

cle] // *Sbornik nauchnykh trudov KhGADTU «Avtomobil'nyi transport» [Proceedings of KhADTU "Road transport"]*. No. 7–8 (2001). Pp. 36–38.

14. Storozhev M.V., Popov E.A. *Teoriya obrabotki metallov davleniem [Theory of metal forming]*. Moscow: Mashinostroenie Publ., 1977.

15. Polukhin P.I., Gun G.Ya., Galkin A.M. *Soprotivlenie plasticheskoi deformatsii metallov i spлавov [Resistance to plastic deformation of metals and alloys]*. Moscow: Metallurgiya Publ., 1976. 488 p.

16. Goodier J.N., Timoshenko S. P. *Theory of Elasticity*. McGraw-Hill Education; 3rd edition, 608 p. [Russ. ed.: Timoshenko S.P., Gud'er Dzh. *Teoriya uprugosti*. Per. s angl. Moscow: Nauka, 1979]. 325 p.

17. Ksenofontova V.A. *Razrabotka metoda opredeleniya skorosti transportnogo sredstva do stolknoeniya v rezul'tate DTP: dis. ... kand. tekhn. nauk [Development of a method for determining the speed of a vehicle before a collision as a result of an accident: Ph.D. (Engineering) diss.]* (05.22.20). KhNADU Publ., Kharkov, 2003. 226 p.

### Информация об авторах

**Ксенофонтова Виктория Анатольевна** – к. т. н., доцент кафедры автомобильного транспорта, Севастопольский государственный университет, г. Севастополь, e-mail: vaksenofontova.v@gmail.com

**Кияшко Лариса Александровна** – старший преподаватель кафедры автомобильного транспорта, Севастопольский государственный университет, г. Севастополь, e-mail: LAKiyashko@sevsu.ru

**Сопин Павел Константинович** – к. т. н., доцент кафедры автомобильного транспорта, Севастопольский государственный университет, г. Севастополь, e-mail: PKSopin@sevsu.ru

### Information about the authors

**Victoria A. Ksenofontova**, Ph.D. in Engineering Science, Associate Professor, the Subdepartment of Automobile Transport, Sevastopol State University, Sevastopol, e-mail: vaksenofontova.v@gmail.com

**Larisa A. Kiyashko**, Senior Lecturer of the Subdepartment of Automobile Transport, Sevastopol State University, Sevastopol, e-mail: LAKiyashko@sevsu.ru

**Pavel K. Sopin**, Ph.D. in Engineering Science, Associate Professor, the Subdepartment of Automobile Transport, Sevastopol State University, Sevastopol, e-mail: PKSopin@sevsu.ru

DOI 10.26731/1813-9108.2020.3(67).70-80

УДК 621.311

## Имитационная модель системы тягового электроснабжения для определения энергетических показателей в условиях работы систем накопления электроэнергии

**В. Л. Незевак**✉

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

✉ NezevakWL@mail.ru

### Резюме

В статье рассматриваются вопросы имитационного моделирования работы систем тягового электроснабжения постоянного тока с применением систем накопления электроэнергии. Развитие имитационного моделирования позволяет исследовать влияние одного или ряда факторов на показатели работы системы тягового электроснабжения. К указанным факторам относят массу, техническую скорость, нагрузку на ось, рекуперативное торможение, особенности расписания для грузового движения и др. Моделирование позволяет оценить степень влияния одного или группы факторов на такие показатели работы, как напряжение на токоприемнике, нагрузочная способность силового оборудования, температура нагрева проводов и тросов, тяговое электропотребление, объем рекуперации энергии, технические потери и др. В настоящее время имитационное моделирование позволяет выполнить серию расчетов для получения статистической оценки влияния факторов на показатели (работы системы тягового электроснабжения), а также аналитического представления полученных зависимостей, необходимых для решения задач анализа и прогнозирования изменения показателей работы системы тягового электроснабжения этих показателей. В работе приводятся схемы многовариантных расчетов, выполняемых с целью оценки влияния параметров инфраструктуры, подвижного состава и организации движения на показатели работы систем тягового электроснабжения. Дополнение схем замещения, используемых в настоящее время для расчетов систем тягового электроснабжения, позволяет выполнять большинство расчетов по оценке влияния работы систем накопления электроэнергии на энергетические показатели и оценивать условия их работы. Особенностью расчета схем замещения систем тягового электроснабжения, содержащих устройства накопления электроэнергии, известными методами, в частности, методом узловых потенциалов, является необходимость учета их включенного и отключенного состояния, определяемого ограничениями мощности и энергоемкости, уровнем напряжения в контактной сети. Предложено дополнить существующие методы расчета алгоритмом расчета, учитывающим условия работы системы накопления. Метод расчетов позволяет оценить условия работы систем накопления с электротяговой нагрузкой, требования к их основным параметрам и влияние на показатели работы системы тягового электроснабжения.

### Ключевые слова

система тягового электроснабжения, энергетические показатели, имитационное моделирование, методы расчета, алгоритм, схема замещения, системы накопления электроэнергии, степень заряженности.

**Для цитирования**

Незевак В.Л. Имитационная модель системы тягового электроснабжения для определения энергетических показателей в условиях работы систем накопления электроэнергии / В.Л. Незевак // Современные технологии. Системный анализ. Моделирование. – 2020. – № 3(67). – С. 70–80. – DOI: 10.26731/1813-9108.2020.3(67).70-80

**Информация о статье**

поступила в редакцию: 30.06.2020, поступила после рецензирования: 21.07.2020, принята к публикации: 10.08.2020

## **A simulation model of traction power supply system to determine energy indicators in conditions of energy storage system operation**

V. L. Nezevak✉

Omsk State Transport University, Omsk, the Russian Federation

✉ NezevakWL@mail.ru

**Abstract**

The article deals with the issues of simulation of the operation of DC traction power supply systems with the use of power storage systems. The development of simulation modeling allows us to study the influence of one or several factors on the performance of the traction power supply system. These factors include weight, technical speed, axle load, regenerative braking, features of the schedule for cargo traffic, etc. Modeling allows one to assess the degree of influence of one or a group of factors on performance indicators such as: current collector voltage, load capacity of power equipment, heating temperature of wires and cables, traction power consumption, energy recovery volume, technical losses, etc. Currently, simulation allows performing a series of calculations to obtain a statistical assessment of the influence of factors on indicators (of performance of the traction power supply system) and also an analytical representation of the obtained dependencies necessary for solving the problems of analysis and forecasting changes in the performance indicators of the traction power supply system. The article presents diagrams of multivariate calculations performed to assess the impact of infrastructure parameters, rolling stock and traffic organization on the performance of traction power supply systems. The addition of equivalent circuits currently used for calculations of traction power supply systems makes it possible to perform most calculations to assess the impact of performance of electric power storage systems on energy indicators and assess their operating conditions. The peculiarity of calculation of the equivalent circuits for traction power supply systems containing electricity storage devices using known methods, in particular, the method of nodal potentials, is the need to take into account their on and off state, determined by power and energy consumption restrictions, the voltage level in the contact overhead system. It is proposed to supplement the existing calculation methods with a calculation algorithm that takes into account the operating conditions of the storage system. The calculation method allows us to evaluate the operating conditions of storage systems with electric traction load, the requirements for their main parameters and the impact on the performance of the traction power supply system.

**Keywords**

traction power supply system, energy indicators, simulation modeling, calculation methods, algorithm, equivalent circuit, power storage systems, charge level degree

**For citation**

Nezevak V.L. Imitatsionnaya model' sistemy tyagovogo elektrosnabzheniya dlya opredeleniya energeticheskikh pokazatelei v usloviyakh raboty sistem nakopleniya elektroenergii [Simulation model of the traction power supply system for determining energy indicators in the conditions of operation of power storage systems]. *Sovremennye tekhnologii. Sistemy analiz. Modelirovanie* [Modern Technologies. System Analysis. Modeling], 2020, No. 3(67), pp. 70–80. 10.26731/1813-9108.2020.3(67).70-80

**Article Info**

Received: 30.06.2020, Revised: 21.07.2020, Accepted: 10.08.2020

**Введение**

Сложность натуральных экспериментов в системах тягового электроснабжения железнодорожного транспорта обусловлена условиями их проведения, связанными с предоставлением технологических «окон» и безостановочным пропуском поездов. Предварительная технико-экономическая оценка эффективности работы энергетического оборудования проводится до его внедрения в действующие электроустановки и основана на имитационном моделировании, позволяющем сравнить энергетиче-

ские показатели работы системы тягового электроснабжения до и после внедрения рассматриваемых устройств, технологий или режимов работы. Одним из преимуществ имитационного моделирования является возможность оценки влияния одного или нескольких выбранных факторов на энергетические показатели работы системы тягового электроснабжения, чего достаточно трудно добиться при проведении натуральных экспериментов [1–5]. Использование систем накопления электроэнергии при решении задач по стабилизации напряжения и выравни-

ванию графика электрической нагрузки обуславливает необходимость проведения расчетов по оценке изменения энергетических показателей системы тягового электроснабжения (электропотребление на тягу, технические потери электроэнергии, удельный расход электроэнергии, удельная рекуперация, напряжение на токоприемнике и др.) в условиях работы до и после их внедрения [6–7]. Широкий круг задач, который можно решить при помощи имитационного моделирования работы системы тягового электроснабжения, делает актуальным выбор тех или иных методов исследований и расчетов энергетических показателей в условиях применения систем накопления электроэнергии.

### Описание характера изменения энергетических показателей

В настоящее время имитационное моделирование стало одним из основных методов оценки эффективности работы различного силового оборудования в системе тягового электроснабжения, которое позволяет оценить энергетические показатели. В холдинге «РЖД» применяется ряд программ для выполнения осуществления имитационного моделирования. Для выполнения тяговых расчетов применяются различные специализированные программные комплексы: «Комплекс расчетов тягового электроснабжения (Кортэс)», «Искра-ПТР», ПК «ЭРА», «MoveRW», «Вектрум» и модели, реализуемые в других комплексах расчетов и моделирования, например, «Matlab» и др.

Имитационное моделирование работы системы тягового электроснабжения при пропуске по участку электроподвижного состава включает в себя три основных этапа. На первом этапе выполняются тяговые расчеты, на втором – определяется график движения поездов, на третьем – определяются энергетические показатели работы системы тягового электроснабжения для принятых условий. Указанный порядок применяется многими авторами при решении различных задач [8–10].

При расчете энергетических показателей системы тягового электроснабжения на основе выполненных тяговых расчетов (ТР) строится график движения поездов (ГДП), в соответствии с которым определяется тяговая нагрузка и выполняются электрические расчеты (ЭР) (рис. 1, а). Данный порядок расчетов не подразумевает многовариантности и проводится один раз для заданных условий. При решении задач, связанных с оценкой влияния графика движения поездов на энергетические показатели, порядок расчетов предусматривает изменение графика движения после определения показателей (рис. 1, б). В данном случае исследуются вопросы влияния расписания, интервалов движения поездов и их чередования с поездами повышенной массы, условий пакетного пропуска и других факторов на энергетические показатели путем их изменения или корректировки при выходе за допустимые пределы (КФ). Кроме этого, для поиска вариантов соответ-

ствия энергетических показателей нормам или целевым ориентирам порядок расчетов должен позволять изменять параметры системы тягового электроснабжения. К другому виду задач относится оценка влияния параметров поезда и локомотива, режима следования и т. д. на траектории следования поезда по участку и на график движения (рис. 1, в). В данном случае энергетические показатели работы рассчитываются для набора вариантов, оказывающих влияние на график тяговой нагрузки системы тягового электроснабжения. В случае одновременного изменения параметров тягового расчета, графика движения и системы электроснабжения порядок расчета показателей должен предусматривать корректировку параметров и влияющих факторов на всех этапах расчета (рис. 1, г).

Направления совершенствования известных методов расчетов энергетических показателей системы тягового электроснабжения связаны с учетом условий работы, характеристиками оборудования, повышением точности расчетов, среди которых Среди прочих условий необходимо отметить следующие: совершенствование моделей объектов в схеме замещения системы тягового электроснабжения; учет устройств с автоматическим регулированием параметров; совершенствование моделей при согласованном управлении параметрами, мощностью и напряжением на подстанциях и линейных объектах; учет изменения напряжения на токоприемнике электроподвижного состава при выполнении тяговых расчетов и формировании графика движения поездов на основании данных электрического расчета; уменьшение шага расчетов на этапах выполнения тяговых и электрических расчетов.

Проведение расчетов на основе имитационного моделирования позволяет выполнить оценку изменения:

- энергетических показателей (электропотребления на тягу, объема энергии рекуперации, технических потерь, удельного расхода электроэнергии и др.);
- показателей нагрузочной способности (нагрева проводов и тросов тяговой сети, загрузки силового оборудования; тока оборудования и напряжения на токоприемнике электроподвижного состава).

Расчеты выполняются с учетом влияющих факторов, наиболее значимыми среди которых являются при выполнении тяговых расчетов – профиль пути, масса поезда, остановки, нагрузка на ось, ограничения скорости, скорость проследования участка (техническая и участковая), количество вагонов и длина поезда, серия локомотива, режимная карта, условия выбега и торможения, условия применения рекуперативного торможения и др.; при формировании графика движения – условия пропуска поездов по системе сигнализации или интервальной технологии, условия пакетной или пачечной организации движения, расписание следования электроподвижного состава на участке и др.; при проведении электрических расчетов – напряжение холостого хода и мощность корот-

кого замыкания на шинах тяговых подстанций, характеристики устройств автоматического регулирования (напряжения и мощности), режимы питания межподстанционных зон, характеристики исследуемых устройств электроснабжения и др.

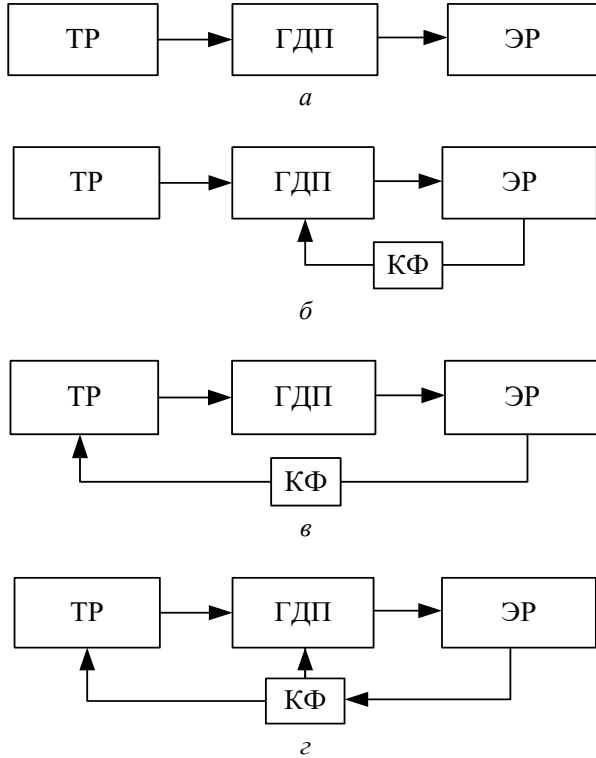


Рис. 1. Варианты выполнения имитационного моделирования

Fig. 1. Options for performing simulation

При решении задач по оценке влияния выбранного набора параметров и факторов на энергетические

показатели работы системы тягового электроснабжения изменяется порядок проведения многовариантных расчетов. Преимуществом имитационного моделирования является возможность оценки влияния одного фактора или параметра на энергетические показатели при сохранении неизменными остальных и получения в дальнейшем на основе результатов моделирования наиболее подходящих интерполяционных или аппроксимирующих функций.

В общем случае при подготовке данных для имитационного моделирования рассматривается определенный набор параметров и факторов, принадлежащих к некоторому множеству:

$$X = (x_1, x_2, x_3, \dots, x_n),$$

при заданном изменении параметров и факторов подмножества, принадлежащего данному множеству:

$$\forall \Delta x_i \in X,$$

существует функция, описывающая изменение исследуемого показателя:

$$\exists y_i = F_i(X_i).$$

Функции  $y_i$ , описывающие изменение исследуемых показателей, позволяют получать в аналитическом виде характеристики моделируемого оборудования и решать задачи анализа изменений показателей и прогноза их значений.

Недостатком данного метода является необходимость получения функции для рассматриваемых участков железных дорог, обусловленная имеющимися отличиями характеристик инфраструктуры и параметров движения, например, профилем пути. Задачи определения энергетических показателей системы тягового электроснабжения при изменении параметров или факторов решаются с применением различных методов интерполяции и аппроксимации [11] (рис. 2).

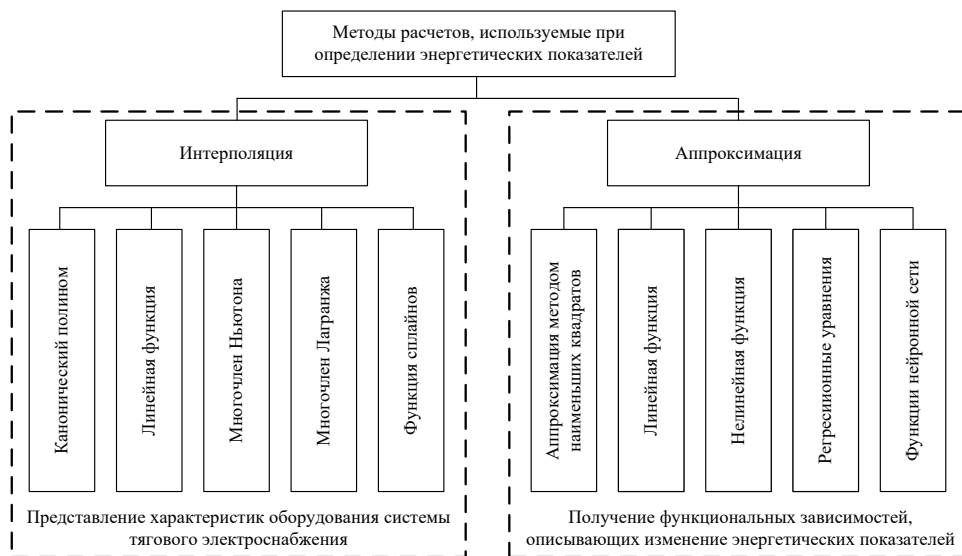


Рис. 2. Методы расчетов, используемые для расчета энергетических показателей

Fig. 2. Computational methods used to calculate energy indicators

Энергетические показатели являются функциями многих переменных, в число которых входят и параметры пути, поезда, условия проследования электроподвижного состава по межподстанционной зоне и др. Для анализа электропотребления, потерь электроэнергии и других показателей в зависимости от изменения влияющих факторов и параметров используются результаты имитационного моделирования, являющиеся исходными данными для аппроксимации функциями функций многих переменных. Результаты применения функций аппроксимации для определения энергетических показателей по коэффициенту детерминации, абсолютной ошибке показывают, что наилучшие результаты для рассматриваемых задач позволяют получить регрессионные функции и функции моделей нейронных сетей. Указанные функции аппроксимации позволяют достичь высокой степени приближения и достоверности, что подтверждается расчетами по определению сходимости на основе критериев Стьюдента и Фишера [12]. Различные методы интерполяции используются при задании характеристик электроподвижного состава и силового оборудования.

Существуют различные подходы к использованию результатов измерений энергетических показателей электроподвижного состава и системы тягового электроснабжения для оценки влияния параметров и факторов на энергетические показатели, например, технические потери электроэнергии [13]. Наличие указанных данных позволяет выполнить верификацию имитационных моделей и их параметров, а также на основе полученных теоретических зависимостей использовать результаты измерений на электроподвижном составе для оценки энергетических показателей системы тягового электроснабжения [14–19].

В общем случае упрощенная электрическая схема тяговой подстанции, состоящая из понижающего трансформатора  $T_1$ , подключенного к шинам высшего и низшего напряжения (Ш ВН и Ш НН соответственно), преобразовательного трансформатора  $T_2$ , подключенного аналогично к шинам Ш СН и Ш НН, преобразователя  $VD$  и присоединений контактной сети ФКС имеет вид (рис. 3).

При выполнении расчетов энергетических показателей используются схемы замещения элементов, составляющих систему тягового электроснабжения. Схема замещения тяговой подстанции постоянного тока принимает вид (рис. 4).

Схема замещения содержит источник напряжения с  $E_0$ , принимаемой равной принимаемым равным напряжению холостого хода подстанции, эквивалентное сопротивление подстанции  $R_{\Sigma TP}$  и диод  $VD$ . Эквивалентное сопротивление предназначено для определения энергетических показателей в установившихся режимах. Для расчета внешней характеристики подстанции определяется полное со-

противление элементов подстанции с учетом сопротивления электроэнергетической системы и силовых трансформаторов подстанции по формуле [20]:

$$R_{\Sigma TP} = k_{пр} \cdot \left( \frac{1}{S_{к.з}} + \frac{u_{к ПТ}}{100 \cdot n_{ПТ} \cdot S_{ПТ ном}} + \frac{u_{к ПРТ}}{100 \cdot n_{ПРТ} \cdot S_{ПРТ ном}} \right), \quad (1)$$

где  $S_{к.з}$  – мощность трехфазного короткого замыкания на Ш ВН тяговой подстанции;  $S_{ПТ ном}$ ,  $S_{ПРТ ном}$  – номинальная мощность понижающего и преобразовательного трансформатора соответственно;  $u_{к ПТ}$ ,  $u_{к ПРТ}$  – напряжение короткого замыкания понижающего трансформатора и напряжение короткого замыкания коммутации преобразовательного трансформатора соответственно;  $k_{пр}$  – коэффициент, зависящий от схемы преобразования (3,67 – для эквивалентной двенадцатифазной схемы и 7,41 – трехфазной мостовой схемы).

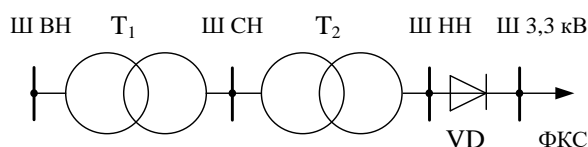


Рис. 3. Типовой состав силового оборудования тяговой подстанции

Fig. 3. Typical composition of power equipment of the traction substation

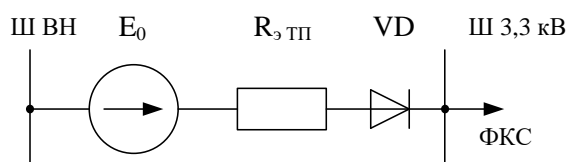


Рис. 4. Схема замещения тяговой подстанции

Fig. 4. Equivalent circuit of the traction substation

Использование данных о потерях короткого замыкания позволяет повысить точность расчетов при определении потерь активной электроэнергии в силовых трансформаторах. В этом случае при расчете внешней характеристики используют эквивалентное сопротивление, определяемое как полное, а расчет потерь активной электроэнергии выполняется по данным о мощности потерь короткого замыкания по формуле

$$R_{\Sigma TP} = \frac{U_{ном ВН}^2}{S_{к.з}} + \frac{P_{к ПТ} \cdot U_{ном ВН}^2}{n_{ПТ} \cdot S_{ПТ ном}^2} + \frac{P_{к ПРТ} \cdot U_{ном НН}^2}{n_{ПРТ} \cdot S_{ПРТ ном}^2} \quad (2)$$

При определении внешней характеристики тяговой подстанции сопротивления ее элементов должны быть приведены к уровню напряжения вентильных обмоток преобразовательного трансформатора.

В этом случае эквивалентное сопротивление определяется по формуле

$$R_{\Sigma \text{ ПП}} = \frac{U_{\text{ВН}}^2}{k_{\text{тр В-Н}}^2} \cdot \left( \frac{1}{S_{\text{к.з}}} + \frac{u_{\text{к ПП}}}{100 \cdot n_{\text{ПП}} \cdot S_{\text{ПП ном}}} + \frac{u_{\text{к ПРТ}}}{100 \cdot n_{\text{р}} \cdot n_{\text{ПРТ}} \cdot S_{\text{ПРТ ном}}} \right), \quad (3)$$

где  $n_{\text{р}}$  – количество вторичных обмоток преобразовательного трансформатора.

Сопротивления отличаются при расчете по формуле (1) и (3), поскольку в (1) не используются номинальные напряжения и коэффициенты трансформации. Для различного набора исходных данных значения могут отличаться в несколько раз. Отличием в формулах является определение коэффициента для приведения сопротивления к низкому напряжению и учет количества расщепленных обмоток преобразовательного трансформатора.

Использование устройств регулирования мощности на тяговых подстанциях учитывается в знаменателе – значение работающих трансформаторов определяется режимом работы (с автоматическим или ручным управлением).

Применение устройств регулирования напряжения приводит к изменению расчетной формулы. При применении вольто-добавочного устройства, подключенного параллельно основному преобразовательному трансформатору, формула для определения эквивалентного сопротивления принимает вид

$$R_{\Sigma \text{ ПП}} = \frac{U_{\text{ВН}}^2}{k_{\text{тр В-Н}}^2} \cdot \left( \frac{1}{S_{\text{к.з}}} + \frac{u_{\text{к ПП}}}{100 \cdot n_{\text{ПП}} \cdot S_{\text{ПП ном}}} + \frac{u_{\text{к ПРТ}}}{100 \cdot n_{\text{р}} \cdot n_{\text{ПРТ}} \cdot S_{\text{ПРТ ном}}} + \frac{u_{\text{к ВДУ}}}{100 \cdot n_{\text{р}} \cdot n_{\text{ВДУ}} \cdot S_{\text{ВДУ ном}}} \cdot \lambda \right), \quad (4)$$

где  $\lambda$  – состояние вольто-добавочного устройства (включенное и отключенное состояние), соответствующее значениям 1 и 0;  $n_{\text{р}}$ ,  $n_{\text{ВДУ}}$  – количество вторичных обмоток и количество вольто-добавочных устройств соответственно.

При применении устройств плавного регулирования напряжения формула для расчета эквивалентного сопротивления принимает вид:

$$R_{\Sigma \text{ ПП}} = \frac{U_{\text{ВН}}^2}{k_{\text{тр В-Н}}^2} \cdot \left( \frac{1}{S_{\text{к.з}}} + \frac{u_{\text{к ПП}}}{100 \cdot n_{\text{ПП}} \cdot S_{\text{ПП ном}}} + \frac{u_{\text{к ПРТ}}}{100 \cdot n_{\text{р}} \cdot n_{\text{ПРТ}} \cdot S_{\text{ПРТ ном}}} + \frac{X_{\text{р}} \cdot U_{\text{ном}}}{100 \cdot I_{\text{ном}}} \right), \quad (5)$$

где  $X_{\text{р}}$  – номинальное сопротивление реактора, %.

При определении эквивалентного сопротивления для моделирования внешней характеристики подстанции принимается ряд допущений, связанных с приведением параметров схемы замещения стороны переменного тока к стороне постоянного, с изменением напряжения со стороны переменного тока, сопротивлением преобразователя и др.

Для расчета энергетических показателей необходимо дополнить схему замещения системы тягового электроснабжения схемой системы накопления электроэнергии. Учитывая необходимость управления режимами для систем накопления электроэнергии необходимо определить рабочие диапазоны напряжений, соответствующие режимам заряда, разряда и ожидания. В этом случае в схеме замещения появляется коммутатор, состояние которого соответствует заданным рабочим диапазонам рабочего напряжения.

При введении в расчетную схему системы накопления электроэнергии, содержащую силовой трансформатор, без учета сопротивления преобразователей, получаем упрощенную схему замещения (рис. 5).

Эквивалентное сопротивление системы накопления электроэнергии для включенного положения  $S$  определяется по формуле

$$R_{\Sigma \text{ СНЭ}} = \frac{U_{\text{НН}}^2}{k_{\text{тр Н-В}}^2} \cdot \left( \frac{u_{\text{к Т}}}{100 \cdot n_{\text{р}} \cdot n_{\text{Т}} \cdot S_{\text{Т ном}}} \right). \quad (6)$$

Для отключенного положения  $S$  эквивалентное сопротивление принимается равным бесконечности. Переключение ключа  $S$  в схеме позволяет реализовать расчеты для трех режимов системы накопления электроэнергии в зависимости от уровня напряжений в контактной сети. Граничными значениями в этом случае являются напряжения для перехода в режим заряда  $U_{\text{зар}}$  и разряда  $U_{\text{раз}}$ . При реализации режима стабилизации по току в режимах заряда и разряда в расчеты вводится ограничение по максимальному току, при достижении максимального значения  $I_{\text{макс}}$  ток стабилизируется (рис. 6). Результатами расчета являются данные об изменении тока, напряжения, электропотребления по режимам работы, степени заряженности и глубины разряда. В случае решения задачи выбора энергоемкости для заданной номинальной мощности представленный алгоритм (рис. 6) дополняется блоком проверки граничных условий степени заряженности.

В настоящее время для определения токов, напряжений, мощности и потерь электроэнергии в схемах замещения систем тягового электроснабжения используются методы расчета, основанные на решении топологических матриц. Определение токов и напряжений в схеме замещения выполняется по одному из методов расчета. В соответствии с ме-

тодом узловых потенциалов система уравнений для определения токов и напряжений записывается в матричной форме:

$$[A][g_b][A]^T[\varphi] = [A][J_b] - [A][g_b][E_e], \quad (7)$$

где  $[A]$ ,  $[A]^T$  – узловая матрица размерностью  $(y-1) \cdot \nu$  и транспонированная узловая матрица для схемы замещения соответственно ( $y$  – количество узлов,  $\nu$  – количество ветвей в схеме);  $[g_b]$  – матрица проводимости ветвей размерностью  $(y-1) \cdot (y-1)$ ;  $[\varphi]$  – матрица-столбец потенциалов узлов размерностью  $(y-1)$ ;  $[J_b]$  – матрица-столбец токов источников тока размерностью  $\nu$ ;  $[E_e]$  – матрица-столбец э.д.с. источников напряжения размерностью  $\nu$ .

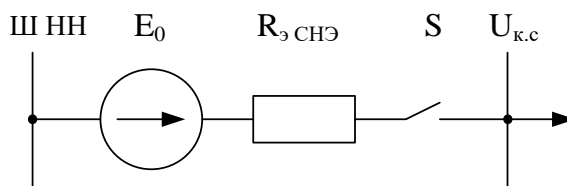


Рис. 5. Схема замещения системы накопления электроэнергии  
Fig. 5. Equivalent circuit of the energy storage system

Решение уравнения (7) позволяет определить потенциалы во всех узлах схемы по формуле

$$[\varphi] = [G]^{-1}[J], \quad (8)$$

где  $[G]$  – матрица узловых проводимостей, определяемая по формуле

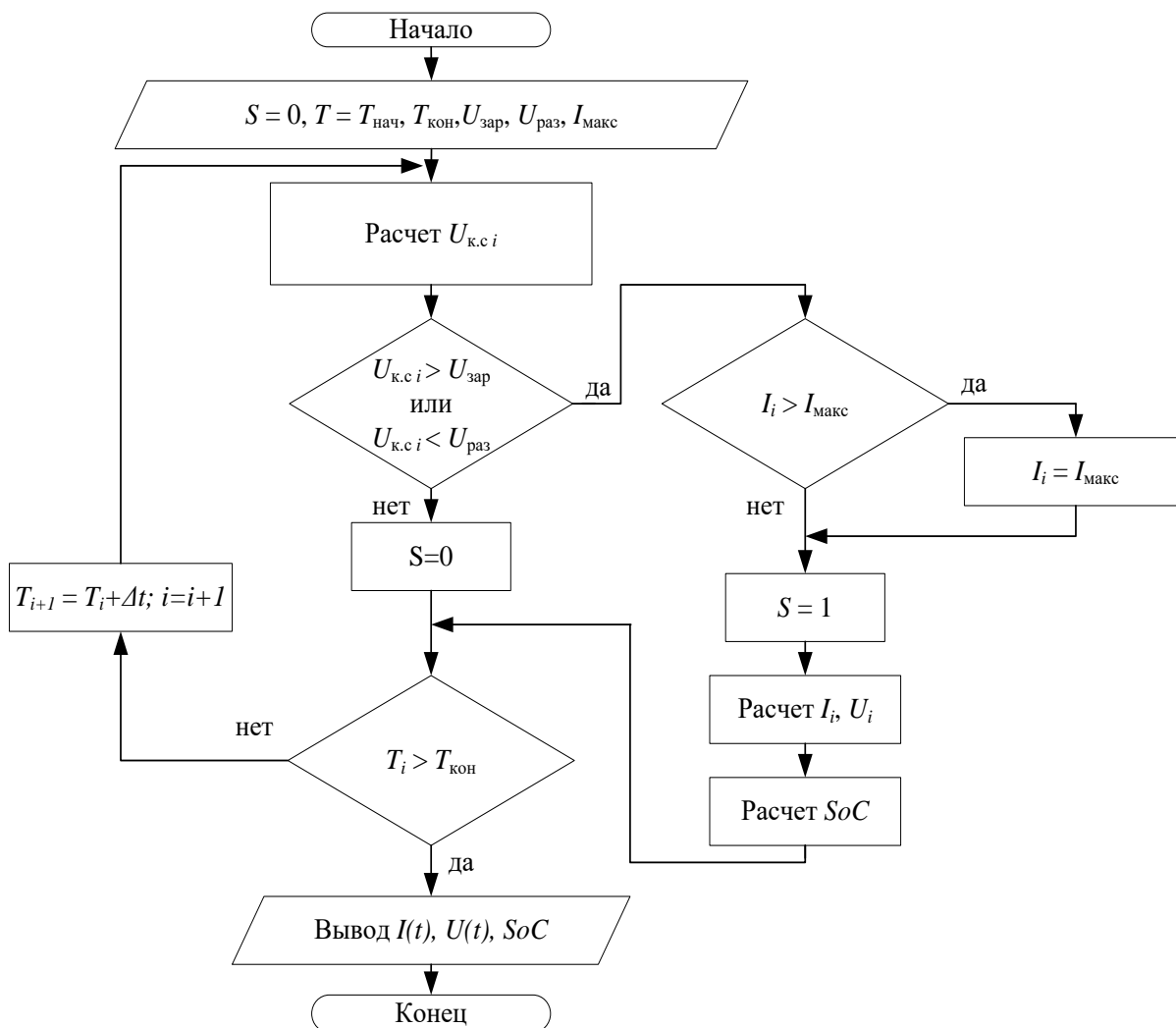


Рис. 6. Алгоритм расчетов энергетических показателей системы накопления электроэнергии

Fig. 6. Algorithm for calculating the energy indicators of the energy storage system

$$[G] = [A][g_b][A]^T; \quad (9)$$

$[J]$  – матрица токов ветвей, определяемая по уравнению

$$[J] = [A][J_b] - [A][g_b][E_b]. \quad (10)$$

После определения потенциалов во всех узлах схемы замещения ток в произвольной ветви  $mn$  схемы определяется по формуле

$$I_{b\ mn} = (E_{mn} - (\varphi_n - \varphi_m)) \cdot g_{mn}, \quad (11)$$

где  $E_{mn}$  – суммарная э.д.с. ЭДС ветви;  $\varphi_m, \varphi_n$  – потенциалы в узлах  $m$  и  $n$ ;  $g_{mn}$  – проводимость ветви  $mn$ .

Схема замещения межподстанционной зоны для расчета энергетических показателей работы системы тягового электроснабжения приведена далее (рис. 7). Для схемы количество узлов составляет 14, первый узел принят за базисный (б.у.), количество ветвей – 19. Напряжение холостого хода подстанций представлены э.д.с. ЭДС  $E_1$  и  $E_3$ , потенциалы узлов  $\varphi_1$ – $\varphi_{14}$ , проводимости и токи ветвей –  $g_{mn}$  и  $j_{mn}$  соответственно, матрица проводимостей  $g_{mn}$  для рассматриваемой схемы имеет размерность  $13 \times 13$ . Представленная схема замещения является мгновенной и изменяется в соответствии с перемещением электроподвижного состава ЭПС1 и ЭПС2. Мак-

симальная размерность матриц проводимостей, токов и потенциалов будет определяться протяженностью межподстанционной зоны, размерами и интенсивностью движения поездов.

Определение токов и напряжений накопителя электроэнергии в схеме замещения осуществляется с учетом включенного или отключенного положения (состояние ключа  $S$  определяется по алгоритму, см. рис. 6). В этом случае для рассматриваемой схемы замещения с учетом состояния ключа  $S$  определяется значение и направление тока, напряжение, что позволяет определить кумулятивное значение энергии  $W(t)$  и степень заряженности:

$$SoC(t) = \frac{W(t)}{W_{\text{ном нээ}}} \cdot \eta \cdot 100, \quad (12)$$

где  $W_{\text{ном нээ}}$  – номинальная энергоемкость накопителя электроэнергии;  $\eta$  – коэффициент полезного действия системы накопления, определяемый с учетом потерь в преобразователях.

В качестве примера можно привести результаты имитационного моделирования для условий Московского центрального кольца [16] по определению степени заряженности систем накопления электроэнергии применительно к электроподвижному составу (электропоезда серии 2ЭСГ) и посту секцио-

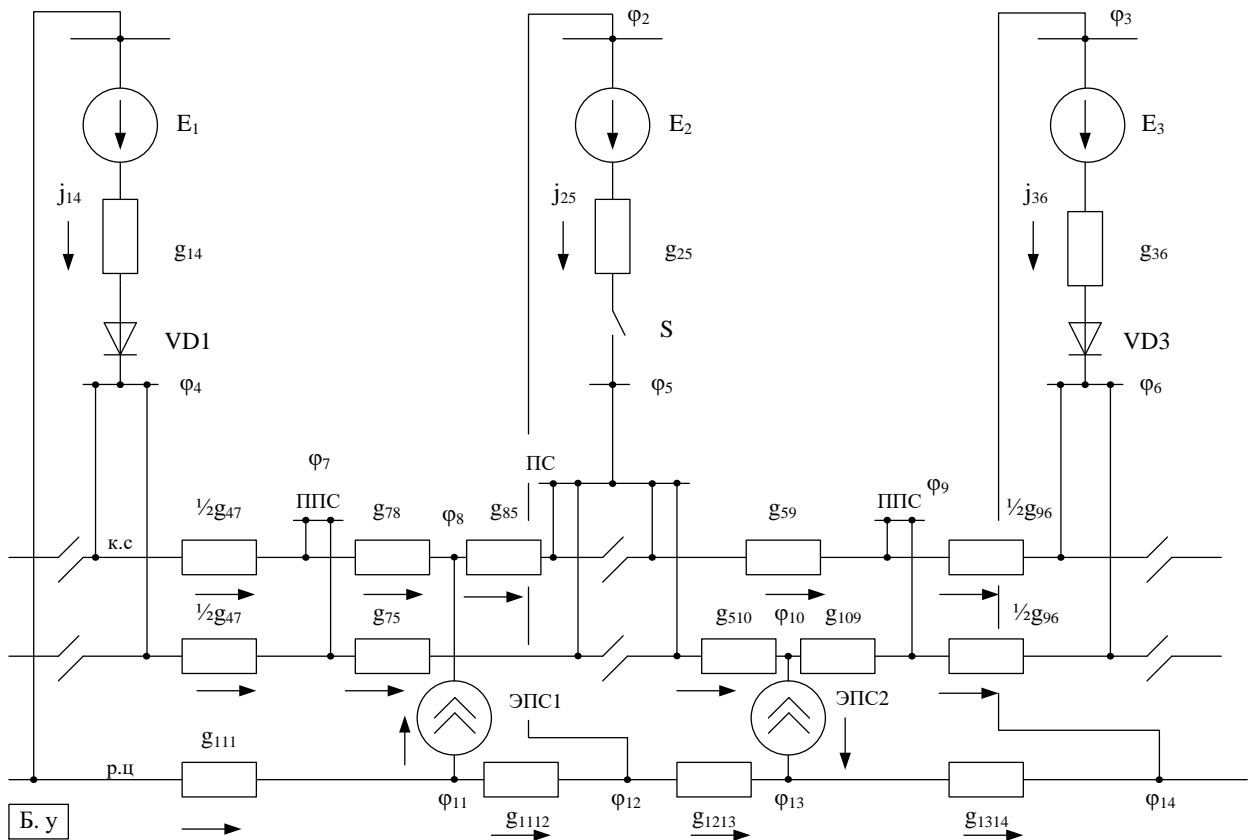
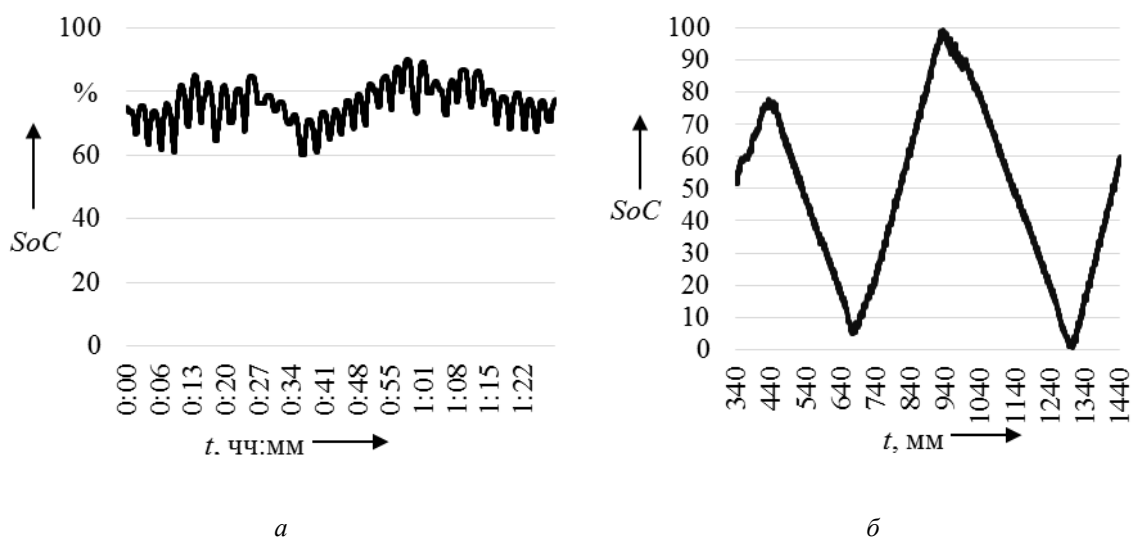


Рис. 7. Схема замещения межподстанционной зоны  
Fig. 7. Equivalent circuit of the intersubstation zone





**Рис. 8.** Графики степени заряженности системы накопления электроэнергии при работе:

*a* – на борту электропоезда; *б* – на посту секционирования

**Fig. 8.** Graphs of the degree of charge level of the energy storage system during operation:

*a* – on the electric train; *b* – at the sectioning point

нирования (рис. 8).

Оценка влияния систем накопления электроэнергии на энергетические показатели должна быть получена при решении следующих задач:

- оценка пропускной способности;
- определение электропотребления и потерь электроэнергии;
- расчет аварийных режимов.

При необходимости оценки влияния параметров системы накопления на рассматриваемые показатели расчеты выполняются по схеме (см. рис. 1, *в*, *г*).

Выполненные на основе представленных схем замещения расчеты позволяют решать задачи по оценке условий работы систем накопления на участках с преобладанием пассажирского или грузового движения, получению сравнительной оценки эффективности их применения на борту электроподвижного состава и в системе тягового электроснабжения.

### Заключение

Совершенствование метода имитационного моделирования при расчете энергетических показате-

лей работы системы тягового электроснабжения с учетом работы накопителей электроэнергии заключается в разработке порядка расчетов и алгоритмов управления режимами, дополнении схем замещения. Применение используемой методологии расчетов позволяет оценить эффективность работы системы накопления электроэнергии при расчете энергетических показателей, пропускной способности и показателей нагрузочной способности.

Предложенный порядок позволяет оценить изменение степени заряженности и глубины разряда систем накопления при работе с электротяговой нагрузкой, влияние систем на показатели работы системы тягового электроснабжения и пропускную способность участка, оценить требуемую мощность и энергоемкость систем. Дальнейшее совершенствование методов расчета связано с разработкой вопросов учета нелинейных характеристик систем накопления электроэнергии в режимах заряда и разряда, оценки эффективности схем преобразования напряжения при подключении к тяговой сети.

### Список литературы

1. Константинова Ю.А. Ли В.Н., Константинов А.М. Имитационное моделирование транзита электроэнергии из системы внешнего электроснабжения по тяговой сети переменного тока // Вестн. Приамур. гос. ун-та им. Шолом-Алейхема, 2019. № 4 (37). С. 70–76.
2. Закарокин В.П., Крюков А.В., Авдиденко И.М. Моделирование систем тягового электроснабжения 2×25 кВ с коаксиальными кабелями и трансформаторами Вудбриджа // Известия Транссиба. 2016. № 2 (26). С. 70–78.
3. Бардушко В.Д. Туйгунова А.Г., Табанаков П.В. Вопросы обеспечения требуемой точности моделирования тяговой сети // Вестник транспорта Поволжья. 2014. № 2 (44). С. 58–66.
4. Черемисин В.Т. Незевак В.Л. Эффективность применения систем накопления электроэнергии на Московском центральном кольце // Мир транспорта. 2019. Т. 17. № 5 (84). С. 58–77.

5. Черемисин В.Т., Незевак В.Л., Шатохин А.П. Повышение эффективности работы системы тягового электроснабжения с гибридными накопителями электроэнергии. Омск : Изд-во ОмГУПС, 2019. 222 с.
6. Незевак В.Л., 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.
7. Незевак В.Л. Моделирование режимов нагрузки на шинах постов секционирования при работе в системе тягового электроснабжения накопителей электроэнергии // Вестн. Ростов. гос. ун-та путей сообщ. 2017. № 4 (68). С. 159–170.
8. Никифоров М.М., Вильгельм А.С. Расчет эффективности использования энергии рекуперации на однопутных и двухпутных участках железных дорог постоянного и переменного тока // Вестник транспорта Поволжья. 2018. № 2 (68). С. 28–37.
9. Баева И.А. Методика расчета системы тягового электроснабжения постоянного тока 3,0 кВ при введении устройств регулирования напряжения // Изв. Петербург. ун-та путей сообщ. 2019. Т. 16. № 1. С. 51–58.
10. Незевак В.Л. Совершенствование модели влияния параметров графика движения поездов на тяговое электропотребление на участках постоянного и переменного тока с I и II типом профиля пути при помощи регрессионных моделей и нейронных сетей // Вестн. транспорта Поволжья. 2017. № 6 (66). С. 34–44.
11. Korn G., Korn T. Mathematical handbook [for scientists and engineers]. New York : McGraw-Hill Book Company, 1968. 832 p.
12. Черемисин В.Т., Незевак В.Л., Шатохин А.П. Повышение энергетической эффективности перевозочного процесса на основе изменения параметров графика движения поездов. Омск, 2019. 250 с.
13. Gatelyuk O.V., Nesevac V.L., Erbes V.V. Analysis of measurement data in a direct current traction power-supply system with uncontrolled rectifiers // Russian Electrical Engineering. 2019. Vol. 90. № 2. Pp. 180–186.
14. Radu P.V., Lewandowski M., Szalag A. On-Board and Wayside Energy Storage Devices Applications in Urban Transport Systems – Case Study Analysis for Power Applications // Energies. 2013. Vol. 13. No. 8. Doi: 10.3390/en13082013.
15. Pan D., Chen Z., Mei M. Energy efficiency emergence of high-speed train operation and systematic solutions for energy efficiency improvement // SN Applied Sciences. 2020. Vol. 2. No. 5. Doi:10.1007/s42452-020-2692-5.
16. Черемисин В.Т., Незевак В.Л. Перспективы применения систем накопления электроэнергии на Московском центральном кольце // Бюл. результатов науч. исслед. 2020. № 2. С. 33–44.
17. Черемисин В.Т., Незевак В.Л., Эрбес В.В. Оценка регулирования напряжения на стороне высшего напряжения тяговых подстанций в аспекте энергетической эффективности // Транспорт Урала. 2017. № 3 (54). С. 75–81.
18. Вильгельм А.С., Незевак В.Л. Совершенствование способа определения энергетических показателей движения поезда и системы тягового электроснабжения // Вестн. Южно-Урал. гос. ун-та. Сер: Энергетика. 2016. Т. 16. № 3. С. 32–40.
19. Nezevak V., Shatokhin A. Interaction's Simulation Modeling of Electric Rolling Stock and Electric Traction System // International Ural Conference on Electrical Power Engineering. UralCon, 2019. doi:10.1109/uralcon.2019.8877672.
20. ГОСТ Р 57670 – 2017. Системы тягового электроснабжения железной дороги. Введ. 2018–05–01 М. : Стандартинформ, 2017. 46 с.

## References

1. Konstantinova Yu.A., Li V.N., Konstantinov A.M. Imitatsionnoe modelirovanie tranzita elektroenergii iz sistemy vneshnego elektrosnabzheniya po tyagovoi seti peremennogo toka [Simulation modeling of the transit of electricity from the external power supply system through the AC traction network] // Vestnik Priamurskogo gosudarstvennogo universiteta im. Sholom-Aleikhem [Sholem Aleichem Bulletin of Amur State University], 2019. No. 4 (37). Pp. 70–76.
2. Zakaryukin V.P., Kryukov A.V., Avdienko I.M. Modelirovanie sistem tyagovogo elektrosnabzheniya 2×25 kV s koaksial'nymi kabelyami i transformatorami vudbridzha [Modeling of 2×25 kV traction power supply systems with coaxial cables and Woodbridge transformers] // Izvestiya Transsiba [Journal of Transsib Railway Studies], 2016. No. 2 (26). Pp. 70–78.
3. Bardushko V.D., Tuigunova A.G., Tabanakov P.V. Voprosy obespecheniya trebuemoi tochnosti modelirovaniya tyagovoi seti [Issues of ensuring the required accuracy of modeling traction network] // Vestnik transporta Povolzh'ya, 2014. No. 2 (44). Pp. 58–66.
4. Cheremisin V.T., Nezevak V.L. Effektivnost' primeneniya sistem nakopleniya elektroenergii na Moskovskom tseentral'nom kol'tse [The effectiveness of the use of energy storage systems on the Moscow Central Ring] // Mir transporta [World of Transport], 2019. Vol. 17. No. 5 (84). Pp. 58–77.
5. Cheremisin V.T., Nezevak V.L., Shatokhin A.P. Povyshenie effektivnosti raboty sistemy tyagovogo elektrosnabzheniya s gibridnymi nakopitelyami elektroenergii: monografiya [Improving the efficiency of the traction power supply system with hybrid energy storage devices: a monograph]. Omsk. Omsk State Transport University Publ., 2019. 222 p.
6. Nezevak V.L., Cheremisin V.T., Shatokhin A.P. Povyshenie energeticheskoi effektivnosti sistemy tyagovogo elektrosnabzheniya v usloviyakh raboty postov seksionirovaniya s nakopitelyami elektricheskoi energii [Increasing the energy efficiency of the traction power supply system in the operating conditions of sectioning posts with electric energy storage units] // Izvestiya Tomskogo politekhnicheskogo universiteta. Inzhiniring georesursov [Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering], 2015. Vol. 326. No. 10. Pp. 54–64.
7. Nezevak V.L. Modelirovanie rezhimov nagruzki na shinakh postov seksionirovaniya pri rabote v sisteme tyagovogo elektrosnabzheniya nakopitelei elektroenergii [Modeling of load modes on the tires of sectioning posts during operation in the traction power supply system of energy storage units] // Vestnik Rostovskogo gosudarstvennogo universiteta putei soobshcheniya [Vestnik RGUPS], 2017. No. 4 (68). Pp. 159–170.
8. Nikiforov M.M., Vil'gel'm A.S. Raschet effektivnosti ispol'zovaniya energii rekuperatsii na odnoputnykh i dvukhputnykh uchastkakh zheleznnykh dorog postoyannogo i peremennogo toka [Calculation of the efficiency of energy recovery on single-track and double-track sections of DC and AC railways] // Vestnik transporta Povolzh'ya, 2018. No. 2 (68). Pp. 28–37.

9. Baeva I.A. Metodika rascheta sistemy tyagovogo elektrosnabzheniya postoyannogo toka 3,0 kV pri vvedenii ustroystv regulirovaniya napryazheniya [Methodology for calculating a 3.0 kV DC traction power supply system with the introduction of voltage regulation devices] // *Izvestiya Peterburgskogo universiteta putei soobshcheniya* [Proceedings of Petersburg Transport University], 2019. Vol. 16. No. 1. Pp. 51–58.
10. Nezevak V.L. Sovershenstvovanie modeli vliyaniya parametrov grafika dvizheniya poezdov na tyagovoe elektropotreblenie na uchastkakh postoyannogo i peremennogo toka s I i II tipom profilya puti pri pomoshchi regressionnykh modelei i nei-ronnykh setei [Improvement of the model of the influence of the parameters of the train schedule on traction power consumption in the sections of direct and alternating current with I and II type of track profile using regression models and neural networks] // *Vestnik transporta Povolzh'ya*, 2017. No. 6 (66). Pp. 34–44.
11. Korn G., Korn T. Mathematical handbook [for scientists and engineers] / McGraw-Hill Book Company: New York. 1968. 832 p.
12. Cheremisin V.T., Nezevak V.L., Shatokhin A.P. Povyshenie energeticheskoi effektivnosti perevoznogo protsessa na osnove izmeneniya parametrov grafika dvizheniya poezdov [Increasing the energy efficiency of the transportation process based on changing the parameters of the train schedule]. Omsk, 2019. 250 p.
13. Gatelyuk O.V., Nesevac V.L., Erbes V.V. Analysis of measurement data in a direct current traction power-supply system with uncontrolled rectifiers / *Russian Electrical Engineering*, 2019. Vol. 90. No. 2. Pp. 180–186.
14. Radu P.V., Lewandowski M., Szlag A. On-Board and Wayside Energy Storage Devices Applications in Urban Transport Systems – Case Study Analysis for Power Applications. *Energies*, 2013. Vol. 13. No. 8. Doi: 10.3390/en13082013.
15. Pan D., Chen Z., Mei M. Energy efficiency emergence of high-speed train operation and systematic solutions for energy efficiency improvement. *SN Applied Sciences*, 2020. Vol. 2. No. 5. Doi:10.1007/s42452-020-2692-5.
16. Cheremisin V.T., Nezevak V.L. Perspektivy primeneniya sistem nakopleniya elektroenergii na Moskovskom tsentral'nom kol'tse [Prospects for the use of energy storage systems in the Moscow Central Ring] // *Byulleten' rezul'tatov nauchnykh issledovaniy* [Bulletin of scientific research results], 2020. No. 2. Pp. 33–44.
17. Cheremisin V.T., Nezevak V.L., Erbes V.V. Otsenka regulirovaniya napryazheniya na storone vysshego napryazheniya tyagovykh podstantsii v aspekte energeticheskoi effektivnosti [Assessment of voltage regulation on the high voltage side of traction substations in terms of energy efficiency] // *Transport Urala* [Transport of the Urals], 2017. No. 3 (54). Pp. 75–81.
18. Vil'gel'm A.S., Nezevak V.L. Sovershenstvovanie sposoba opredeleniya energeticheskikh pokazatelei dvizheniya poezda i sistemy tyagovogo elektrosnabzheniya [Improvement of the method for determining the energy indicators of train movement and traction power supply system] // *Vestnik Yuzhno-Ural'skogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya: Energetika* [Bulletin of the South Ural State University. Series: Power Engineering], 2016. Vol. 16. No. 3. Pp. 32–40.
19. Nezevak V., Shatokhin A. Interaction's Simulation Modeling of Electric Rolling Stock and Electric Traction System. 2019 International Ural Conference on Electrical Power Engineering (UralCon). 2019. doi:10.1109/uralcon.2019.8877672.
20. GOST R 57670 – 2017. Sistemy tyagovogo elektrosnabzheniya zheleznoi dorogi [Railroad traction power supply systems]. Moscow: Standartinform Publ., 2017. 46 p.

**Информация об авторах**

**Незевак Владислав Леонидович** – канд. техн. наук, доцент, старший научный сотрудник, доцент кафедры электроснабжения железнодорожного транспорта, Омский государственный университет путей сообщения, г. Омск, e-mail: NezevakWL@mail.ru

**Information about the authors**

**Vladislav L. Nezevak** – Ph. D. in Engineering Science, Senior Research Officer, Associate Professor, Associate Professor of the Subdepartment of Railway Transport Power Supply, Omsk State Transport University, Omsk, e-mail: NezevakWL@mail.ru

DOI 10.26731/1813-9108.2020.3(67).80-90

УДК 621.331:625.1

## Анализ вариантов усиления системы электроснабжения участка Слюдянка – Гончарово ВСЖД

А. А. Кашин<sup>1</sup>, Е. Ю. Пузина<sup>2,3</sup>✉

<sup>1</sup>Иркутская дистанция электроснабжения Восточно-Сибирской железной дороги, г. Иркутск, Российская Федерация

<sup>2</sup>Иркутский государственный университет путей сообщения, г. Иркутск, Российская Федерация

<sup>3</sup>Иркутский национальный исследовательский технический университет, г. Иркутск, Российская Федерация

✉ lena-rus05@mail.ru

**Резюме**

В связи с планируемым увеличением объема грузоперевозок к 2025 г. по исследуемому участку Восточно-Сибирской железной дороги на основе модели системы внешнего и тягового электроснабжения участка Слюдянка – Гончарово выполнен анализ пропускной способности. Результаты анализа подтвердили острую необходимость усиления данного участка в связи с существенным отклонением от нормируемых значений многих параметров нормального режима работы как системы внешнего, так и системы тягового электроснабжения участка. С целью обеспечения заданной пропускной способности участка исследованы некоторые возможные способы усиления. Так, в рамках усиления системы внешнего электроснабжения предложено установить дополнительный автотрансформатор на районной трансформаторной подстанции Подкаменная. Однако данный способ не дал желаемых ре-