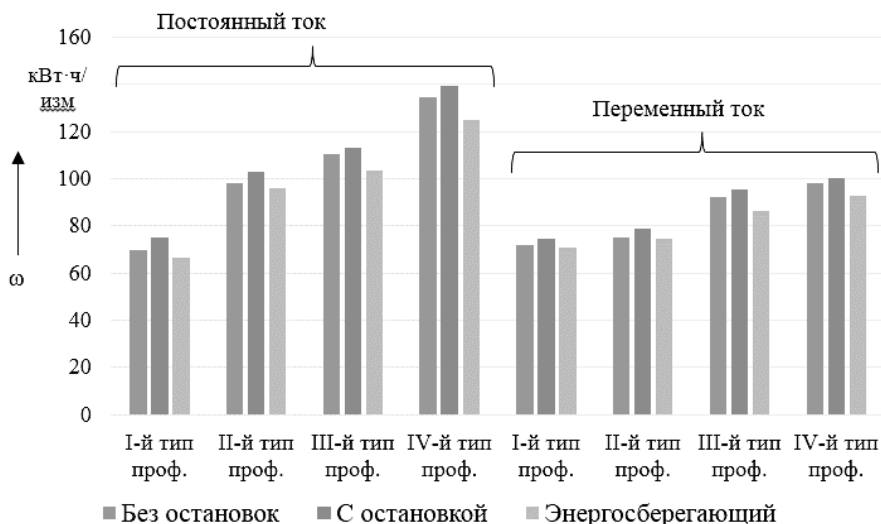


Рис. 1. Удельный расход электроэнергии в грузовом движении для участков с различным типом профиля

проведения факторного анализа большого массива данных, в том числе параметров ГДП, учет которых в настоящее время не осуществляется. В связи с выше изложенным представляется целесообразным использование имитационного моделирования, позволяющего оценить влияние изучаемых факторов на объем электропотребления на тягу для получения зависимостей и использования их в дальнейшем при оценке энергетической эффективности перевозочного процесса на участках железных дорог.

Имитационное моделирование выполняется для серии различных вариантов реализации графика движения для различных участков. С целью сравнения полученных результатов для различных участков одного типа профиля и одного рода тока выполнено приведение объема электропотребления с учетом рекуперации с помощью базисных значений, за которые принят минимальный объем электропотребления на соответствующем участке.

Сравнение выполняется для объема электропотребления ЭПС по выражению:

$$W_{\text{прив } i \text{ ЭПС}} = \frac{W_{i \text{ ЭПС}}}{W_{i \text{ ЭПС мин}}} \cdot 100, \quad (1)$$

где $W_{i \text{ ЭПС}}$ – суммарный объем электроэнергии, потребленный электроподвижным составом для i -го варианта, тыс. кВт·ч; $W_{i \text{ ЭПС мин}}$ – минимальный объем электроэнергии, потребленный электроподвижным составом для i -го варианта, тыс. кВт·ч.

Сравнение небаланса электроэнергии выполняется по выражению:

$$\delta_{i \text{ участок}} = \frac{\Delta W_i}{W_{i \text{ участок}}} \cdot 100, \quad (2)$$

где ΔW_i – потери электроэнергии в системе тягового электроснабжения для i -го варианта, тыс. кВт·ч; $W_{i \text{ участок}}$ – объем электроэнергии на тягу по тяговому подстанциям участка для i -го варианта, тыс. кВт·ч.

Сравнение приведенных объемов электропотребления для трех рассмотренных участков показывает идентичный характер изменения. Так, при увеличении относительного времени следования поездов в пакетах (выражение для определения α) при заданных условиях моделирования, наблюдается рост объема электропотребления (рис. 2) и имеет вид:

$$\alpha = \frac{\sum_{i=1} \tau_{i \text{ пак}}}{1440 \cdot K_{\text{эл}}}, \quad (3)$$

где $\tau_{i \text{ пак}}$ – i -й межпоездной интервал в пакетах (пачках), определяемый в обоих направлениях движения, мин; $K_{\text{эл}}$ – количество главных путей на расчетном полигоне, шт.

Аппроксимирующие функции, описывающие изменение объема электропотребления при изменении α , иллюстрируют изменение электропотребления с высоким коэффициентом детерминации R^2 для всех трех участков при использовании полиномов второго порядка. Рост объема электропотребления на тягу при увеличении значения α связан с ухудшением условий рекуперации на участке, вследствие увеличения расстояния между поездами в пакетах.

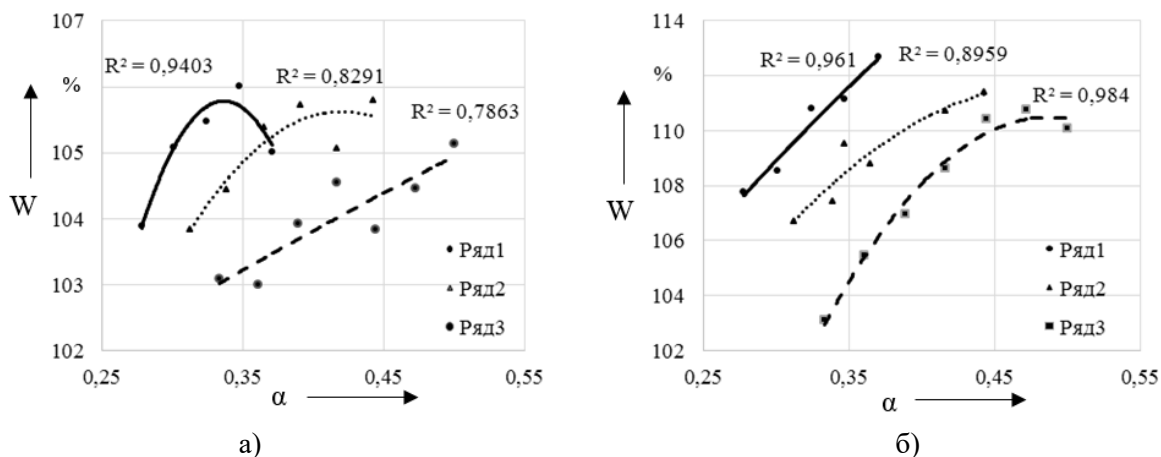


Рис. 2. График изменения объема электроэнергии на тягу для участков постоянного тока а) III-й тип профиля; б) IV-й тип профиля

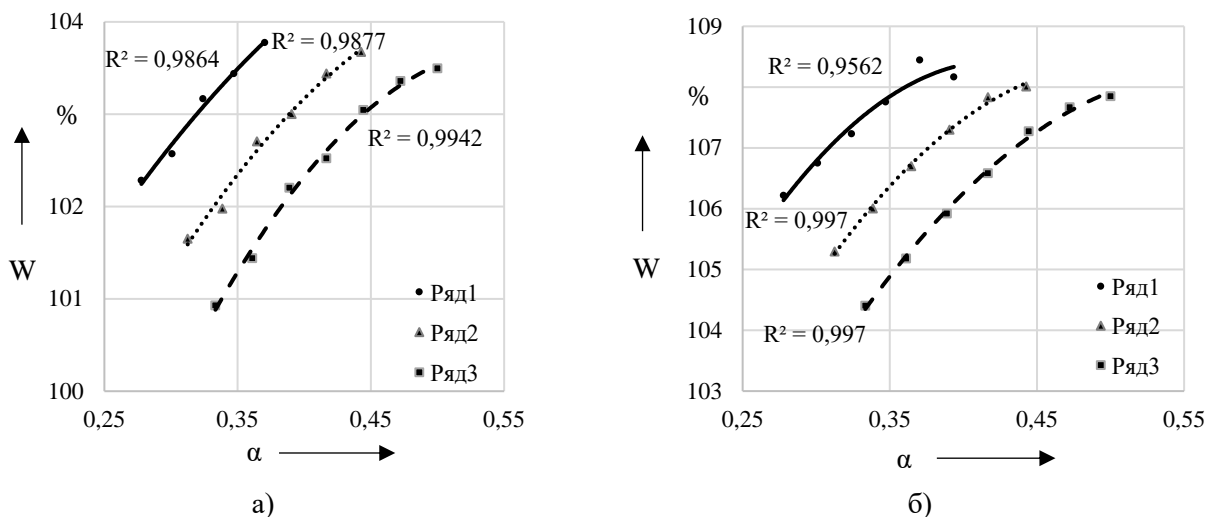


Рис. 3. График изменения объема электроэнергии на тягу для участков переменного тока – а) III-й тип профиля; б) IV-й тип профиля

Различное изменение уровня объема электроэнергии в данном случае объясняется уникальностью профиля пути каждого участка сети железных дорог. Наблюдаемый диапазон изменения объема электроэнергии для рассмотренных участков постоянного тока с III-м типом профиля пути уже диапазона для участков с IV-м типом профиля, т.к. для участков с III-м типом профиля диапазон изменения составляет – 103–106 %, то для участков с IV-м типом профиля – 103–113 %. В этом случае при изменении α в заданном диапазоне для каждого рассмотренного i -го участка с IV-м типом профиля пути значение вариации выше, чем для участков с III-м типом профиля пути:

$$\forall_{\alpha} W_{iIV}(\alpha) > \forall_{\alpha} W_{iIII}(\alpha), \quad (6)$$

где $W(\alpha)$ – зависимость объема электроэнергии от относительного значения времени следования поездов в пакетах α .

Аналогичное изменение объема электроэнергии наблюдается и на участках переменного тока. Так, при рассмотрении изменения α вариация объема электроэнергии на участках с IV-м типом профиля пути выше, чем на участках с III-м типом профиля (рис. 3).

Рассмотрение зависимости изменения уровня небаланса электроэнергии на участках постоянного и переменного тока от параметров ГДП позволяет получить аналогичные полученным для объема электропотребления на тягу зависимости. В частности, при увеличении α наблюдается падение небаланса электроэнергии на участках с III-м и IV-м типом профиля пути как переменного, так и постоянного тока (рис. 4, 5). Вариация небаланса на участках постоянного и переменного тока на участках с IV-м типом профиля пути отмечается выше, чем на участках с III-м типом профиля. Характер изменения небаланса позволяет подобрать

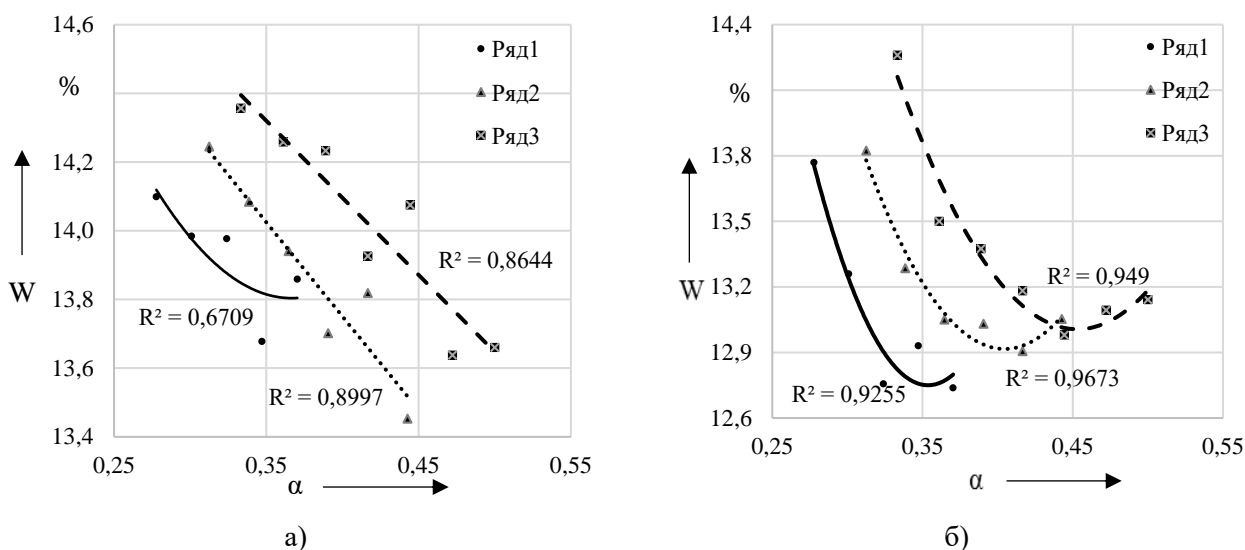


Рис. 4. График изменения небаланса для участков постоянного тока
 а) III-й тип профиля; б) IV-й тип профиля

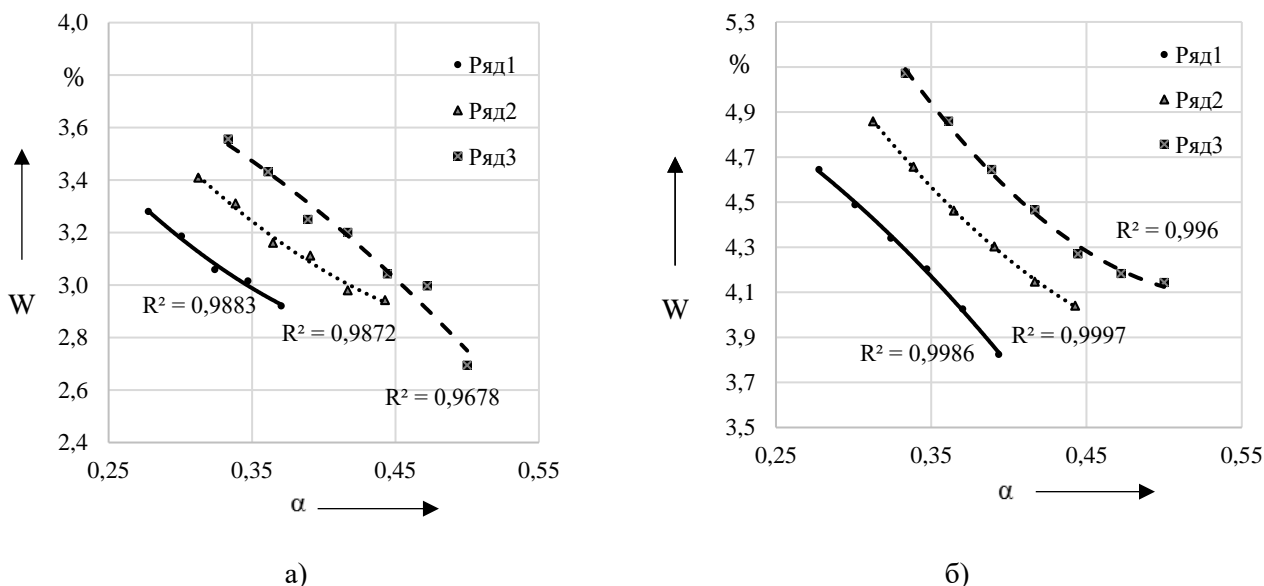


Рис. 5. График изменения небаланса для участков переменного тока
 а) III-й тип профиля; б) IV-й тип профиля

аппроксимирующие функции с высоким значением коэффициента детерминации R^2 , превышающим 0,9 за исключением зависимости изменения небаланса для участков постоянного тока с III-м типом профиля.

Полученные зависимости изменения объема электропотребления на тягу и небаланса для участков постоянного и переменного тока позволяют перейти к формированию соответствующих выражений исходя из усредненных значений для трех рассмотренных участков [13, 14]. Рассмотрим следующую регрессионную модель для описания изменения объема электропотребления и потерь электроэнергии в системе тягового электроснаб-

жения в зависимости от изменения вышерассмотренных параметров графика движения за сутки:

$$\begin{aligned}
 F(x) = & a_{11} \cdot k_u + a_{12} \cdot k_{u \text{ макс}} + \\
 & + a_{13} \cdot \frac{1}{1 + e^{-(\alpha - 0.5)}} + a_{14} \cdot n_{cp} + \\
 & + a_{15} \cdot \beta + a_{16} \cdot \gamma + \\
 & + a_{21} \cdot k_u^2 + a_{22} \cdot k_{u \text{ макс}}^2 + \\
 & + a_{23} \cdot \frac{1}{1 + e^{-2 \cdot (-\alpha + 0.5)}} + \\
 & + a_{24} \cdot n_{cp}^2 + a_{25} \cdot \beta^2 + a_{26} \cdot \gamma^2 + b, \quad (4)
 \end{aligned}$$



где k_u – коэффициент интенсивности для пакетной зоны графика движения:

$$k_u = \frac{8}{\tau_{ср. пак}}$$

$\tau_{ср. пак}$ – средний межпоездной интервал в пакете (пачке);

$k_{u, мпак}$ – коэффициент интенсивности для межпакетной зоны графика движения:

$$k_{u, мпак} = \frac{20}{\tau_{ср. меж. пак}}$$

$\tau_{ср. меж. пак}$ – средний интервал между пакетами (пачками).

Для данных имитационного моделирования получим значения коэффициентов регрессионной модели для участков постоянного и переменного тока с III-м и IV-м типом профиля пути (табл. 1).

Альтернативным описанием полученных в ходе имитационного моделирования зависимостей изменения объема электропотребления и небаланса при изменении параметров графика движения является описание с помощью нейронных сетей, в частности многослойных персептронов. Нейронная сеть по аналогии с регрессионной моделью имеет двенадцать входных нейронов, соответствующих переменным – параметрам графика движения, и один выходной нейрон, соответствующий объему электропотребления на тягу или уровню небаланса электроэнергии на участке. Обучение нейронной сети выполняется по алго-

ритму обратного распространения. Для полученных в ходе имитационного моделирования выборок сформирован ряд MLP-моделей (табл. 2).

С целью сравнения точности полученных моделей на основе регрессионного анализа и нейронных сетей оценим полученные модели по коэффициенту детерминации и показателю процентной погрешности.

Коэффициент детерминации определяется по выражению:

$$R^2 = \frac{\sum_{i=1}^n (\hat{y}_i - \bar{y})^2}{\sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2}, \tag{1}$$

где \hat{y}_i, \bar{y}, y_i – расчетное, среднее наблюдаемое и фактическое i -е значения исследуемой функции.

Показатель процентной погрешности определяется по выражению:

$$MAPE = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \left| \frac{y_{фi} - y_{модi}}{y_{фi}} \right| \cdot 100 \%, \tag{2}$$

где $y_{ф(мод)i}$ – значение функции фактическое (полученный по модели);

n – объем выборки.

Как показывает сравнение результатов расчетов коэффициентов детерминации и показателя для различных моделей, нейронные модели с многослойными персептронами показывают лучшие результаты по сравнению с регрессионной моделью. Среди MLP-моделей наилучшие результаты показывают модели с количеством скрытых слоев

Т а б л и ц а 1

Коэффициенты регрессионной модели

Коэффициенты модели	Объем электроэнергии				Небаланс			
	Постоянный ток		Переменный ток		Постоянный ток		Переменный ток	
	III-й тип	IV-й тип	III-й тип	IV-й тип	III-й тип	IV-й тип	III-й тип	IV-й тип
1	2	3	4	5	6	7	8	9
b	180,542	191,927	132,606	119,950	-9,088	13,050	-3,570	-6,538
a11	-129,989	-107,850	-48,082	-23,313	41,847	-2,360	10,447	19,922
a12	28,099	38,289	12,937	71,175	-2,626	-7,871	-3,152	-6,651
a13	-85,005	-83,975	-23,807	-38,046	22,978	-0,184	7,712	10,702
a14	0,903	1,803	0,585	0,033	-0,078	0,002	-0,056	-0,025
a15	11,713	15,993	9,140	-3,926	-4,858	-1,103	-2,827	-5,872
a16	8,856	19,617	5,522	-7,817	-7,316	-3,215	-4,075	-6,535
a21	96,427	59,880	29,842	9,010	-30,644	4,360	-6,060	-12,796
a22	-44,296	-46,840	-17,013	-85,628	3,585	7,719	3,156	8,078
a23	3,467	-4,174	-1,079	-10,015	-1,036	3,519	0,023	0,331
a24	-2,104	-7,042	-2,649	3,528	-0,002	-0,006	0,001	-0,002
a25	-23,678	-3,507	-9,648	32,555	9,860	-0,658	3,881	17,325
a26	-60,459	-11,053	-8,315	34,774	23,149	-1,573	3,832	17,622



Таблица 2

Значения MAPE для различных моделей описания изменения расхода электроэнергии на участках постоянного тока со III-м типом профиля пути, %

Модель	PM	MLP 12-11-1	MLP 12-14-1	MLP 12-12-1	MLP 12-13-1	MLP 12-7-1
1	2	3	4	5	6	7
Расход электроэнергии на участках III-го типа профиля пути постоянного тока						
R^2	0,664	0,911	0,890	0,857	0,783	0,908
MAPE, %	0,624	0,266	0,291	0,417	0,457	0,294
Потери электроэнергии на участках III-го типа профиля пути постоянного тока						
Модель	PM	MLP 12-14-1	MLP 12-11-1	MLP 12-6-1	MLP 12-10-1	MLP 12-14-1
R^2	0,690	0,797	0,824	0,832	0,879	0,829
MAPE, %	0,843	0,614	0,582	0,550	0,563	0,627

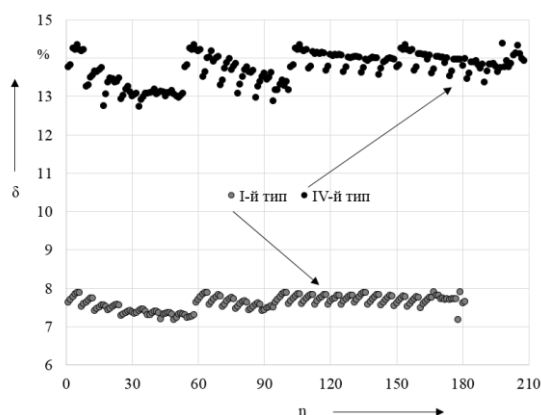
Окончание табл. 2

Расход электроэнергии на участках III-го типа профиля пути переменного тока						
Модель	PM	MLP 12-9-1	MLP 12-5-1	MLP 12-4-1	MLP 12-13-1	MLP 12-13-1
R^2	0,941	0,964	0,968	0,918	0,993	0,968
MAPE, %	0,203	0,142	0,140	0,203	0,066	0,091
Потери электроэнергии на участках III-го типа профиля пути переменного тока						
Модель	PM	MLP 12-13-1	MLP 12-14-1	MLP 12-12-1	MLP 12-11-1	MLP 12-13-1
R^2	0,928	0,949	0,945	0,971	0,928	0,943
MAPE, %	1,282	1,094	1,080	0,543	1,014	1,127
Расход электроэнергии на участках IV-го типа профиля пути постоянного тока						
Модель	PM	MLP 12-5-1	MLP 12-12-1	MLP 12-4-1	MLP 12-7-1	MLP 12-15-1
R^2	0,891	0,923	0,923	0,937	0,913	0,960
MAPE, %	0,680	0,546	0,577	0,401	0,549	0,360
Потери электроэнергии на участках IV-го типа профиля пути постоянного тока						
Модель	PM	MLP 12-15-1	MLP 12-13-1	MLP 12-14-1	MLP 12-11-1	MLP 12-6-1
R^2	0,879	0,953	0,952	0,956	0,964	0,964
MAPE, %	0,793	0,575	0,523	0,558	0,471	0,537
Расход электроэнергии на участках IV-го типа профиля пути переменного тока						
Модель	PM	MLP 12-7-1	MLP 12-9-1	MLP 12-5-1	MLP 12-10-1	MLP 12-13-1
R^2	0,963	0,987	0,914	0,956	0,987	0,987
MAPE, %	0,332	0,210	0,353	0,200	0,194	0,243
Потери электроэнергии на участках IV-го типа профиля пути переменного тока						
Модель	PM	MLP 12-4-1	MLP 12-12-1	MLP 12-15-1	MLP 12-11-1	MLP 12-8-1
R^2	0,939	0,943	0,954	0,971	0,970	0,959
MAPE, %	1,420	1,154	0,973	0,606	0,579	0,946

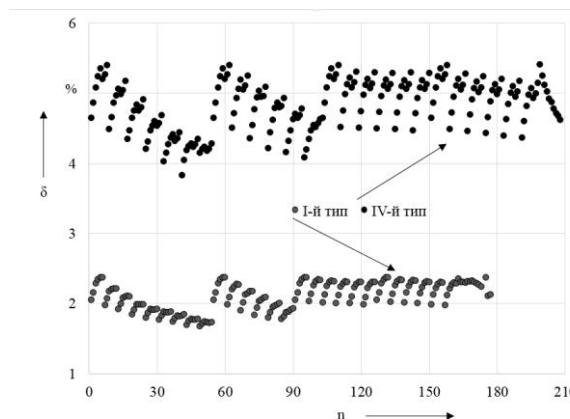
от 6 до 15. В качестве метода оптимизации при определении структуры и активационных функций использован итерационный метод численной оптимизации BFGS. В результате расчетов в моделях на скрытых слоях и выходном слое используются следующие нелинейные функции активации – гиперболический тангенс, логистическая, экспоненциальная, тождества.

Заключение

Полученные модели для оценки влияния параметров ГДП на объем электропотребления и небаланс на участках с различными типами профилей пути и родами тока позволяют описать результаты имитационного моделирования и использовать их в дальнейшем при оценке энергетической эффективности перевозочного процесса. В каче-



а)



б)

Рис. 6. Зависимости изменения небаланса электроэнергии для участков постоянного (а) и переменного (б) тока для различных вариантов расчета

стве примера на рис. 6. представлены результаты изменения небаланса электроэнергии на участках постоянного и переменного тока, позволяющие оценить изменение небаланса от параметров ГДП и профиля пути.

Результаты имитационного моделирования процессов электропотребления на тягу и уровня небаланса электроэнергии потерь на участках с III-м и IV-м типом профиля пути с системами тягового электроснабжения постоянного и переменного тока напряжением 3,3 кВ и 25 кВ соответственно показывают наличие влияния на них параметров графика движения поездов. В условиях организации грузового движения влияние параметров графика может приводить к изменению объема электропотребления на 3–10 % для участков постоянного тока и на 3–4 % – переменного тока, при этом

изменения небаланса для участков постоянного тока наблюдается в диапазоне 1–1,5 %, для участков переменного тока в диапазоне – 1–1,3 %. Выявленные зависимости изменения объема электропотребления и небаланса от параметров графика позволяют перейти к их описанию с помощью моделей, полученных на основе регрессионного анализа и нейронных сетей. Сравнение значения коэффициентов детерминации и показателя процентной погрешности, полученных для рассмотренных регрессионных моделей и нейронных сетей, показывает, что для решения задачи описания изменения объема электропотребления и небаланса на участках с III-м и IV-м типом профиля наиболее подходящими являются нейронные модели на основе многослойных перцептронов.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Энергетическая стратегия холдинга «РЖД» до 2020 года и на перспективу до 2030 года : распоряжение ОАО «РЖД» от 14.12.2016 № 2537р. М., 2016.
2. Scheepmaker G.M., Goverde Rob M.P., Kroon L.G. Review of energy-efficient train control and timetabling, European Journal of Operational Research, 2016.
3. Toletti A. De Martinis V., Weidmann U. What about train length and energy efficiency of freight trains in rescheduling models? // Transportation Research Procedia. 2015. № 10. P. 584–594.
4. К.Т. Kim, К.М. Kim. An optimization for reducing maximum traction power of MRT railways: a case study of Seoul Metro line 4, Proceedings of the Conference of the Korean Institute of Industrial Engineers, Donguk University, Seoul, 2010.
5. Chen J.F., Lin R.L., Liu Y.C. Optimization of an MRT Train Schedule: Reducing Maximum Traction Power by Using Genetic Algorithms, IEEE Transactions on Power Systems. 2005. № 20 (3). P. 1366–1372.
6. Gu Q., Cao F., Tang T. novel peak power demand reduction strategy under a moving block signalling system. Computers in Railways XII. WIT Press, 2010. P. 663–674.
7. Вильгельм А.С., Незевак В.Л., Шатохин А.П. Сравнительная эффективность вариантов использования энергии рекуперации на железных дорогах постоянного тока // Наука и образование транспорту. 2013. Т. 1. С. 243–247.
8. Закарюкин, В. П. Моделирование режимов систем тягового электроснабжения при движении тяжеловесных поездов / В. П. Закарюкин, А. В. Крюков, А. В. Черепанов // Вестн. ИрГТУ. 2016. Т. 20. № 11. С. 133–142.
9. Черемисин В.Т., Черемисин В.Т., Шатохин А. П. Повышение энергетической эффективности системы тягового электроснабжения в условиях работы постов секционирования с накопителями электрической энергии // Изв. Томск. политехн. ун-та. Инжиниринг георесурсов. 2015. Т. 326. № 10. С. 54–64.
10. Методика анализа и прогнозирования расхода ТЭР на тягу поездов. М. : ОАО РЖД, 2014.



11. Молярчук В.С. Теоретические основы методики нормирования расхода топлива и электроэнергии для тяговых средств транспорта. М. : Транспорт, 1966. 263 с.
12. Сидорова Е.А., Подгорная С.О. Влияние коэффициента участковой скорости на удельный расход энергии в грузовом движении // Известия Транссиба. 2016. № 2 (26). С. 112–118.
13. Незевак В.Л. Основные зависимости изменения объема электроэнергии от параметров графика движения поездов на участках постоянного тока с I-м типом профиля // Известия Транссиба. 2017. № 2 (30). С. 87–99.
14. Незевак В.Л., Саркенов С.С., Черемисин В.Т. Оценка влияния пакетной организации движения на объем электроэнергии на тягу на участках постоянного тока с I-м типом профиля // Современные технологии. Системный анализ. Моделирование. 2017. № 3 (55). С. 135–144.
15. Незевак В.Л., Перестенко А.В., Черемисин В.Т. Характеристики профилей пути на электрифицированных участках железных дорог в аспекте классификации типов // Вестн. Ростов. гос. ун-та путей сообщ. / Ростов. гос. ун-т путей сообщ. 2017. № 2. С. 118–128.
16. Ферстер Э., Ренц Б. Методы корреляционного и регрессионного анализа. М. : Инфра-М, 1998. 302 с.
17. Дрейпер Н. Прикладной регрессионный анализ. Кн. 2. М. : Финансы и статистика, 1987. 351 с.
18. Хайкин С. Нейронные сети. М. : Вильямс. 2006. 1104 с.

REFERENCES

1. Energeticheskaya strategiya kholdinga «RZhD» do 2020 goda i na perspektivu do 2030 goda: Rasporyazhenie OAO «RZhD» ot 14.12.2016 No. 2537r [The energy strategy of the Russian Railways holding until 2020 and for the future until 2030: Order of JSC Russian Railways of December 14, 2016. No. 2537r]. Moscow, 2016.
2. Scheepmaker G. M., Goverde R., Kroon L. G. Review of energy-efficient train control and timetabling. *European Journal of Operational Research* (2016), doi: 10.1016/j.ejor.2016.09.044.
3. Toletti A., De Martinis V., Weidmann U. What about train length and energy efficiency of freight trains in rescheduling models? *Transportation Research Procedia*, 2015. No. 10, pp. 584 - 594.
4. Kim K.T., Kim K.M. An optimization for reducing maximum traction power of MRT railways: a case study of Seoul Metro line 4. *Proceedings of the Conference of the Korean Institute of Industrial Engineers*, 2010. Donguk University, Seoul.
5. Chen J.F., Lin R.L., Liu Y.C., Optimization of an MRT Train Schedule: Reducing Maximum Traction Power by Using Genetic Algorithms. *IEEE Transactions on Power Systems*, 2005. 20(3), pp. 1366-1372.
6. Gu Q., Cao F., Tang T. Novel peak power demand reduction strategy under a moving block signalling system. *Computers in Railways XII*, 2010. WIT Press, pp. 663-674.
7. Vil'gel'm A. S. Nezevak V. L., Shatokhin A. P. Sravnitel'naya effektivnost' variantov ispol'zovaniya energii rekuperatsii na zheleznykh dorogakh postoyannogo toka [Comparative efficiency of options for the use of energy recovery on the railways of direct current]. *Nauka i obrazovanie transport [Science and education for transport]*. 2013, Vol. 1, pp. 243 - 247.
8. Zakaryukin V. P. Kryukov A. V., Cherepanov A. V. Modelirovanie rezhimov sistem tyagovogo elektrosnabzheniya pri dvizhenii tyazhelovesnykh poezdov [Modeling modes of traction power supply systems during the movement of heavy trains]. *Vestnik Irkutskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta [Proceedings of Irkutsk State Technical University]*, 2016. Vol. 20, No. 11, pp. 133–142. DOI: 10.21285/1814-3520-2016-11-133-142.
9. Cheremisin V. T., Nezevak V. L., Cheremisin V. T., Shatokhin A. P. Povyshenie energeticheskoi effektivnosti sistemy tyagovogo elektrosnabzheniya v usloviyakh raboty postov sektionirovaniya s nakopitel'yami elektricheskoi energii [Increasing the energy efficiency of the traction power supply system in the conditions of the work of sectioning posts with electrical energy storage devices]. *Izvestiya Tomskogo politekhnicheskogo universiteta. Inzhiniring georesursov [Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering]*, 2015. Vol. 326. No. 10, pp. 54 - 64.
10. Metodika analiza i prognozirovaniya raskhoda TER na tyagu poezdov [Methods of analysis and forecasting the consumption of fuel and energy resources for train traction]. Moscow: OAO «RZhD» Publ., 2014.
11. Molyarchuk V. S. Teoreticheskie osnovy metodiki normirovaniya raskhoda topliva i elektroenergii dlya tyagovykh sredstv transporta [Theoretical foundations of the methods of rationing fuel consumption and electricity for traction vehicles]. Moscow: Transport Publ., 1966. 263 p.
12. Sidorova E. A., Podgornaya S. O. Vliyanie koeffitsienta uchastkovoi skorosti na udel'nyi raskhod energii v gruzovom dvizhenii [Influence of the coefficient of precinct speed on the specific energy consumption in the freight movement]. *Izvestiya Transsiba [Journal of Transsib Railway Studies]*. Omsk state transport un-ty Publ., 2016. No.2 (26), pp. 112 - 118.
13. Nezevak V. L. Osnovnye zavisimosti izmeneniya ob'ema elektroenergii ot parametrov grafika dvizheniya poezdov na uchastkakh postoyannogo toka s I-m tipom profilya [The main dependences of changes in the volume of electricity on the parameters of the train schedule on the DC sections with the first type of profile]. *Izvestiya Transsiba [Journal of Transsib Railway Studies]*. Omsk state transport un-ty Publ., 2017. No. 2 (30), pp. 87-99.
14. Nezevak V. L., Sarkenov S. S., Cheremisin V. T. Otsenka vliyaniya paketnoi organizatsii dvizheniya na ob'em elektroenergii na tyagu na uchastkakh postoyannogo toka s I-m tipom profilya [Assessment of the impact of packet traffic on the volume of electricity on traction in DC sections with type I profile]. *Sovremennye tekhnologii. Sistemnyi analiz. Modelirovanie [Modern Technologies. System Analysis. Modeling]*. Irkutsk state transport un-ty Publ., 2017. No. 3 (55), pp. 135-144.
15. Nezevak V. L., Perestenko A. V., Cheremisin V. T. Kharakteristiki profilei puti na elektrifitsirovannykh uchastkakh zheleznykh dorog v aspekte klassifikatsii tipov [Characteristics of the track profiles on electrified sections of railways in terms of the classification of types]. *Vestnik Rostovskogo gosudarstvennogo universiteta putei soobshcheniya*. Rostov state transport un-ty Publ., 2017. No. 2, pp. 118-128.
16. Ferster E., Rents B. Metody korrelyatsionnogo i regressionnogo analiza [Methods of correlation and regression analysis]. Transl. from German. Moscow: Infra-M Publ., 1998. 302 p. (In Russ.).
17. Dreiper N. Prikladnoi regressionnyi analiz : v 2-kh kn. Kn. 2 [Applied Regression Analysis: in 2 books. Book 2]. Transl. from English. 2nd ed., updated and revised. Moscow: Finansy i statistika Publ., 1987. 351 p. (In Russ.).
18. Khaikin S. Neironnye seti: polnyi kurs [Neural networks: a full course]. 2nd ed. Transl. from English. Moscow: Vil'yams Publ., 2006. 1104 p. (In Russ.).

**Информация об авторах**

Незевак Владислав Леонидович – к. т. н., доцент, старший научный сотрудник, научно-исследовательская часть, кафедра «Электроснабжение железнодорожного транспорта», Омский государственный университет путей сообщения, e-mail: nezevakwl@mail.ru

Для цитирования

Незевак В. Л. Моделирование процессов электропотребления на тягу при изменении параметров графика движения поездов на электрифицированных участках с III-м и IV-м типом профиля пути // Современные технологии. Системный анализ. Моделирование. – 2019. – Т. 61, № 1. – С. 156–166. – DOI: 10.26731/1813-9108.2019.1(61).156–166

Authors

Vladislav Leonidovich Nezevak – Ph.D. in Engineering Science, Assoc. Prof. Omsk State Transport University, Omsk, the Russian Federation, e-mail: nezevakwl@mail.ru

For citation

Nezevak V. L. Modelirovaniye protsessov elektropotrebleniya na tyagu pri izmenenii parametrov grafika dvizheniya poyezdov na elektrifitsirovannykh uchastkakh s III-m i IV-m tipom profilya puti [Modeling of power consumption for traction if you change the settings of the schedule of trains on electrified sections III-th and IV-th type of the profile path]. *Sovremennyye tekhnologii. Sistemyy analiz. Modelirovaniye* [Modern Technologies. System Analysis. Modeling], 2019, Vol. 61, No. 1, pp. 156–166. DOI: 10.26731/1813-9108.2019.1(61).156–166