

## ИССЛЕДОВАНИЕ ПАРАМЕТРОВ ТЯГОВОЙ СЕТИ ЭЛЕКТРОВЗОВ ГОРНОДОБЫВАЮЩИХ ПРЕДПРИЯТИЙ

С. М. Кузнецов<sup>1</sup>, И. И. Сингизин<sup>1</sup>, А. Н. Борзенков<sup>1</sup>, М. В. Рожкова<sup>1</sup>, С. Н. Андрияшин<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Новосибирский государственный технический университет, пр. К. Маркса, 20,  
г. Новосибирск, 630073, Россия

**Аннотация:** На современном витке индустриального и энергетического развития наблюдается рост угледобычи, минеральных и рудных ископаемых. Большую долю в объеме перевозок полезных ископаемых составляют грузоперевозки железнодорожным транспортом, которые на горнодобывающих предприятиях растут из года в год. На крупных горно-обогатительных комбинатах в настоящее время перевозится до нескольких десятков миллионов тонн вскрышных пород. Развитие электрификации и активное внедрение электрической тяги стали приоритетными направлениями в развитии железнодорожного транспорта горнодобывающих предприятий. В данной работе предлагается имитационная модель тяговой сети горнодобывающих предприятий для изучения ее переходных режимов работы. Модель была верифицирована на основе изменения амплитуды фидерных токов тяговых подстанций в течение времени. Используя эту модель, можно исследовать режимы работы тяговой сети при запуске поезда, коротком замыкании и переходе через секционный изолятор тяговой сети. Это позволяет корректировать настройки токово-импульсных защит для улучшения надежности электроснабжения тяговой сети горнодобывающих предприятий при изменении ее параметров, режимов движения и в аварийных ситуациях. Результаты вычислений модели согласуются с реальными данными. Определение точных значений настроек должно быть основано на предварительных аналитических расчетах и уточнено с помощью математического моделирования. При этом необходимо разработать набор защитных характеристик для выключателя или реле РДШ-II с учетом параметров тяговой сети. Результаты имитационного моделирования сравнимы с осциллограммами цифровых терминалов, что свидетельствует об адекватности имитационной модели.

**Ключевые слова:** переходный процесс, тяговая сеть, максимальная импульсная защита, полный комплект защит, надёжность функционирования, цифровой терминал, ток, напряжение, сопротивление, уставка тока, зона действия.

**Для цитирования:** Кузнецов С. М., Сингизин И. И., Борзенков А. Н., Рожкова М. В., Андрияшин С. Н. Исследование параметров тяговой сети электровозов горнодобывающих предприятий // Горный информационно-аналитический бюллетень. — 2023. — № 10-1. — С. 127–140. DOI: 10.25018/0236\_1493\_2023\_101\_0\_127.

### Research of parameters of the traction network of electric locators of mining enterprises

S. M. Kuznetsov<sup>1</sup>, I. I. Singizin<sup>1</sup>, A. N. Borzenkov<sup>1</sup>, M. V. Rozhkova<sup>1</sup>, S. N. Andriyashin<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Novosibirsk State Technical University, 630073, Novosibirsk, Russia

**Abstract:** Currently, digital terminals are installed in the power supply devices of railways electrified in direct running, subways and urban transport in Russia and in world practice for monitoring, protection and diagnostics of the railway network. The adjustment of the current settings based on the results of the analytical calculation does not ensure the reliable functioning of the feeder protection. In a number of publications, including the authors of this article, it is proposed to correct the results of analytical calculation using mathematical modeling, and then additionally with subsequent adjustment based on the results of monitoring the parameters of electric trains and traction network. In their mass, various protections reacted to such parameters as voltage, current, heating of current-carrying parts and others separately. The development of digital automation tools made it possible to create protection systems that integrally respond to the parameters of transient processes in the traction network. At the same time, multi-channel digital terminals (Inter) revealed difficulties in determining their coverage area and settings. As a result of the research carried out for the West Siberian Railway, a method was proposed for selecting the type of protections, their zones of action and settings, based on monitoring the operating modes of the traction network and mathematical modeling, which improved the parameters of the protection kit as a whole and increased its sensitivity.

**Key words:** digital terminal, full set of protections, operational reliability, current, voltage, resistance, current setting, coverage area, monitoring, remote access.

**For citation:** Kuznetsov S. M., Singizin I. I., Borzenkov A. N., Rozhkova M. V., Andriyashin S. N. Research of parameters of the traction network of electric locators of mining enterprises. *MIAB. Mining Inf. Anal. Bull.* 2023;(10-1):127–140. [In Russ]. DOI: 10.25018/0236\_1493\_2023\_101\_0\_127.

---

## 1. Введение

В последние десятилетия в связи в возрастающей потребностью промышленности в твёрдых полезных ископаемых наметилась тенденция увеличения производительности добычных машин, что привело к созданию современных высокопроизводительных транспортных машин. Открытый способ разработки месторождений полезных ископаемых, получивший значительное развитие в первой половине XX столетия, продолжает играть существенную роль в развитии большинства горнодобывающих стран мира (Россия, Казахстан, США, Китай, Австралия, Бразилия, Чили). Характерной особенностью современного периода является увеличение глубины разработки месторождений и усложнение горно-геологических. Наиболее сложное, трудоемкое и затратное звено процесса разработки месторождений полезных ископаемых открытым способом — транспорт, доля которого в себестоимости добычи

составляет 60–75%, особенно в глубоких карьерах. Железнодорожный транспорт, начиная с 30-х годов прошлого столетия, имеет большое распространение на карьерах и разрезах. Мощные тяговые агрегаты постоянного и переменного тока (ПЭ2, В486, ПЭ3Т, ОПЭ1) производства Новочеркасского и Днепропетровского заводов во второй половине прошлого века сыграли большую роль в интенсификации открытых горных работ на карьерах и разрезах России. В настоящее время в карьерах и разрезах, использующих железнодорожный транспорт, значительный объем горной массы перевозится с помощью железнодорожного грузового карьерного транспорта [1].

В связи со значительным ростом добычи угля, рудного и минерального сырья объем перевозок железнодорожным транспортом на горнодобывающих предприятиях с каждым годом увеличивается и в настоящее время составляет на крупных горно-обогасти-

тельных комбинатах (ГОК) до 50 млн тонн вскрышных пород и более 60 тысяч тонн перевезенной бедной руды в год. Растет протяженность электрифицированных линий и удельный вес перевозочной работы, выполняемой электрической тягой. Например, протяженность железнодорожных путей Михайловского ГОКа увеличивается в среднем на 28 км в год и на текущий момент составляет более 350 км, имеет 18 станций, где работает более 40 тяговых агрегатов и более 30 электровозов для маневровой и вывозной работы. Себестоимость перевозок вскрышных грунтов в отвалы, а также полезных грузов на обогатительные фабрики, переработку и экспорт, значительно ниже электрической тягой, чем тепловозами и автомобильным транспортом. В этой связи надежность работы электрического транспорта оказывает влияние на себестоимость. Наиболее слабым звеном как элемент, не имеющий резерва, в системе электрической тяги на ГДП является контактная сеть, особенно в забоях, где она обустраивается в виде легких передвижных конструкций, повреждаемость которых достаточно высока. К тому же на ограниченной территории ГОКа сконцентрировано большое количество станций, иных отдельных пунктов, маневровых парков, погрузо-разгрузочных путей, складских тупиков, заездов в производственные помещения, как следствие, встречаются очень короткие перегоны, порой достигающие до нескольких сотен метров, специфические искусственные сооружения, такие, как путепроводы, эстакады, разгрузочные бункеры, погрузочные лотки, всевозможные железобетонные, стальные технологические конструкции, создающие большое количество негабаритных мест и крутых уклонов железнодорожных путей, выходящих

на разные уровни таких сооружений. При электрической тяге существует необходимость в подвеске контактного провода как над осью пути (верхний/центральный токосъем), так и сбоку от него (боковой токосъем). Кроме того, на технологических путях электропитание локомотивов осуществляется от токоведущих шин по типу питания мостовых кранов.

Опыт применения железнодорожного транспорта на карьерах Лебединского, Михайловского ГОКов, Магнитогорского металлургического комбината (ММК), угольной компании КузбассУголь и других ГДП позволяет констатировать, что тенденция использования на вывозке вскрышных пород и, возможно, более глубокого ввода электрифицированного железнодорожного транспорта, работающего на напряжении 3300 В (в ММК — на 1500 В), в карьеры в настоящее время распространяется всё шире, при этом уклоны путей увеличивают с 15% до 60–80%, что значительно повышает эффективность работы электрического транспорта, но требует надежной защиты тяговой сети, особенно в глубинной зоне карьера [1].

Еще более трудные с точки зрения обеспечения защиты тяговой сети от короткого замыкания (КЗ) условия работы вертушек в карьерах с многоковшовыми экскаваторами и автоматизированными погрузочными комплексами, где эксплуатируют импортные промышленные электровозы EL3 (около 150 шт.), работающие на напряжении 600 В и 1200 В, мощностью 560 кВт, так как токи короткого замыкания при таких напряжениях практически равны токам нагрузки [2].

Для включения и отключения цепей постоянного тока под нагрузкой, а также для автоматического отключения в случаях перегрузок и коротких

замыканий в цепях постоянного тока сети и тяговых подстанций применяют быстродействующие выключатели.

Настройка токовых уставок защит фидеров по результатам аналитического расчета не обеспечивает их надёжного функционирования. В ряде публикаций [1–3] в том числе и авторами настоящей статьи предложено корректировать результаты аналитического расчёта с помощью математического моделирования и затем еще раз уточнить по результатам мониторинга параметров электропоезда (тип электровоза или тягового агрегата) и тяговой сети. В своей массе различные защиты реагируют на такие параметры, как напряжение, ток, нагрев токоведущих частей и другие по отдельности. Развитие цифровых средств автоматизации позволило создать системы защит, интегрально реагирующих на параметры переходных процессов в тяговой сети. Одновременно с этим выявлены сложности в определении зоны действия и уставок многоканальных цифровых терминалов (Inter). В результате исследований, проведенных для Западно-Сибирской железной дороги, предложена методика выбора типа защит, зон их действия и уставок на основе мониторинга режимов работы тяговой сети и математического моделирования, что позволило улучшить параметры комплекта защиты в целом и повысить ее чувствительность.

Особенностью тяговой сети ГДП по сравнению с магистральным транспортом является разветвленная контактная сеть станций, минимальное сечение контактной сети на вытяжках в разрезах, при этом на подъёмы до 60% тяговый агрегат с 10 думпкарами потребляет ток, близкий току короткого замыкания (КЗ), а на многих разрезах и превышающий его. При этом КЗ в разрезах на участках с передвижной контактной сетью (про-

тяженность ее достигает 60% общей длины контактной сети) и боковым токосъемом в местах погрузки вскрышной породы или продукта (уголь, руды, минералы) происходит в несколько раз чаще, чем на станциях или магистральных участках.

Переходный процесс связан с резким падением постоянной составляющей напряжения тяговой сети ( $U_d$ ), изменением тока ( $I_d$ ) с большой скоростью ( $di/dt$ ) и возникновением высокочастотной составляющей в напряжении и токе фидера контактной сети. Наличие электрической дуги несколько меняет амплитуды отдельных частот [4]. Практически всегда при КЗ тяговые двигатели (ТЭД) электроподвижного состава (ЭПС) переходят в генераторный режим [5], электродвижущая сила (ЭДС) двигателя в генерирующем режиме равна  $E_r = C_n \Phi$ , а напряжение на ТЭД, подключенном к тяговой сети, в этом случае

$$U_{ТЭД} = U_d + L_a \frac{di_r}{dt} + i_r r_a, \quad (1)$$

где  $U_d$  — напряжение тяговой сети, В;  $L_a$  — собственная индуктивность якоря электродвигателя, Гн;  $r_a$  — сопротивление якоря электродвигателя, Ом;  $i_r$  — ток электродвигателя в генераторном режиме работы, А.

Тяговая сеть железных дорог и метрополитенов имеет двухстороннее питание, а на городском транспорте имеет место и одностороннее питание [6]. В первом случае можно принять, что режим генерации двигателей ЭПС наступает через 2–15 мс после начала КЗ. В результате эксперимента изменение тока электродвигателя в генераторном режиме составляет 0,02–0,03 с, переходный процесс при КЗ в тяговой сети завершается через 15–20 мс [7]. После срабатывания защиты напряжение в сети падает до нуля, и ЭПС

повторно переходит в режим длительной генерации, если не разобрана схема ЭПС [8, 9].

С терминалов цифровой защиты авторами получено большое количество осциллограмм, анализ которых показывает, что время затухания основной составляющей генераторного тока составляет 2–3 с и генерирующий ЭПС при анализе может быть представлен как подвижный источник электрической энергии, который подпитывает место повреждения. При этом возрастает величина термической энергии, что увеличивает вероятность пережога или отжига контактного провода [10, 11]. Часть этой энергии непостоянна, и может быть рассчитана.

## 2. Параметры элементов цепи в переходном режиме для математической модели

При создании модели для исследования переходного процесса при КЗ [12] и влияния ЭПС на параметры переходного процесса ( $di/dt$  — изменение тока скорости его нарастания,  $u_c$  — мгновенное значение напряже-

ния на емкости,  $u_c = U_d$ ) использованы схемы замещения тяговой подстанции (ТП) и контактной сети (КС) с сосредоточенными параметрами [13]. На рис. 1 приведена схема замещения тяговой сети ( $R_k, L_k$  — активное и индуктивное сопротивление контактной сети соответственно) для исследования переходных процессов в режимах пуска поезда, моделирующая короткое замыкание между тяговой сетью и рельсам ( $R_p, L_p, R_n$  — активное, индуктивное и переходное сопротивление рельсовой сети соответственно), для системы с постоянным двусторонним питанием ( $U_{d0}, R_0, L_0$  — ЭДС, внутреннее активное сопротивление и индуктивность тяговой подстанции как источника питания соответственно). В схеме замещения (рис. 1)  $M$  — взаимная индуктивность проводов и рельсов,  $i_j$  — мгновенное значение тока в  $j$ -м контуре, где  $j = 1-6$ .

Параметрирование электропоезда [14] с характеристиками электроподвижного состава ( $R_E, L_E, U_E$  — активное сопротивление, индуктивность и противоЭДС двигателя электровоза соответственно) на участке с учётом

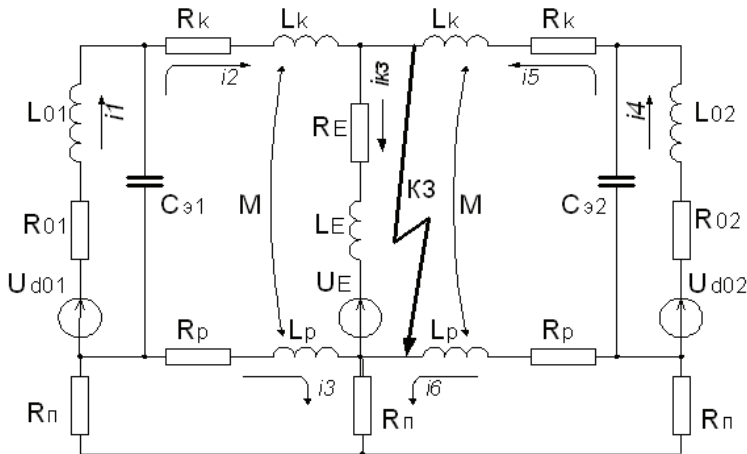


Рис. 1. Графическая модель для исследования нормальных и аварийных режимов работы тяговой сети

Fig. 1. A graphical model for the study of normal and emergency modes of operation of the traction network

емкостного фильтра ( $C_3$ ) тяговой подстанции осуществлено для анализа переходных процессов и определения параметров выше перечисленных признаков КЗ для двустороннего питания места КЗ за ЭПС [15].

В модели параметры ТП представлены как сосредоточенные, с напряжением холостого хода

$$U_{d0} = 2,34U_{v0} (1 \pm p_c / 100) - \Delta U_B, \quad (2)$$

внутренней индуктивностью

$$L_0 = 0,5 (L_T + L_C), \quad (3)$$

активным сопротивлением

$$R_0 = 0,955 (X_C + \frac{X_T}{N}) + 2 (R_C + \frac{R_T}{N}), \quad (4)$$

где  $U_{v0}$  — величина напряжения вторичной обмотки трансформатора тяговой подстанции;  $p_c$  — величина изменения напряжения тяговой сети, %;  $\Delta U_B$  — изменение величины напряжения на выпрямительных вентилях, В;  $L_T$  — величина собственной индуктивности питающего трансформатора, Гн;  $L_C$  — величина собственной индуктивности тяговой сети, Гн;  $X_C$  и  $R_C$  — величины емкостного сопротивления и активного сопротивления тяговой сети соответственно;  $R_T$  и  $X_T$  — величины омического и реактивного сопротивлений тягового трансформатора;  $N$  — количество трансформаторов, работающих параллельно-попарно. Параметры питающей тяговой сети [16]  $X_C$  и  $R_C$  с величиной напряжения  $U_{1,l}$  требуется преобразовать к величине напряжения вторичной обмотки трансформатора тяговой подстанции  $U_{v0}$

$$X'_C = X_C \frac{3 U_{v0}^2}{U_{1,l}^2}. \quad (5)$$

В математической модели ТС замещена активным сопротивлением  $R_k$ , индуктивностью  $L_k$  и емкостью  $C_k$ , Ф/

км, которую для двухпутного участка можно определить по формуле

$$C'_K = \frac{10^{-6}}{36 \ln(\frac{d}{\sqrt{h_{KT} R_{\Sigma}}})}, \quad (6)$$

где  $h_{KT}$  — конструктивный параметр контактной сети (контактный провод — несущий трос, м);  $R_{\Sigma}$  — общий радиус контактного провода и несущего провода, соответственно, равный  $R_{\Sigma} = \sqrt{R_K R_T}$ ;  $d$  — величина пролета между проводниками подвески, м.

Полное сопротивление КС равно

$$Z = r_a + j\omega(L + 0,5\mu)10^{-4}, \quad (7)$$

где  $r_a$  — величина омического сопротивления проводов, Ом/км;  $\omega = 2\pi f$  — величина круговой частоты;  $\mu$  — величина магнитной проницаемости для медных проводов ( $\mu = 1$ );  $L$  — величина коэффициента самоиндукции проводников, Гн/м. В расчете принят

$$L = (1 + 2 \ln \frac{2}{1,78 R \sqrt{4\pi\sigma\omega}}) 10^{-4}, \quad (8)$$

где  $\sigma$  — величина проводимости грунта, См/м;  $R$  — радиус провода, м,  $R = p/2\pi$ ,  $p$  — периметр рельса, м.

Коэффициент взаимной индукции контактной сети и рельсов [17], учитывающий взаимное влияние путей

$$M = (1 + 2 \ln \frac{2}{1,78 a \ln \sqrt{4\pi\sigma\omega}}) 10^{-4}, \quad (9)$$

где  $a$  — конструктивный параметр контактной сети и рельсов, м.

Омическое сопротивление рельсов двух путей равно

$$R_{pa} = \frac{r_{pa}}{4}, \quad (10)$$

где  $r_{pa}$  — омическое сопротивление рельса.

$$r_{pa} = \frac{0,28}{p} \sqrt{\mu \rho f}, \quad (11)$$

где  $p$  – периметр рельса, м;  $\mu$  – величина магнитной проницаемости ходового стального рельса;  $\rho$  – величина удельного омического сопротивления ходового стального рельса Ом·мм<sup>2</sup>/м;  $f$  – величина токовой частоты, Гц. Активное сопротивление контактной сети приведено в [18].

На переходные процессы оказывает влияние влажность и структура грунта, влажность шпал и другие параметры. Рекомендуемые величины переходного сопротивления  $R_n$  приведены в [19]. Для двухпутного участка они изменяются в пределах 0,1–0,075 Ом/км [15]. Система дифференциальных уравнений по методу контурных токов и законам Кирхгофа составлена для схемы, представленной на рис. 1:

$$\left\{ \begin{array}{l} U_{d0} = i_1 R_0 + L_0 \frac{di_1}{dt} + \frac{1}{C_s} \int_0^t (i_1(t) - i_2(t)) dt; \\ -U_E = R_E (i_2 + i_{K3}) + L_E \frac{d(i_2 + i_{K3})}{dt} + R_k i_2 + (L_k + M) \frac{di_2}{dt} + \frac{1}{C_s} \int_0^t (i_2(t) - i_1(t)) dt + \\ + R_p (i_2 - i_3) + (L_p + M) \frac{d(i_2 - i_3)}{dt}; \\ 0 = i_3 R_n + (i_3 - i_2) R_p + (L_p + M) \frac{d(i_3 - i_2)}{dt} + R_n (i_3 + i_6); \\ U_{d0} = i_4 R_0 + L_0 \frac{di_4}{dt} + \frac{1}{C_s} \int_0^t (i_4(t) - i_5(t)) dt; \\ -U_E = R_E (i_{K3} + i_2) + L_E \frac{d(i_{K3} + i_2)}{dt}; \\ 0 = R_k i_5 + (L_k + M) \frac{di_5}{dt} + R_p (i_5 - i_6) + (L_p + M) \frac{d(i_5 - i_6)}{dt} + \frac{1}{C_s} \int_0^t (i_5(t) - i_4(t)) dt; \\ 0 = i_6 R_n + (i_6 - i_5) R_p + (L_p + M) \frac{d(i_6 - i_5)}{dt} + R_n (i_6 + i_3). \end{array} \right. \quad (4.7)$$

Математическое описание выбранных схем замещения, составленное согласно законам Кирхгофа, представлено системой дифференциальных уравнений второго порядка, описывающей переходные процессы в ТС [20, 21].

Исследование переходных процессов при КЗ выполнено в среде Simulink программного обеспечения MATLAB (рис. 2) для расчётной схемы, представленной на рис. 1, в режиме короткого замыкания на рельсы за поездом и перед поездом на расстоянии от тяговых подстанций 5, 10 и 15 км. Расчеты выполнены при  $\sigma = 5000$  Ом/м,  $f = 20$  Гц.

В табл. 1 приведены параметры элементов цепи для ввода в имитационную модель.

На рис. 3 приведены параметры изменения тока переходного процесса, полученные в результате моделирования режима КЗ на расстоянии до ТП 1, равном 2 км (кривая  $I_1$ ), а до ТП 2 – 18 км (кривая  $I_2$ ), ток поезда массой 4800 т, электровоз ВЛ10К (кривая  $I_n$ ) и осциллограмма, записанная цифровым терминалом ( $I_{occ}$ ).



В результате исследования на модели получены графики величин  $di/dt$  и  $\Delta I$ , при этом амплитуда (скачок) тока достигала 570–600 А/мс, что совпадает с результатами на осциллограммах цифровых терминалов. Величина скорости приращения тока – 580 А/мс за период времени 28 мс. Время отключения аварийного выключателя составило 25 мс. Эти значения можно использовать на практике при выборе уставок цифровых токовых защит.

При реальной эксплуатации на железной дороге при организации КЗ в тяговой сети были получены характеристики с цифрового терминала защиты (табл. 2) для анализа параметров переходного процесса, изменяющиеся с частотой в пределах 20–150 Гц по осциллограммам, аналогичным тем, что представлены на рис. 5, их можно использовать при настройке максимальной импульсной защиты (МИЗ).

На рис. 4 построены графические зависимости по данным табл. 2.

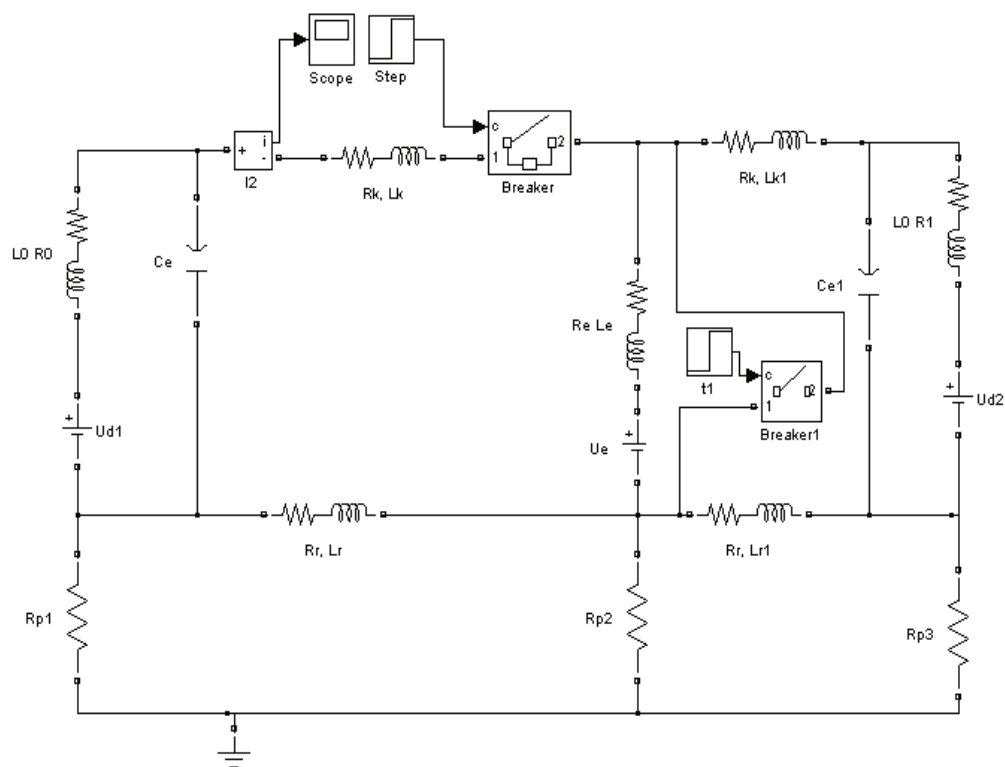


Рис. 2. Имитационная модель тяговой сети при коротком замыкании в MatLab

Fig. 2. Simulation model of traction network in case of short circuit in MatLab

Таблица 1. Параметры элементов цепи для ввода в имитационную модель

Table 1. Parameters of circuit elements to be entered into the simulation model

Тип подвески	Количество путей	$L$ , мГн/км	$M$ , мГн/км	$L_{рз}$ , мГн/км	$R_{ра}$ , Ом/км	$R_{П1}$ , Ом/км	$U_{в0}$ , кВ	$U_{d0}$ , кВ	$C_{К1}$ , Ф/км
М120+2МФ100	2	1,0553	0,5	0,593	0,016	0,5	1,225	3,3	114



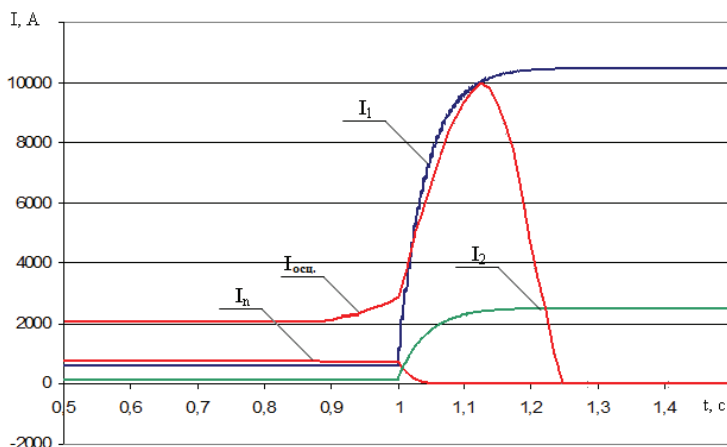


Рис. 3. Результаты изменения тока  $I$  и приращения  $\Delta I$ , полученные в процессе моделирования режима КЗ электровоза

Fig. 3. Simulation results of current change  $I$  and increment  $\Delta I$  obtained as a result of mode simulation modeling the short-circuit mode of an electric locomotive

Таблица 2

**Характеристики КЗ в тяговой сети с цифрового терминала защиты**

**Characteristics of the short circuit in the traction network from the digital protection terminal**

$L$ , км	$di/dt$ , А/мс	$\Delta I/\Delta t$ , А/мс	$F$ , Гц	Амплитуда, кА
0,5	2487,1	487,6	150	6
2	586,5	287,4	145	4
5	234,4	246,8	150	3
10	125,8	211,4	150	2
20	74,5	110,3	140	0,5

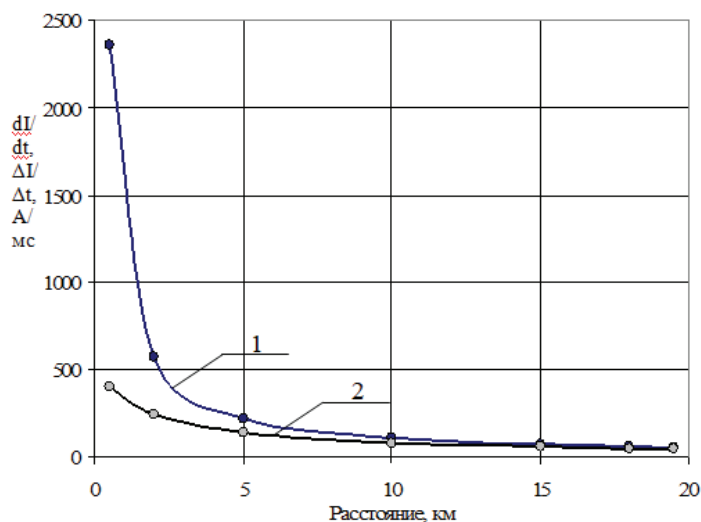


Рис. 4. Параметры  $di/dt$  (кривая 1) и приращения тока  $\Delta I/\Delta t$  (кривая 2), при КЗ

Fig. 4. Parameters  $di/dt$  (curve 1) and current increments  $\Delta I/\Delta t$  (curve 2), at short circuit.

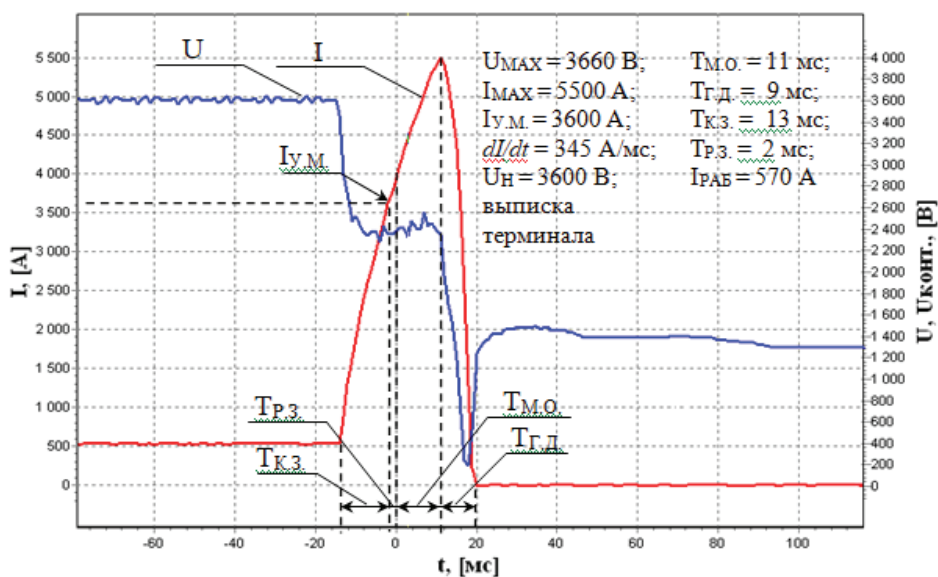


Рис. 5. Осциллограмма фиксации переходного процесса тяговой сети цифровым терминалом фидера:  $T_{м.о.}$  — время момента отключения фидера,  $T_{г.д.}$  — время отключения дуги,  $T_{к.з.}$  — время протекания тока короткого замыкания до уставки,  $I_{р.а.б.} = 570$  А — номинальный,  $T_{р.з.}$  — время срабатывания защиты,  $I_{у.м.}$  — максимальный ток уставки

Fig. 5. Oscillogram of fixation of the transient process of the traction network by the digital terminal of the feeder:  $T_{m.o.}$  — the time of the moment of disconnection of the feeder,  $T_{г.д.}$  — the time of disconnection of the arc,  $T_{к.з.}$  — the time of the short-circuit current to the setpoint,  $I_{р.а.б.} = 570$  A — nominal,  $T_{р.з.}$  — protection response time,  $I_{у.м.}$  — maximum setting current

На рис. 5 представлена осциллограмма переходного процесса при коротком замыкании в тяговой сети с цифрового терминала.

Полученные результаты имитационного моделирования сопоставимы с осциллограммами цифровых терминалов, таким образом, можно говорить об адекватности имитационной модели.

### 3. Заключение

В работе предложена имитационная модель тяговой сети горнодобывающих предприятий для исследования переходных режимов работы тяговой сети. Выполнена верификация модели по изменению во времени амплитуды фидерных токов тяговых подстанций. С использованием предложенной модели возможно исследование режимов работы

тяговой сети в случае пуска поезда, короткого замыкания и перехода через секционный изолятор тяговой сети. Это позволяет корректировать уставки токово-импульсных защит при изменении параметров тяговой сети, режимов движения, вынужденных и аварийных режимов работы тяговой сети, чтобы улучшить надежность электроснабжения тяговой сети горнодобывающих предприятий. Результаты вычислений на модели согласуются с реальными данными. Определение точного значения уставок должно осуществляться предварительным аналитическим расчетом, уточнением с помощью математического моделирования, при этом необходимо построить семейство защитных характеристик выключателя или реле РДШ-II с учетом параметров тяговой сети.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Bo-Chih Peng, Nanming Chen*. Energy Saving Strategies in Mass Rapid Transit Systems / 2014 International Conference on Connected Vehicles and Expo (ICCVE). 2014. pp. 272–277. DOI: 10.1109/ICCVE.2014.27.

2. *Khalikov I. H., Kukartsev V. A., Kukartsev V. V., Tynchenk, V. S., Tynchenko Y. A., Qi, M.* Review of Methods for Improving the Energy Efficiency of Electrified Ground Transport by Optimizing Battery Consumption. *Energies* 2023, 16, 729. doi: 10.3390/en16020729

3. *Kondratiev V. V., Klyuev R. V., Karlina A. I.* Improvement of Hybrid Electrode Material Synthesis for Energy Accumulators Based on Carbon Nanotubes and Porous Structures. *Micromachines* 2023, 14, 1288. DOI: 10.3390/mi14071288.

4. *Yuriy Konovalov, Anton Vaygachev and Maksim Velichko*. Electric drive development trends at informatization of the company // *Modern Technologies and Scientific and Technological Progress*, 2020, Vol. 2020, № 1, P. 201. DOI: 10.36629/2686-9896-2020-1-201–202.

5. *Sorokova S. N., Efremenkov E. A., Qi M.* Mathematical Modeling of the State of the Battery of Cargo Electric Vehicles. *Mathematics*. 2023, 11, 536. <https://doi.org/10.3390/math11030536>.

6. *Vasilii Zakaryukin, Andrey Kryukov, Aleksandr Cherepanov*. Intelligent Traction Power Supply System // *International Scientific Conference Energy Management of Municipal Transportation Facilities and Transport EMMFT 2017, Advances in Intelligent Systems and Computing*. 692, pp. 91–99, DOI: 0.1007/978–3–319–70987–1\_10.

7. *Демиденко И. С.* Повышение эффективности защиты тяговой сети постоянного тока: автореферат дис. ... канд. тех. наук: 05.09.03 / Новосибир. гос. техн. ун-т. — Новосибирск, 2013. — 19 с.

8. *Zagorodnii N. A., Efremenkov E. A., Qi M.* Mathematical Analysis of the Reliability of Modern Trolleybuses and Electric Buses. *Mathematics* 2023, 11, 3260. DOI: 0.3390/math11153260.

9. *Shang Jing & Zhang Jie & Zhang Zhixue*. Optimizational Mathematical Modeling Methods of DC Traction Power Supply System for Urban Mass Transit. *Mathematical Problems in Engineering*. 2018. 1–9. DOI: 10.1155/2018/3084184.

10. *Дробов А. В., Галушко В. Н.* Оценка применения релейной защиты и автоматики тяговых подстанций метрополитена на основе системы мониторинга SMTN-3. Изд-во Агротехника и энергообеспечение. г. Гомель, Беларуссия. — 2020. — № 1 (26). С. 30–32.

11. *Аржанников Б. А., Бадер М. П., Бурков А. Т., Котельников А. В., Набойченко И. О.* Совершенствование основных требований к системе и устройствам тягового электроснабжения постоянного тока // *Электротехника*. 2016. — №9. С. 51 — 57.

12. *Shchurov N. I., Dedov S. I., Malozyomov B. V., Shtang A. A., Martyushev N. V., Klyuev R. V., Andriashin S. N.* Degradation of Lithium-Ion Batteries in an Electric Transport Complex. *Energies*. 2021, 14, 8072. <https://doi.org/10.3390/en14238072>.

13. *Malozyomov B. V., Martyushev N. V., Sorokova S. N., Efremenkov E. A.* Mathematical Modeling of Mechanical Forces and Power Balance in Electromechanical Energy Converter. *Mathematics*. 2023, 11, 2394. DOI: 10.3390/math11102394.

14. *Щуров Н. И., Мятаж С. В., Штанг А. А.* Определение реактивной мощности в сети тяговых подстанций шахтных электровозов // *Горный информационно-аналитический бюллетень*. — 2022. — № 12–2. — С. 284–300. DOI: 10.25018/0236\_1493\_2022\_122\_0\_284.

15. *Shchurov N. I., Myatezh S. V., Malozyomov B. V., Shtang A. A., Martyushev N. V., Klyuev R. V., Dedov S. I.* Determination of Inactive Powers in a Single-Phase AC Network. *Energies*. 2021, 14, 4814. DOI: 10.3390/en14164814.


16. Щуров Н. И., Мятёж С. В., Малозёмов Б. В. Анализ и расчет неактивной мощности в сети питания электропотребителей рудничного транспорта // Горный информационно-аналитический бюллетень. — 2022. — № 12–2. — С. 270–283. DOI: 10.25018/0236\_1493\_2022\_122\_0\_270.

17. Kukartsev V. A., Kukartsev V. V., Tynchenko S. V., Klyuev R. V., Zagorodnii N. A., Tynchenko Y. A. Study of Supercapacitors Built in the Start-Up System of the Main Diesel Locomotive. *Energies*. 2023, 16, 3909. DOI: 10.3390/en16093909.

18. Kuznetsov S. M., Latyshev R. N., Abramov E. Yu. and Borzenkov A. N. An Investigation of the Traction-Network Parameters of an Electric Locomotive with a Short Circuit // *Russian Electrical Engineering*, 2023, Volume 94, Number 5, Page 345. DOI: 10.3103/S1068371223050097.

19. Yuriy Kononov, Vladislav Baranov and Roman Istratov. Modernization of electric drive in electricity // *Modern Technologies and Scientific and Technological Progress*, 2020, Vol. 2020, № 1, P. 199. DOI: 10.36629/2686-9896-2020-1-199–200.

20. Buyakova N., Zakaryukin V., Kryukov A., Nguyen T., Voropai N., Senderov S., Michalevich A. and Guliev H. Electromagnetic safety enhancing in railway electric supply systems // *E3S Web of Conferences*, 2018, Vol. 58, P. 03003. DOI: 10.1051/e3sconf/20185803003.

21. Martyushev N. V., Malozyomov B. V., Sorokova S. N., Efremenkov E. A., Valuev D. V., Qi M. Review Models and Methods for Determining and Predicting the Reliability of Technical Systems and Transport. *Mathematics*. 2023, 11, 3317. DOI: 10.3390/math11153317. 

## REFERENCES

1. Bo-Chih Peng, Nanming Chen. Energy Saving Strategies in Mass Rapid Transit Systems. 2014 International Conference on Connected Vehicles and Expo (ICCVE). 2014. pp. 272–277. DOI: 10.1109/ICCVE.2014.27.

2. Khalikov I. H., Kukartsev V. A., Kukartsev V. V., Tynchenko V. S., Tynchenko Y. A., Qi, M. Review of Methods for Improving the Energy Efficiency of Electrified Ground Transport by Optimizing Battery Consumption. *Energies* 2023, 16, 729. doi: 10.3390/en16020729

3. Kondratiev V. V., Klyuev R. V., Karlina A. I. Improvement of Hybrid Electrode Material Synthesis for Energy Accumulators Based on Carbon Nanotubes and Porous Structures. *Micromachines* 2023, 14, 1288. DOI: 10.3390/mi14071288.

4. Yuriy Kononov, Anton Vaygachev and Maksim Velichko. Electric drive development trends at informatization of the company. *Modern Technologies and Scientific and Technological Progress*, 2020, Vol. 2020, no. 1, pp. 201. DOI: 10.36629/2686-9896-2020-1-201–202.

5. Sorokova S. N., Efremenkov E. A., Qi M. Mathematical Modeling of the State of the Battery of Cargo Electric Vehicles. *Mathematics*. 2023, 11, 536. <https://doi.org/10.3390/math11030536>.

6. Vasilii Zakaryukin, Andrey Kryukov, Aleksandr Cherepanov. Intelligent Traction Power Supply System. International Scientific Conference Energy Management of Municipal Transportation Facilities and Transport EMMFT 2017, Advances in Intelligent Systems and Computing. 692, pp. 91–99, DOI: 0.1007/978-3-319-70987-1\_10.

7. Demidenko I. S. Improving the efficiency of protection of the DC traction network: Abstract of the thesis. ... Candidate of Technical Sciences: 05.09.03. Novosib. state tech. university. Novosibirsk, 2013. 19 p. [In Russ].

8. Zagorodnii N. A., Efremenkov E. A., Qi M. Mathematical Analysis of the Reliability of Modern Trolleybuses and Electric Buses. *Mathematics* 2023, 11, 3260. DOI: 0.3390/math11153260.

9. Shang Jing & Zhang Jie & Zhang Zhixue. Optimizational Mathematical Modeling Methods of DC Traction Power Supply System for Urban Mass Transit. *Mathematical Problems in Engineering*. 2018. 1–9. DOI: 10.1155/2018/3084184.

10. Drobov A. V., Galushko V. N. Evaluation of the use of relay protection and automation of subway traction substations based on the SMTN-3 monitoring system. Publishing house Agro-technics and energy supply. Gomel, Belarus. 2020. no. 1 (26). pp. 30–32. [In Russ].

11. Arzhannikov B. A., Bader M. P., Burkov A. T., Kotelnikov A. V., Naboychenko I. O. Improving the basic requirements for the system and devices of direct current traction power supply. *Electrical Engineering*. 2016. no. 9. P.51–57. [In Russ].

12. Shchurov N. I., Dedov S. I., Malozyomov B. V., Shtang A. A., Martyushev N. V., Klyuev R. V., Andriashin S. N. Degradation of Lithium-Ion Batteries in an Electric Transport Complex. *Energies*. 2021, 14, 8072. <https://doi.org/10.3390/en14238072>.

13. Malozyomov B. V., Martyushev N. V., Sorokova S. N., Efremenkov E. A. Mathematical Modeling of Mechanical Forces and Power Balance in Electromechanical Energy Converter. *Mathematics*. 2023, 11, 2394. DOI: 10.3390/math11102394.

14. Shchurov N. I., Myatezh S. V., Shtang A. A. Determination of reactive power in the network of traction substations of mine electric locomotives. *MIAB. Mining Inf. Anal. Bull.* 2022. no. 12–2. pp. 284–300. [In Russ]. DOI: 10.25018/0236\_1493\_2022\_122\_0\_284.

15. Shchurov N. I., Myatezh S. V., Malozyomov B. V., Shtang A. A., Martyushev N. V., Klyuev R. V., Dedov S. I. Determination of Inactive Powers in a Single-Phase AC Network. *Energies*. 2021, 14, 4814. DOI: 10.3390/en14164814.

16. Shchurov N. I., Myatezh S. V., Malozemov B. V. Analysis and calculation of inactive power in the power supply network of electric consumers of mining transport. *MIAB. Mining Inf. Anal. Bull.* 2022. no. 12–2. pp. 270–283. [In Russ]. DOI: 10.25018/0236\_1493\_2022\_122\_0\_270.

17. Kukartsev V. A., Kukartsev V. V., Tynchenko S. V., Klyuev R. V., Zagorodnii N. A., Tynchenko Y. A. Study of Supercapacitors Built in the Start-Up System of the Main Diesel Locomotive. *Energies*. 2023, 16, 3909. DOI: 10.3390/en16093909.

18. Kuznetsov S. M., Latyshev R. N., Abramov E. Yu. and Borzenkov A. N. An Investigation of the Traction-Network Parameters of an Electric Locomotive with a Short Circuit. *Russian Electrical Engineering*, 2023, Volume 94, Number 5, Page 345. DOI: 10.3103/S1068371223050097.

19. Yuriy Konovalov, Vladislav Baranov and Roman Istratov. Modernization of electric drive in electricity. *Modern Technologies and Scientific and Technological Progress*, 2020, Vol. 2020, no. 1, pp. 199. DOI: 10.36629/2686-9896-2020-1-199–200.

20. Buyakova N., Zakaryukin V., Kryukov A., Nguyen T., Voropai N., Senderov S., Michalevich A. and Guliev H. Electromagnetic safety enhancing in railway electric supply systems. *E3S Web of Conferences*, 2018, Vol. 58, pp. 03003. DOI: 10.1051/e3sconf/20185803003.

21. Martyushev N. V., Malozyomov B. V., Sorokova S. N., Efremenkov E. A., Valuev D. V., Qi M. Review Models and Methods for Determining and Predicting the Reliability of Technical Systems and Transport. *Mathematics*. 2023, 11, 3317. DOI: 10.3390/math11153317.

## ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Кузнецов Сергей Михайлович<sup>1</sup> — канд. техн. наук, доцент, e-mail: kuznecov@corp.nstu.ru, Scopus AuthorID: 56903646200, РИНЦ AuthorId: 176808, профессор кафедры «Электротехнических комплексов»;

Сингизин Игорь Иванович<sup>1</sup> — ассистент, e-mail: singizin@corp.nstu.ru, ORCID: 0000-0003-1135-4309;

*Борзенков Алексей Николаевич*<sup>1</sup> – младший научный сотрудник , e-mail: a\_h.79@mail.ru;

*Рожкова Марина Викторовна*<sup>1</sup> – старший преподаватель, e-mail: rozhkova@corp.nstu.ru, Scopus AuthorID: 57190135419, ResearcherID: HNM-9697-2022, РИНЦ AuthorId: 421705, ORCID: 0000-0001-5039-2039;

*Сергей Николаевич Андрияшин*<sup>1</sup> – ассистент, e-mail: andriyashin.2014@corp.nstu.ru, ORCID ID: 0000-0003-1575-8933;

<sup>1</sup> Новосибирский государственный технический университет, пр. К. Маркса, 20, г. Новосибирск, 630073, Россия.

## INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

*Kuznetsov S. M.*<sup>1</sup>, Cand. Sci. (Eng.), Associate Professor, e-mail: kuzneczov@corp.nstu.ru; Scopus Author ID: 56903646200; RSCI Authorid: 176808;

*Singizin I. I.*<sup>1</sup>, assistant, e-mail: singizin@corp.nstu.ru, ORCID: 0000-0003-1135-4309;

*Borzenkov A. N.*<sup>1</sup>, Junior Researcher, e-mail: a\_h.79@mail.ru;

*Andriyashin S. N.*<sup>1</sup>, assistant, e-mail: andriyashin.2014@corp.nstu.ru, ORCID ID: 0000-0003-1575-8933;

*Rozhkova M. V.*<sup>1</sup>, senior lecturer, e-mail: rozhkova@corp.nstu.ru, Scopus AuthorID: 57190135419, ResearcherID: HNM-9697-2022, RSCI AuthorId: 421705, ORCID: 0000-0001-5039-2039;

*Andriyashin S. N.*<sup>1</sup>, assistant, e-mail: andriyashin.2014@corp.nstu.ru, ORCID ID: 0000-0003-1575-8933;

<sup>1</sup> Novosibirsk State Technical University, 630073, Novosibirsk, Russia.

**Corresponding author:** *Kuznetsov S. M.*, e-mail: kuzneczov@corp.nstu.ru.

Получена редакцией 18.04.2023; получена после рецензии 03.06.2023; принята к печати 10.10.2023.

Received by the editors 18.04.2023; received after the review 03.06.2023; accepted for printing 10.10.2023.

