

# СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ ЗАЩИТЫ ТЯГОВОЙ СЕТИ ГОРНОДОБЫВАЮЩИХ ПРЕДПРИЯТИЙ

С. М. Кузнецов<sup>1</sup>, П. С. Лисицын<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Новосибирский государственный технический университет, Новосибирск, Россия

**Аннотация:** Проведен анализ существующей сети тягового электроснабжения разрезов и подъездных путей горнодобывающих предприятий, особенности ее функционирования в разрезах и вывodkaх на магистральные железные дороги, идентификация ее с тяговой сетью магистрального железнодорожного транспорта, рассмотрены возможности использования инновационных методов защиты и методик их настройки в целях повышения надежности функционирования, уровня автоматизации системы управления фидерами тяговой сети (ФКС) разрезов и подъездных путей горнодобывающих предприятий. Проанализировано оборудование ФКС горнодобывающих предприятий, показана эффективность использования нового коммутирующего оборудования и новых принципов защиты и автоматики. Изложены основы функционирования классической аналоговой защиты и усовершенствованная методика ее настройки. Показаны целесообразность использования цифровых терминалов совместно с аналоговой защитой и пути дальнейшего совершенствования защит. Анализ состояния и функционирования тяговых сетей и тяговых подстанций горнодобывающих предприятий, например, угольных и рудных разрезов в Кузбассе показал, что при практически полной идентичности функций технический уровень и уровень их эксплуатации отстает от уровня магистральных железных дорог, с которыми они стыкуются и часто объединены единым технологическим процессом перевозки продукции. Задача настоящей статьи – изложить инновационный опыт железных дорог и рекомендовать пути модернизации наиболее ответственных элементов системы электроснабжения электрической тяги горнодобывающих предприятий.

**Ключевые слова:** электроснабжение, горнодобывающие предприятия, тяговая сеть, ток короткого замыкания, подстанция, защиты, методика, уставки.

**Для цитирования:** Кузнецов С. М., Лисицын П. С. Совершенствование защиты тяговой сети горнодобывающих предприятий // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2022. – № 12-2. – С. 157–173. DOI: 10.25018/0236\_1493\_2022\_122\_0\_157.

## Improving the protection of the traction network of mining enterprises

S. M. Kuznetsov<sup>1</sup>, P. S. Lisitsyn<sup>1</sup>

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

**Abstract:** The analysis of the existing network of traction power supply of cuts and access roads of mining enterprises, the features of its functioning in cuts and leads to main railways, its identification with the traction network of main railway transport, the possibilities of using innovative protection methods and methods of their adjustment in order to improve reliability functioning, level of automation of the control system for feeders of the traction network (FCS) of mines and access roads of mining enterprises. The FCS equipment of mining enterprises

is analyzed, the effectiveness of the use of new switching equipment and new principles of protection and automation is shown. The basics of the functioning of classical analog protection and an improved method for its adjustment are outlined. The expediency of using digital terminals together with analog protection and ways of further improvement of protection are shown. An analysis of the state and functioning of traction networks and traction substations of mining enterprises, for example, coal and ore mines in Kuzbass, showed that, with almost complete identity of functions, their technical level and level of operation lags behind the level of the main railways with which they are joined and in practice, they are often combined by a single technological process for the transportation of products. The purpose of this article is to present the innovative experience of railways and recommend ways to modernize the most critical elements of the electric traction power supply system of mining enterprises.

**Key words:** power supply, traction network, short-circuit current, substation, protection, methodology, settings.

**For citation:** Kuznetsov S. M., Lisitsyn P. S. Improving the protection of the traction network of mining enterprises. *MIAB. Mining Inf. Anal. Bull.* 2022;(12-2):157–173. [In Russ]. DOI: 10.25018/0236\_1493\_2022\_122\_0\_157.

## 1. Введение

Кузнецкий угольный бассейн (Кузбасс) является одним из самых крупных угольных месторождений мира, он расположен в Западной Сибири, на территории Кемеровской области. В бассейне расположено 58 шахт и 36 угольных разрезов. Крупнейшей компанией Кузбасса, специализирующейся на добыче угля открытым способом, является ОАО «УК «Кузбассразрезуголь». В ее состав входят 6 угольных разрезов — «Кедровский», «Моховский», «Бачатский», «Краснобродский», «Талдинский», «Калтанский». Балансовые запасы УК составляют более 2 млрд тонн угля. Ежегодно предприятия Компании добывают свыше 45 млн тонн топлива, при этом около 50% добываемого угля реализуется на экспорт.

На горнодобывающих предприятиях (ГДП) Кузбасса — разрезах, карьерах, выводных железнодорожных путях от обогатительных фабрик к магистральным железным дорогам для электровозной тяги (ЭТ) — применяют постоянный ток напряжением 600,825 и 1650 В [1,2].

При больших расстояниях от карьера (разреза) до отвалов применяют

напряжение 1650 В, а там, где пути ГДП примыкают к железнодорожным путям РАО РЖД, для отправки продукции применяют напряжение 3300 В. [2]. На электрифицированном транспорте отдельных карьеров (разрезов), копей используют напряжение 1200 В. В качестве электроподвижного состава используют промышленные электровазы, например, серии НПМ2, тяговые агрегаты НПМ1, НПМ2 [3,4]. В России это более 900 локомотивов, 5000 думпкаров, которые, в частности, только на угольных разрезах перевозят 21% породы и 6% угля.

Таким образом, по напряжению тяговой сети и электроподвижному составу электротранспорт горнодобывающих предприятий идентичен городскому и железнодорожному транспорту. Преобразовательные подстанции ГДП, расположенные на поверхности, используют общепромышленное оборудование со стороны переменного тока, по технологическим соображениям и экономике их целесообразно проектировать совмещенными с распределительными подстанциями (далее СТП) горнодобывающих предприятий, на которых мощные потребители рабо-

тают на уровне среднего напряжения, а вблизи подстанции — на напряжении до 1000 В [3,4]. В большинстве случаев это среднее напряжение сетей переменного тока 35 и 10(6) кВ. Преобразование электроэнергии на тяговых подстанциях осуществляют кремниевыми выпрямителями, понижая напряжение сети с помощью масляных трансформаторов до уровня, необходимого для выпрямленного тока, указанного выше. Выпрямители в большинстве устаревших типов, за исключением установленных после 2000 г. Коммутацию на стороне переменного тока выполняют масляными выключателями, реже вакуумными первыми выпусками, а фидеров тяговой сети — быстродействующими выключателями (БВ) постоянного тока серии ВАБ или АБ-2/4, в настоящее время устаревшими.

Контактные провода применяются профилированных медных марок ТФ и устаревших сталеалюминевых марок ПКСА.

Из анализа следует, что на электрическом транспорте ГДП электротехническое оборудование тяговых подстанций и защита тяговых сетей устарела, не соответствует уровню промышленной энергетики, городского и железнодорожного транспорта, где в сетях среднего напряжения применяют более надежное оборудование: вакуумные выключатели, изготовленные по новым технологиям, сухие трансформаторы, цифровые терминалы для защиты, управления и диагностики [5].

В тяговых сетях ГДП для защиты от коротких замыканий (КЗ) применяются как выключатели типа АБ-2/4, так и новые серии ВАБ-49 и ВАБ-206 с дифференциальными реле типа РДШ или РПТ-206 вместо дифференциальных шунтов, как на старых сериях ВАБ и АБ-2/4. В результате система электроснабжения и, соответственно,

работа карьерного транспорта ГДП менее эффективна и менее надежна, чем на родственном железнодорожном транспорте, где инновации позволяют повысить требования к надежности системы электроснабжения электро-транспорта (СЭС ЭТ).

Реле тока РПТ-206 с конденсатором емкостью 0,33 мкФ предназначены для работы совместно с выключателями автоматическими быстродействующими серий ВАБ-28, ВАБ-49 и ВАБ-206. Реле тока РПТ-206 с конденсатором емкостью 2 мкФ предназначены для работы совместно с выключателями серии ВАБ-43.

Особенности СЭС ЭТ состоят в следующем:

1) нагрузки фидеров тяговой сети по величине и месту приложения резко переменные, во многих случаях соизмеримы с токами КЗ и близки по величине к токам КЗ в удаленной точке;

2) динамические процессы в ТС связаны с режимами работы: перегруппировки двигателей ЭПС в процессе пуска, отрывы токоприемников связаны с открытой коммутацией больших токов, при этом скачки тока ( $\Delta I$ ) имеют крутой фронт ( $di/dt$ ), т.е. большие значения скорости нарастания тока;

3) конструкция ТС неоднородна по длине фидерных зон и по активным и полным сопротивлениям, в связи с тем, что на фидерной зоне могут быть станции, провода и тросы разного типа и сечения;

4) ходовые рельсы, как обратная цепь тока, представляют собой нелинейный ферромагнитный элемент электрической цепи с переменными параметрами, а проводимость земли изменяется в зависимости от состояния окружающей среды (лето сухое, дождь, зимнее промерзание и другие природные явления);

5) провода контактной сети и оборудование электроподвижного состава

(ЭПС) имеют низкую термическую стойкость, поэтому время отключения места повреждения должно быть минимальным;

6) причины коротких замыканий при повреждении на ЭПС и места их расположения часто трудно установить из-за последующего самоустранения, они не могут быть полностью учтены при функциональном анализе работы защиты тяговой сети в нештатных режимах;

7) в тяговых сетях ГДП как основную используют максимальную токовую импульсную защиту (МИЗ), в которой две функции: первая функция — максимальная токовая защита МТЗ, которая контролирует величину тока и осуществляется с помощью реле постоянного тока прямого включения, вторая функция — защита по приращению тока (ЗПТ), которая контролирует скорость изменения тока  $di/dt$ . МИЗ не удовлетворяет требованиям ПУЭ по надежности, чувствительности и селективности [6, 7]. Необходимо выполнить требования ПУЭ, повысив надежность и селективность защиты тяговой сети ГДП, что позволит повысить надежность системы ЭТ горнодобывающего предприятия [8, 9]. Надежность и селективность защиты тяговой сети ГДП будет определяться через следующие показатели — наработку на отказ и вероятность безотказной работы.

Рассмотрим возможные способы решения поставленной задачи с учетом опыта магистрального железнодорожного транспорта [10].

## 2. Методика исследований

Селективность (избирательность) токовых защит в тяговой сети ГДП может быть повышена совершенствованием защит по изменению тока (МИЗ), под которым понимают любые изменения ее параметров во время переход-

ного процесса: приращения тока  $\Delta I$ , скорости  $di/dt$  и длительности нарастания  $T$  [11, 12].

На ГДП также используют токоимпульсные защиты применением встроенных в механизм АБ-2/4 или ВАБ реле тока прямого действия с дифференциальным шунтом. На практике этот выключатель в разных сериях имеет большой динамический коэффициент  $k_d = 1,2-1,85$ , что приводит к ложным отключениям при проходе через секционные изоляторы и перегруппировке двигателей электровоза. В целях улучшения характеристик срабатывания и повышения селективности МИЗ последовательно с БВ типа ВАБ-28, ВАТ-49, ВАБ-206 устанавливают дифференциальные реле типа РДШ-II, РДШ-3000, РПТ-46, которые имеют динамический коэффициент  $k_d = 0,363-0,341$ , что значительно повышает селективность (рис. 1).

Исследуем работу МИЗ с целью определения условий ее устойчивого функционирования.

Схема замещения БВ с индуктивным шунтом или реле-дифференциальным шунтом (РДШ) и защищаемой цепи приведена на рис. 2.

В реальных тяговых сетях  $L_1 \gg L_p$ ,  $L_1 \gg L_{ш}$ ,  $R_1 \gg R_p$ ,  $R_1 \gg R_{ш}$  (см. рис. 3), поэтому можно допустить, что параметры выключателя  $L_p$ ,  $L_{ш}$ ,  $R_p$ ,  $R_{ш}$  не влияют на величину тока  $i_1$  во внешней цепи  $L_1$ ,  $R_1$ .

Для этих начальных условий составим систему уравнений:

$$\left. \begin{aligned} i_1 &= i_p + i_{ш}; \\ i_p R_p + L_p \frac{di_p}{dt} &= i_{ш} R_{ш} + L_{ш} \frac{di_{ш}}{dt} \end{aligned} \right\}. \quad (1)$$

Параметры выключателя запишем через соотношения:  $\alpha = R_p/R_{ш}$ ,  $\beta = L_p/L_{ш}$ , кроме того, обозначим  $T_{ш} = L_{ш}/R_{ш}$  — постоянная времени шунта,  $T_p = L_p/R_p$

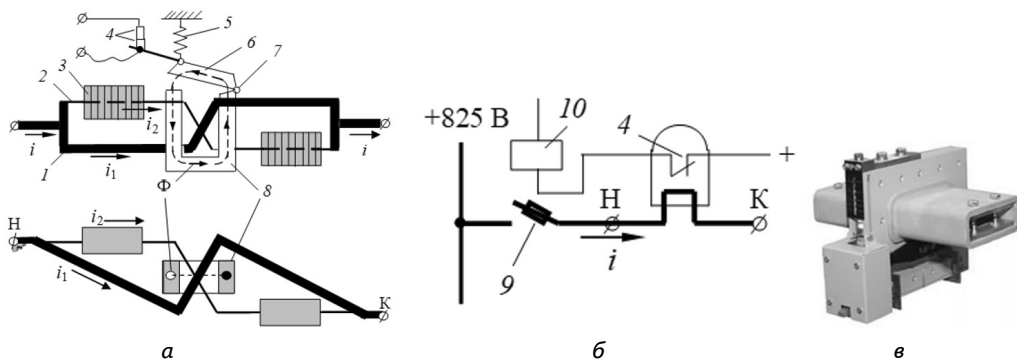


Рис. 1. Устройство реле РДШ (а), схема включения его в цепь фидерного выключателя (б) и конструктивное исполнение реле РРТ-46 (в): 1 — шина главного тока; 2 — шина токового шунта с железом 3; 4 — контакты в цепь отключения; 5 — пружина регулировки уставки; 6 — якорь; 7 — ось вращения якоря; 8 — путь магнитного потока; 9 — контакт цепи управления; 10 — реле отключения БВ

Fig. 1. The device of the RDSH relay (a), the circuit for connecting it to the circuit of the feeder switch (b) and the design of the RPT-46 relay (c): 1 — main current bus; 2 — current shunt bus with iron 3; 4 — contacts in the shutdown circuit; 5 — setpoint adjustment spring; 6 — anchor; 7 — armature rotation axis; 8 — path of the magnetic flux; 9 — contact of the control circuit; 10 — BV shutdown relay

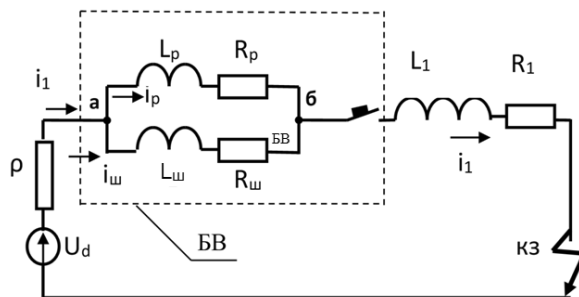


Рис. 2. Схема замещения БВ с индуктивным шунтом или РДШ и защищаемой цепи  
Fig. 2. Equivalent circuit BV with an inductive shunt or RDSH and the protected circuit

$R_p$  — постоянная времени размагничивающего витка,  $T_1 = L_1/R_1$  — постоянная времени защищаемой цепи. Отключение выключателя происходит от тока  $i_p$ , протекающего через отключающую катушку встроенного реле максимального тока (РМТ). Используя операции подстановки и дифференцирования системы уравнений (1), получим

$$i_p R_p + L_p \frac{di_p}{dt} = i_1 R_{ш} - i_p R_{ш} + L_{ш} \frac{di_1}{dt} - L_{ш} \frac{di_p}{dt}, \quad (2)$$

откуда после преобразований и подстановок имеем

$$\frac{di_p}{dt} + i_p \frac{\beta + 1}{(\alpha + 1) T_{ш}} = \frac{di_1}{dt} \frac{1}{(1 + \alpha)} + i_1 \frac{1}{(1 + \alpha) T_{ш}}. \quad (3)$$

Это уравнение определяет закон изменения тока в отключающей катушке реле в функции тока  $i_1$  защищаемой линии. Изменение тока в линии для упрощения анализа запишем наиболее простым выражением

$$i_1 = I_0 + \Delta I (1 - e^{-t/T_1}), \quad (4)$$

где  $I_0$  – начальное значение тока, как правило, это ток нагрузки по фидеру;  $\Delta I$  – приращение тока в линии при КЗ или ином переходном процессе. Подставив (4) в (3) и решая полученную систему относительно  $i_p$ , найдем функцию изменения, а после соответствующих подстановок начальных условий и преобразований получим максимальное значение тока в отключающей ветви выключателя или реле РДШ (см. рис. 1):

$$i_p = \left( I_0 + \Delta I \left( 1 + \frac{T_{ш}(\alpha - \beta)}{(1 + \alpha)T_{ш} - (1 + \beta)T_1} \exp\left(-\frac{t(1 + \beta)}{(1 + \alpha)T_{ш}}\right) - \frac{(1 + \beta)(T_{ш} - T_1)}{(1 + \alpha)T_{ш} - (1 + \beta)T_1} \exp\left(-\frac{t}{T_1}\right) \right) \right) \frac{R_{ш}}{R_p + R_{ш}}. \quad (5)$$

В конце переходного процесса ток  $i_p$  достигнет величины  $i_{p,\max}$ :

$$i_{p,\max} = (I_0 + \Delta I) \frac{R_{ш}}{R_p + R_{ш}} = k_{ст} I_{\max} \quad (6)$$

$$\text{за время } t_{\max} = \frac{AT_{ш}T_1}{BT_1 - AT_{ш}} 2,3 \lg \frac{(B - A)T_1}{(T_{ш} - T_1)A}. \quad (7)$$

Из (4), (5) и (6) следует, что при  $\alpha > \beta$  ток  $i_p$  изменяется пропорционально току  $i_1$  в защищаемой цепи и его максимум определяется выражением (6), где  $k_{ст}$  – статический коэффициент, равный  $k_{ст} = R_{ш} / (R_p + R_{ш})$ , показывающий, какая часть тока защищаемой цепи ответвляется в отключающий виток при плавном его изменении, т.е.  $L_{ш} = L_p = 0$ . Если  $k_{ст} \leq 1$ , то имеем обычную максимальную токовую защиту МТЗ. Если же параметры индуктивного шунта выбрать так, чтобы  $L_p / L_{ш}$  было больше  $R_p / R_{ш}$ , т.е.  $\alpha > \beta$ , то ток  $i_p$  будет изменяться в соответствии с выражением

$$i_{p,\max} = (I_0 + \Delta I k_d) K_{ст}, \quad (8)$$

где  $k_d$  – динамический коэффициент токоимпульсной защиты, равный

$$k_d = 1 + \frac{T_{ш}(\alpha - \beta)}{(1 + \alpha)T_{ш} - (1 + \beta)T_1} \exp\left(-\frac{t(1 + \beta)}{(1 + \alpha)T_{ш}}\right) - \frac{(1 + \beta)(T_{ш} - T_1)}{(1 + \alpha)T_{ш} - (1 + \beta)T_1} \exp\left(-\frac{t}{T_1}\right).$$

Характеристику срабатывания защиты можно построить, полагая, что в момент срабатывания ток соответствует нагрузке в линии  $I_0 = I'_{0cp}$ , т.е. равен статической уставке, а  $\Delta I = \Delta I'_{cp}$  – динамическая составляющая тока срабатывания, т.е. величина скачка тока в цепи, которая при наличии  $I'_{0cp}$  вызывает отключение выключателя. Полагая  $i_{p,\max} = i_{py}$ , получено выражение для характеристики срабатывания МИЗ:

$$i_{py} = \frac{I'_{0cp}}{B} + \frac{\Delta I'_{cp}}{B} \left( 1 - e^{-\frac{Bt_{\max}}{AT_{ш}}} \right) + \frac{\Delta I'_{cp}(T_{ш} - T_1)}{BT_1 - AT_{ш}} \left( e^{-\frac{t_{\max}}{T_1}} - e^{-\frac{Bt_{\max}}{AT_{ш}}} \right), \quad (9)$$

где  $A$  и  $B$  коэффициенты в [8, 9]. При  $T_1 = \text{const}$  выражение (9) можно представить в виде

$$i_{\text{py}} = \frac{I'_{0\text{cp}}}{B} + \Delta I'_{\text{cp}} C, \quad (10)$$

$$\text{где } C = \frac{1}{B} \left( 1 - e^{-\frac{Bt_{\text{max}}}{AT_{\text{ш}}}} \right) + \frac{T_{\text{ш}} - T_1}{BT_1 - AT_{\text{ш}}} \left( e^{-\frac{t_{\text{max}}}{T_1}} - e^{-\frac{Bt_{\text{max}}}{AT_{\text{ш}}}} \right).$$

Уравнение (10) есть уравнение прямой линии в отрезках, причем  $\Delta I'$  следует полагать функцией, а  $I'_{0\text{cp}}$  — аргументом, т.е.  $\Delta I'_{\text{cp}} = f(I'_{0\text{cp}})$  при  $T_1 = \text{const}$ .

При  $I'_{0\text{cp}} = 0$  имеем

$$\Delta I'_{\text{cp}} = \Delta I_{\text{cp}} = \frac{i_{\text{py}}}{C}. \quad (10.1)$$

При  $\Delta I_{\text{cp}} = 0$  получим

$$I'_{0\text{cp}} = I_{0\text{cp}} = i_{\text{py}} B, \quad (10.2)$$

а при  $T_1 = \text{var}$  имеем семейство характеристик

$$I_{\text{cp}} = f(I_0, \Delta I, T_1). \quad (11)$$

Величины  $I_{0\text{cp}}$  и  $\Delta I_{\text{cp}}$  представляют собой соответственно *статическую* и *динамическую* уставки защиты (МТЗ и МИЗ, рис. 3), причем последняя зависит от постоянной времени  $T_1$  скачка тока  $\Delta I$ .

При КЗ у шин подстанции постоянная цепи тока  $T_1$  минимальна, на рис. 3 ей соответствует характеристика  $t_m = 0$ , по мере удаления от подстанции возрастает значение  $T_1$  до  $T_{1\text{кр}}$ , ей соответствует характеристика  $t_m \geq 0,45$  или  $t_m \geq 0,34$ , что имеет место в конце фидерной зоны. В (10) с уменьшением значения  $C$  будет возрастать динамическая уставка, что имеет место вблизи подстанции. Из (10.1) и (10.2) с учетом (10) легко получить *коэффициент*

*динамичности* как отношение динамической уставки выключателя к статической для любого  $T_1$ :

$$\frac{\Delta I_{\text{cp}}}{I_{0\text{cp}}} = \frac{1}{CB} = K_{\text{д}}. \quad (12)$$

Минимальное значение  $K_{\text{д}}$  (его называют также коэффициентом усиления шунта  $k_y$  [10, 11]) соответствует постоянной времени сети  $T_1 = 0$ , когда  $I_{0\text{cp}} = I_0$ . В этом случае имеем для БВ с шунтом

$$K_{\text{д.мин}} = \frac{A}{B} = \frac{(\alpha + 1)}{(\beta + 1)} = \frac{(L_p + L_{\text{ш}})R_{\text{ш}}}{(R_p + R_{\text{ш}})L_{\text{ш}}},$$

где  $L_p, L_{\text{ш}}, R_p, R_{\text{ш}}$  — соответственно индуктивные и активные сопротивления шин размагничивающего витка и шунта БВ, а для реле РДШ

$$K_{\text{д.мин}} = \frac{(4L_2 - L_1)(r_1 - r_2)}{(r_1 + r_2)L_1},$$

где  $L_1, L_2, r_1, r_2$  — соответственно индуктивные и активные сопротивления шин большего и меньшего (с пакетами железа) сечения (см. рис. 1, а).

Исследованиями определены динамические коэффициенты: для АБ-2/4, широко применяемых в тяговых сетях ГДП, он равен 2,5–1,85 с полным шунтом и 1,94–1,35 с шунтом, уменьшенным на 40% при настройке МИЗ, а для реле РДШ разных типов он равен 0,463–0,341, более подробно в [2].

По формуле (11) можно построить семейство характеристик  $I_{\text{cp}} = f(I_0, \Delta I, T_1)$  для БВ с шунтом и реле РДШ (см. рис. 3).

Из рис. 3 и выражения (12) видно, что быстродействующий выключатель с шунтом имеет более высокую динамичность и поэтому ему труднее обеспечить селективность МИЗ. Для повышения надежности функционирования рекомендуется семейство характеристик рассчитывать для каждого типа

БВ или реле РДШ с учетом параметров тяговой сети защищаемого участка.

Это позволит повысить надежность функционирования защиты, уменьшить количество ложных отключений ФКС и, следовательно, повысить надежность электроснабжения тяги ГДП.

По данным Западно-Сибирской железной дороги совершенствование МИЗ и использование специальной методики настройки уставок позволило снизить количество ложных срабатываний на 15...20%.

### 3. Результаты

В настоящее время несколько мировых фирм выпускают цифровые устройства защиты, автоматики и управления (далее «терминал») фидеров контактной сети (ФКС) наземных и подземных видов электрического транспорта [12], которые используют проектные и монтажные фирмы мира в новых проектах и при модернизации ТП более десятков лет. Цифровые устройства защиты и автоматики ЦЗАФ-хх (символ «хх» для краткости означает напряжение ТС) российского производства фирмы «НИИЭФА-Энерго» и SEP COS.NG зарубежных фирм (*Siemens, Secheron*) предназначены для выполнения функций релейной защиты ФКС постоянного тока напряжением 3,3...1,5 кВ, 825 В, 750 В и 600 В, которое характерно для карьерного железнодорожного транспорта, а также функций противоаварийной автоматики, измерения, контроля и сигнализации, местного и дистанционного управления коммутационными аппаратами, включая БВ, которые применимы во всех тяговых сетях ГДП [13].

Принцип действия цифровых терминалов одинаков, отличия лишь в наборе функций, которые могут быть программой изменены по требованию заказчика на стадии технического задания.

Принцип действия цифрового терминала рассмотрим на структурной схеме (рис. 4).

Параметры и функции цифровых терминалов известных фирм приведены в [14]. Устройство состоит из трех блоков: блока управления (БУ), блока защиты автоматики (БЗА), блока развязок (БР).

Типы защит, реализуемые в терминале:

- двунаправленная максимальная токовая защита (МТЗ);
- направленная защита по приращению тока (ЗПТ);
- направленная защита по критической скорости нарастания тока  $di/dt$  (ЗСНТ);
- защита по минимальному напряжению (ЗМН);
- защита по повышенному напряжению (ЗПН);
- направленная дистанционная защита (ДЗ) (защита по минимальному сопротивлению);
- тепловая защита от отжига контактного провода (токовременная защита).

Защиты терминала можно объединить с классической дифференциальной токовой защитой МИЗ на реле РДШ или РМТ-260, а также с испытателем короткого замыкания (ИКЗ), предотвращающим включение БВ на короткое замыкание, таким образом получится комплект защит, отвечающий требованиям ПУЭ.

Выбор типа защит в комплекте и расчет уставок для существующих (аналоговых МТЗ) и цифровых защит (терминалов) определяется на стадии проектирования или модернизации тяговой сети ГДП, при этом для каждого вида защиты терминала определяют группу ее назначения: основную, резервную и дополнительную. Основной считается защита, которая защи-



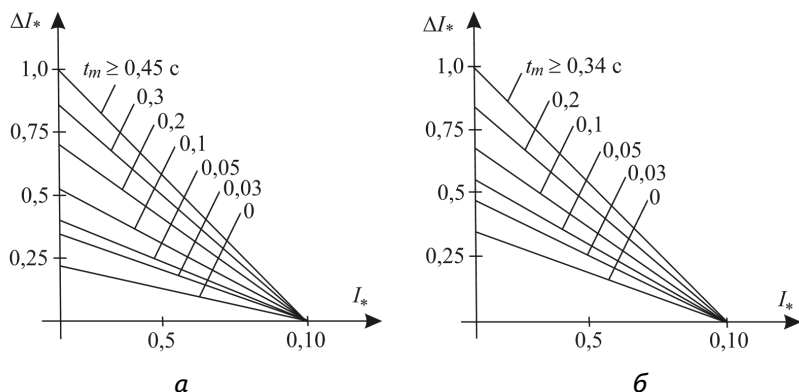


Рис. 3. Семейство характеристик срабатывания выключателя ВАБ-49 (а) и реле РДШ (б). Прямая соответствует КЗ у подстанции,  $t \geq T_{1КР}$   
 Fig. 3. Family of characteristics of circuit breaker VAB-49 (a) and relay RDSH (b). Straight line corresponds to short circuit at the substation,  $t \geq T_{1КР}$

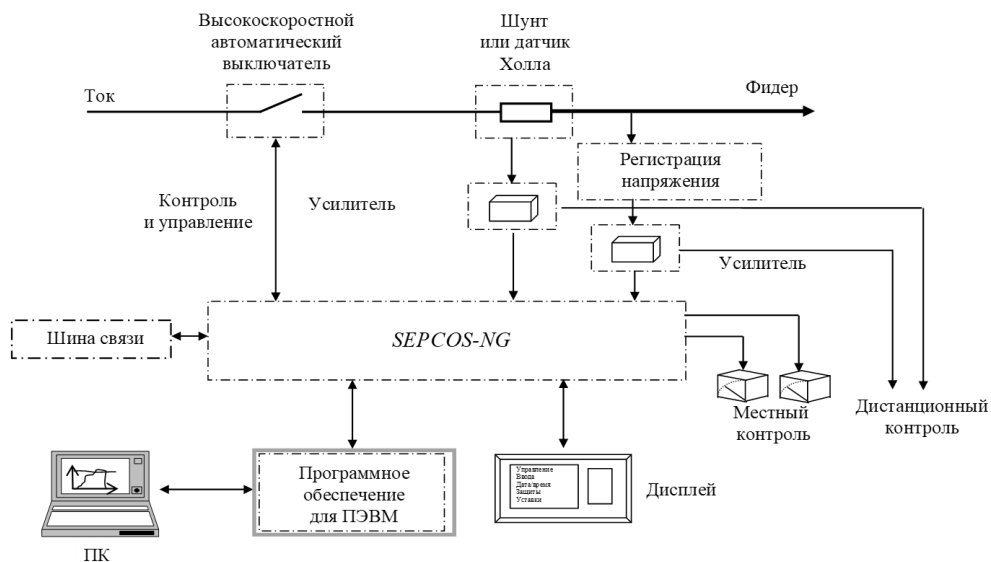


Рис. 4. Структурная схема устройства защиты, управления и диагностики на основе терминала  
 Fig. 4. Block diagram of a terminal-based protection, control and diagnostics device

щает всю длину межподстанционной зоны, и время действия ее меньше, чем у других защит, перекрывающих эту же зону.

Резервная защита МТЗ или токовая отсечка (ТО) предназначена для дублирования основной, при этом длина

защищаемого участка у резервной защиты должна быть не меньше, чем у основной, но может быть выдержка времени на срабатывание. Сложность обеспечения надежного функционирования состоит в том, что основная и резервная защиты реализуются

с помощью одного электромеханического реле типа РДШ — это МИЗ, а МТЗ или ТО могут быть реализованы виртуально за счет выбора уставки. В качестве дополнительных защит используют перечисленные выше специальные защиты.

Цифровые защиты имеют более широкий диапазон уставок и отдельные (в отличие от МИЗ) датчики абсолютного значения тока  $I$ , а его приращения  $\Delta I$  вычисляет контроллер за заданное уставкой время  $\Delta t$ , процессор непрерывно со скважностью  $2\text{мс}$  вычисляет скорость изменения тока  $di/dt$ . При необходимости возможен анализ нагрева проводов, определение наличия и расстояния до места КЗ, контроль изоляции кабелей фидеров (вариант для 600...825 В) и возможность подключения по внешним портам специальных защит (например, телеблокировки, частотной и др.). При этом возникают проблемы с расчетом и выбором уставок защит цифрового терминала. На практике допускаются ложные срабатывания.

На кафедре ЭТК НГТУ разработана, апробирована и внедрена на опытном полигоне методика для МИЗ и комплектов защит с терминалом ЦЗАФ-3,3 кВ [15]. Основные положения методики состоят в следующем:

1) анализ параметров участка тяговой сети;

2) выбор расчетных схем для нормального, вынужденного и аварийного режимов;

3) создание базы данных, необходимых для расчета токов нагрузки и токов КЗ;

4) выполнение расчетов с использованием программного комплекса «Кортэс» либо иным аналитическим способом;

5) проверка параметров, влияющих на функционирование защиты конкретного фидера, на математической модели с применением пакетов имитационного математического моделирования Simulink, в составе комплекса MATLAB [15,16];

6) выбор вида и зон действия основной защиты, определение возможностей резервных защит;

7) расчет уставок защит, заполнение карты уставок;

8) проверка функционирования и обеспеченности защитой участка тяговой сети путем построения диаграммы закрытия зон, при этом в каждой зоне должно функционировать не менее трех типов защит.

При этом возникают сложности выбора уставок по скорости нарастания и величине приращения тока в связи с их зависимостью от режимов работы тяговой сети. Этот параметр в общих чертах (пределы изменения) определен для всех серий электровозов, приведен в [2,6] и рекомендован к использованию в предварительных расчетах для накопления статистики. Поэтому в настоящее время большинство уставовленных цифровых защит эксплуатируются некоторый период в режиме «на сигнал».

При этом возникают сложности выбора уставок по скорости нарастания и величине приращения тока в связи с их зависимостью от режимов работы тяговой сети. Этот параметр в общих чертах (пределы изменения) определен для всех серий электровозов, приведен в [2,6] и рекомендован к использованию в предварительных расчетах для накопления статистики. Поэтому в настоящее время большинство уставовленных цифровых защит эксплуатируются некоторый период в режиме «на сигнал».

#### 4. Обсуждение результатов

Требованиям Правил устройства электроустановок в области защиты тяговой сети ГДП полностью удовлетворяет полный комплект защит ФКС, внедряемый в настоящее время на тяговых подстанциях РАО РЖД. Настройку уставок каждой защиты комплекта в тяговой сети ГДП при модернизации авторы рекомендуют выполнять, используя математическое моделирование тяговой сети и мониторингосциллограмм токов в нормальном и аварийном режимах работы тяговой сети в следующей последовательности:

1) анализ токов и напряжений при прохождении поездов в пределах фидерной зоны (штатные режимы

работы) и при повреждении ТС или ЭПС (аварийные режимы);

2) анализ прохода секционного изолятора самым мощным ЭПС или тяговым агрегатом с максимальным весом карьерного железнодорожного транспорта, обращающимся на участке смежных фидеров ТС с целью определения параметров изменений токов при перекрытии СИ; сбор статистического материала можно осуществлять органолептическим методом по приборам на панели управления ФКС, лучше записью самопишущими приборами, а при наличии цифровых терминалов расшифровкой осциллограмм, по результатам установить пределы изменения параметров тока;

3) анализ на математической модели влияния режимов работы СЭС на параметры схемы замещения, используемые при определении уставок каждой защиты терминала и выбор типов защит и их уставок для каждого ФКС, [16,17];

4) выполнение коррекции уставок МИЗ или полного комплекта каждой защиты по пунктам (2) и (3) для обеспечения нормального функционирования защит и гарантированного отключения при повреждениях карьерного железнодорожного транспорта.

В результате выполнения пунктов 1–4 в отдельных случаях при выборе уставок допускается некоторое количество ложных срабатываний.

Для этого необходимо контролировать мгновенные значения токов и напряжений в реальном времени. В системе мониторинга к терминалу подключают компьютер, создавая постоянную связь ПЭВМ с терминалом ФКС для питания карьерного железнодорожного транспорта [18]. Передача информации, управление и взаимодействие терминала с ПЭВМ осуществляется с помощью программного обе-

спечения, которое позволяет считывать из памяти терминала дополнительно информацию о токе и напряжении в форме осциллограмм за 300 мс перед наступлением переходного процесса, при стационарном (рис. 5, а) и аварийном (рис. 5, б) режимах, а также выдавать параметры, характеризующие режим (скорость изменения тока, приращение, абсолютную величину тока и напряжения) [19,20].

Устройство памяти терминала записывает непрерывно в течение месяца осциллограммы аварийных отключений, для анализа необходимо переносить их на персональный компьютер непосредственно на СТП, что усложняет процесс мониторинга. Для оперативной коррекции уставок авторами предложена система удаленного доступа к терминалам всех СТП дистанции электроснабжения ГДП, позволяющая осуществлять считывание информации со всех терминалов из одного центра, использовать и хранить ее в памяти ПЭВМ.

Процесс перехода ЭПС через секционный изолятор дает максимальное количество ложных срабатываний защиты, для анализа и коррекции уставки МИЗ или комплекта защит предложено с помощью программного обеспечения терминала графически совместить осциллограммы токов двух фидеров, для уточнения параметров программа позволяет увеличивать отдельные интервалы осциллограммы, оценивать качество токосъема (отсутствие отрывов), определять численные значения скачков тока и скорость их нарастания. Совмещение осциллограмм тока позволяет наиболее точно выбрать (откорректировать) уставки дифференциальной защиты и защиты по приращению тока в терминале.

В электронных защитах осуществлен принципиально новый способ

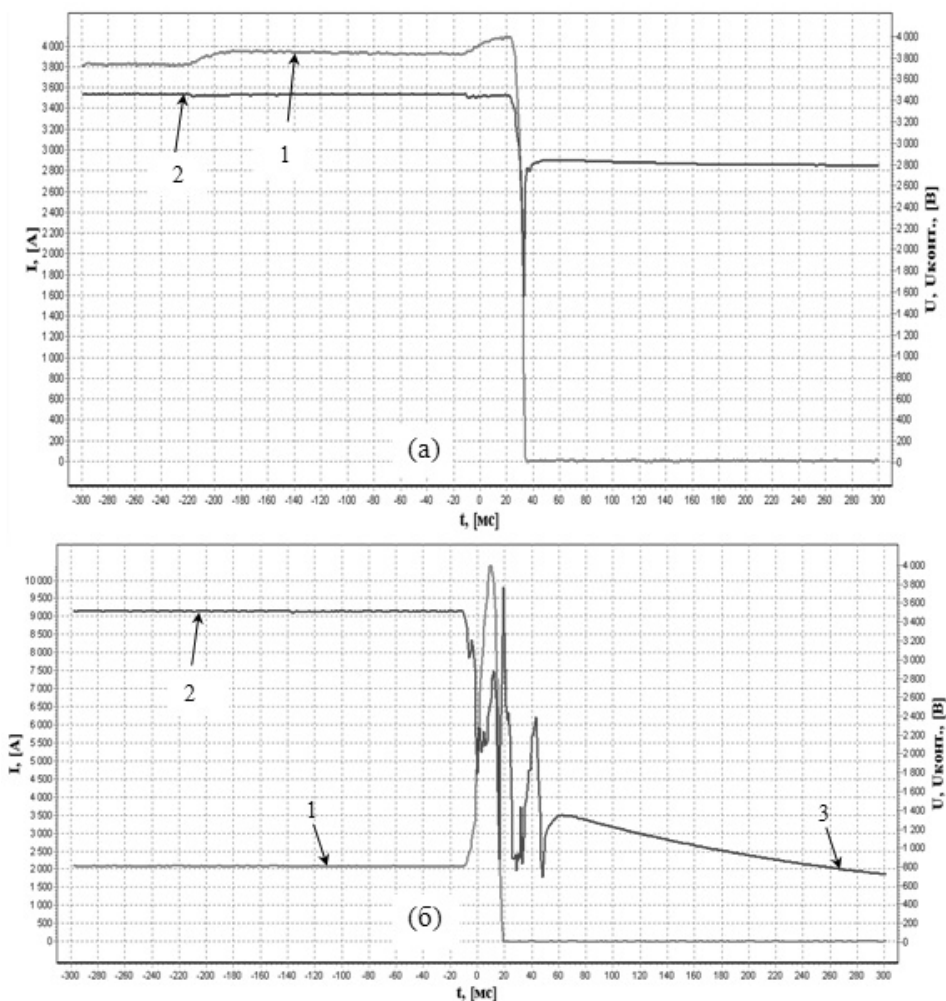


Рис. 5. Осциллограмма отключения ФКС: а – при перегрузке, б – при коротком замыкании вблизи ТП (1 – ток поезда; 2 – напряжение в контактной сети; 3 – напряжение после отключения ФКС)

Fig. 5. Oscillogram of FCC disconnection: a – in case of overload, b – short circuit near TP (1 – train current; 2 – voltage in the contact network; 3 – voltage after disconnection of FCC)

определения величины приращений тока, позволяющий отдельно реализовать функции МИЗ, ТО и МТЗ, выполнив последнюю двунаправленной. В качестве дополнительных защит в тяговых сетях ГДП можно использовать скорость нарастания тока  $di/dt$  (среднее из трех мгновенных значений за время сканирования, равное 2 мс) и приращения тока  $\Delta I$  за время  $t$  (сред-

нее значение  $di/dt$ ). В качестве резервных, например, можно использовать дистанционную ( $U/R$ ), или приращения тока  $\Delta I$  за время  $t$ , телеблокировку, тепловую защиту.

Переходный период, в течение которого будет эксплуатироваться классическая МИЗ в ТС ГДП, продлится не менее десятилетия, одновременно будут внедряться цифровые терминалы. Напри-

мер, на Западно-Сибирской железной дороге за десять лет терминалами типа ЦЗАФ-3,3 кВ и Inter- 3,3 кВ было оборудовано около 100 из примерно 755 фидеров, а по сети дорог, соответственно, 1500 из примерно 5660 фидеров.

На основе анализа существующих защит в тяговых сетях ГДП, исследований авторов и опыта эксплуатации защит тяговой сети родственных предприятий предлагается осуществить модернизацию защит в тяговых сетях ГДП в два этапа. На первом этапе необходимо для каждого участка, где происходит большое количество отключений от перегрузок, рассчитать характеристики срабатывания выключателя (см. рис. 3) с учетом параметров тяговой сети (контактная сеть, питающие и отсасывающие провода или кабели, реактор), проверить чувствительность МИЗ в конце зоны при уставке, выбранной по условию

$$K_3 I_{н. max} / K_6 \leq I_{y. MTЗ} \leq I_{к. min} / K_4, \quad (12)$$

где  $K_3, K_6, K_4$  — соответственно коэффициенты запаса, возврата и чувствительности, здесь  $K_4 = K_D$ .

Для МИЗ уставку необходимо проверить по условию

$$I_y = I / K_D. \quad (13)$$

Если условия не выполняются, то можно изменить параметры индуктивного шунта АБ-2/4, уменьшив пакет железа шунта на 20...40% или изменить тип выключателя, установив БВ нового типа с реле РДШ. Модернизация не требует больших затрат.

На втором этапе при неудовлетворительной работе МИЗ и для выполнения требований ПУЭ по обеспеченности защитой участка тяговой сети рекомендуется устанавливать комплекты защит.

## 5. Заключение

Поскольку объектом исследования авторов является тяговая сеть железно-

дорожного транспорта горнопромышленных комплексов (карьеров, разрезов, обогатительных предприятий), которая, обладая определенными особенностями в части проектирования и эксплуатации силовых трансформаторов, во многом идентична объектам тяговых сетей железнодорожного транспорта предприятий, методика совершенствования защиты тяговой сети горнодобывающих предприятий базируется на МИЗ и комплектах защит ФКС, реализованных в настоящее время в РАО РЖД.

На основе анализа функционирования существующих защит тяговой сети ГДП, а также исследований авторов на тяговых подстанциях карьерного железнодорожного транспорта установлено, что существующая защита тяговых сетей ГДП не удовлетворяет условиям надежного функционирования в соответствии с требованиями Правил технической эксплуатации, не обеспечено в большей части требование селективности, поэтому имеет место большое количество ложных срабатываний защиты фидеров тяговой сети.

В качестве практических рекомендаций по повышению надежности и экономичности эксплуатации тяговых сетей можно выделить следующее. Быстродействующий выключатель с шунтом имеет более высокую динамичность и поэтому труднее обеспечить селективность МИЗ. Для повышения надежности функционирования рекомендуется семейство характеристик рассчитывать для каждого типа БВ или реле РДШ с учетом параметров тяговой сети защищаемого участка. Этот подход увеличит не только надежность эксплуатации тяговых сетей ГДП, но и экономичность их эксплуатации за счет снижения числа ложных отключений тяговых сетей ГДП.

Это позволит повысить надежность функционирования защиты, уменьшить

количество ложных отключений ФКС и, следовательно, повысить надежность электроснабжения тяги ГДП.

Исследованиями функционирования существующей аналоговой защиты и внедряемых цифровых терминалов определены пределы изменения скорости нарастания тока в тяговой сети при нормальных в пределах 20...80 А/мс и аварийных режимах в пределах 170...210 А/мс. Нестандартные ситуации в тяговой сети ГДП, которые приводят к ложным срабатываниям, можно минимизировать при использовании цифровых терминалов мониторингом осциллограмм, используя эту методику каждый раз при изменении параметров движения и веса поездов.

Показаны возможности улучшения характеристик работы существующей максимальной импульсной защиты тяговой сети ГДП с помощью математического моделирования для повышения точности и исключения погрешности расчетных параметров нормального и аварийного режимов и последующего уточнения мониторингом для привязки рассчитанных уставок ФКС к каждому участку (фидерной зоне) тяговой сети. Кроме того, рекомендуется согласовать параметры индуктивных шунтов БВ с параметрами тяговой сети ГДП. Использование цифровых защит в настоящее время наиболее полно отвечает требованиям Правил технической эксплуатации.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Малафеев С. И., Малафеев С. С. К анализу энергетических процессов в питающей сети при работе карьерного экскаватора // Горный информационно-аналитический бюллетень. — 2020. — № 3. — С. 126–137. DOI: 10.25018/0236-1493-2020-3-0-126-137.

2. Шевырев Ю. В. Улучшение качества электроэнергии при работе полупроводникового преобразователя частоты // Горный информационно-аналитический бюллетень. — 2020. — № 2. — С. 171–178. DOI: 10.25018/0236-1493-2020-2-0-171-178.

3. Абрамов Б. И., Иванов А. Г., Шиленков В. А., Кузьмин И. К., Шевырев Ю. В. Электропривод современных шахтных подъемных машин // Горный информационно-аналитический бюллетень. — 2022. — № 5–2. — С. 145–162. DOI: 10.25018/0236\_1493\_2022\_52\_0\_145.

4. Сычев Ю. А., Аладьин М. Е., Зимин Р. Ю. Многофункциональные фильтрокомпенсирующие устройства в комбинированных системах электроснабжения предприятий минерально-сырьевого комплекса // Горный информационно-аналитический бюллетень. — 2022. — № 7. — С. 164–179. DOI: 10.25018/0236\_1493\_2022\_7\_0\_164.

5. Yang X., Gu J., Zheng T. Q., Zhao Z. Faults and reliability analysis of negative resistance converter traction power system // Microelectronics Reliability. 2020, vol. 114. DOI: 10.1016/j.microrel.2020.113911.

6. Демиденко И. С. Повышение эффективности защиты тяговой сети постоянного тока: Автореф. дис. на соискание ученой степени канд. техн. наук. — М.: Новосибирский государственный технический университет, 2013. — 19 с.

7. Бадер М. П., Гречишников В. А., Шевлюгин М. В., Король Ю. Н. Анализ показателей работы силового оборудования системы тягового электроснабжения ОАО «РЖД» на основе мониторинга тяговых подстанций в режиме реального времени // Электроника и электрооборудование транспорта. — 2011. — № 5–6. — С. 5–8.

8. Sun L., Wu M., Sun J., Yang S. Simulation of Short-Circuit Fault Occurring on Subway Train // Proceedings of the 3rd International Conference on Electrical and Information Technologies for Rail Transportation (EITRT) 2017. 2018, pp. 585–595. DOI: 10.1007/978-981-10-7986-3\_60.

9. Xia M., Zhou Y., Huang Y., Yang H., Tai Y. Research on Short-Circuit Characteristics of Subway DC Traction Power Supply System // IECON 2020. The 46th Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society. 2020, pp. 3456–3460, DOI: 10.1109/IECON43393.2020.9254651.

10. Жарков Ю. И., Фигурнов Е. П. Проблемы организации защиты тяговой сети постоянного тока от коротких замыканий при повышенных тяговых нагрузках. «Электрификация транспорта» (украинское издание). 2014. — № 7. — С. 28–31.

11. Кузнецов С. М., Демиденко И. С. Переход от токово-импульсной защиты к мониторингу тяговой сети // Научные проблемы транспорта Сибири и Дальнего Востока. Труды НГАВТ. — 2012. — №2. — С. 111–114.

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

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

14. Kuznetsov S. M., Malozyomov B. V. Some aspects of the digital protection of the DC traction network // Journal of Physics: Conference Series. 2021, vol. 2032 (1). DOI: 10.1088/1742-6596/2032/1/012074


15. Демиденко И. С., Ярославцев М. В., Кривова А. О. Математическое моделирование переходных процессов в тяговой сети // Радиоэлектроника, электротехника и энергетика: Шестнадцатая Междунар. науч.-техн. конф. студентов и аспирантов: Тез. докл. В 3-х т. Т. 2. М.: Издательский дом МЭИ. — 2010. — 207 с.

16. L. Yu, J H He, J Hu, Z Q Bo, M X Li, T Yip, A Klimek. Accurate track modeling for fault current on DC railways based on MATLAB/Simulink // Power and Energy Society General Meeting, 2010 IEEE. 2010, pp.1–6. DOI: 10.1109/PES.2010.5590135

17. Кузнецов С. М., Демиденко И. С. Мониторинг как средство повышения надежности электроснабжения тяговой сети // Инновации на основе информационных и коммуникационных технологий = Innovations based on information and communication technologies : материалы международной научно-практической конференции Инфо-2012. Качество — Безопасность — Диагностика, Сочи, 1–10 октября 2012 г. — Москва: МИЭМ НИУ ВШЭ, 2012. — С. 41–45.

18. Аржанников Б. А., Бадер М. П., Бурков А. Т., Котельников А. В., Набойченко И. О. Совершенствование обеспечения безопасности к системе и устройству тягового электроснабжения постоянного тока // Электротехника. — 2016. — № 9. — С. 51–57.

19. Демиденко И. С. Повышение эффективности защиты тяговой сети постоянного тока: Автореф. дис. на соискание ученой степени канд. техн. наук. — Новосибирский государственный технический университет, 2013. — 19 с.

20. Ду Ф., Хе Дж. Х., Ю Л., Ли М. Х., Бо З. К., Клидек А. Моделирование системы тяги постоянного тока в метро с различными поездами с электроприводом // Конференция по энергетике (APPEEC), IEEE 2010 Asia — Тихий океан. 2010. — С. 1–4. DOI: 10.1109/APPEEC.2010.5448372. 

## REFERENCES

1. Malafeev S. I., Malafeev S. S. On the analysis of energy processes in the supply network during the operation of a quarry excavator. *MIAB. Mining Inf. Anal. Bull.* 2020, no. 3, pp. 126–137. [In Russ]. DOI: 10.25018/0236-1493-2020-3-0-126-137.

2. Shevyrev Yu. V. Improving the quality of electricity during the operation of a semiconductor frequency converter. *MIAB. Mining Inf. Anal. Bull.* 2020, no. 2, pp. 171–178. [In Russ]. DOI: 10.25018/0236-1493-2020-2-0-171-178.

3. Abramov B. I., Ivanov A. G., Shilenkov V. A., Kuzmin I. K., Shevyrev Yu. V. Electric drive of modern mine hoisting machines. *MIAB. Mining Inf. Anal. Bull.* 2022, no. 5–2, pp. 145–162. [In Russ]. DOI: 10.25018/0236\_1493\_2022\_52\_0\_145.

4. Sychev Yu. A., Alad'in M. E., Zimin R. Yu. Multifunctional filter-compensating devices in combined power supply systems for enterprises of the mineral and raw materials complex. *MIAB. Mining Inf. Anal. Bull.* 2022, no. 7, pp. 164–179. [In Russ]. DOI: 10.25018/0236\_1493\_2022\_7\_0\_164.

5. Yang X., Gu J., Zheng T. Q., Zhao Z. Faults and reliability analysis of negative resistance converter traction power system. *Microelectronics Reliability.* 2020, vol. 114. DOI: 10.1016/j.microrel.2020.113911.

6. Demidenko I. S. Improving the efficiency of protection of the DC traction network: Avtoref. dis. for the degree of Cand. tech. Sciences. – M.: Novosibirsk State Technical University. 2013, 19 p.

7. Bader M. P., Grechishnikov V. A., Shevlyugin M. V., Korol Yu. N. Analysis of performance indicators of power equipment of the traction power supply system of Russian Railways based on real-time monitoring of traction substations. *Electronics and electrical equipment of transport.* 2011, no. 5–6, pp. 5–8. [In Russ].

8. Sun L., Wu M., Sun J., Yang S. Simulation of Short-Circuit Fault Occurring on Subway Train. *Proceedings of the 3rd International Conference on Electrical and Information Technologies for Rail Transportation (EITRT) 2017.* 2018, pp.585–595. DOI: 10.1007/978-981-10-7986-3\_60.

9. Xia M., Zhou Y., Huang Y., Yang H., Tai Y. Research on Short-Circuit Characteristics of Sub-way DC Traction Power Supply System. *ICON 2020 The 46th Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society.* 2020, pp. 3456–3460. DOI: 10.1109/IECON43393.2020.9254651.

10. Zharkov Yu. I., Figurnov E. P. Problems of organizing the protection of the DC traction network from short circuits at increased traction loads. *Electrification of Transport” (Ukrainian edition).* 2014, no. 7, pp. 28–31. [In Russ].

11. Kuznetsov S. M., Demidenko I. S. Transition from current-impulse protection to monitoring of the traction network. Scientific problems of transport in Siberia and the Far East. *Proceedings of NGAVT.* 2012, no. 2, pp. 111–114. [In Russ].

12. Drobov A. V., Galushko V. N. Evaluation of the use of relay protection and automation of metro traction substations based on the SMTN-3 monitoring system. *Agrotechnics and Energy Supply.* 2020, no. 1 (26), pp. 30–32. [In Russ].

13. 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. *Elektrotehnika.* 2016, no. 9, pp. 51–57. [In Russ].

14. Kuznetsov S. M., Malozyomov B. V. Some aspects of the digital protection of the DC traction network *Journal of Physics: Conference Series.* 2021, vol. 2032(1). DOI: 10.1088/1742-6596/2032/1/012074.

15. Demidenko I. S., Yaroslavtsev M. V., Krivova A. O. Mathematical modeling of transient processes in the traction network. *Sci.-tech. conf. students and graduate students: Proceedings. report in 3 volumes.* T. 2. Moscow, MPEI Publishing House. 2010, 207 p. [In Russ].

16. L. Yu, J H He, J Hu, Z Q Bo, M X Li, T Yip, A Klimek. Accurate track modeling for fault current on DC railways based on MATLAB/Simulink. *Power and Energy Society General Meeting, 2010 IEEE.* 2010, pp.1–6. DOI: 10.1109/PES.2010.5590135.

17. Kuznetsov S. M., Demidenko I. S. Monitoring as a means of improving the reliable power supply of the traction network. *Innovations based on information and communication technologies: materials of the international scientific and practical conference Info- 2012.*



*Quality – Safety – Diagnostics, Sochi, October 1–10, 2012*. Moscow, MIEM NRU HSE. 2012, pp. 41–45. [In Russ].

18. Arzhannikov B. A., Bader M. P., Burkov A. T., Kotelnikov A. V., Naboichenko I. O. Improving the security of the system and device of direct current traction power supply. *Elektrotehnika*. 2016, no. 9, pp. 51–57. [In Russ].

19. Demidenko I. S. Improving the efficiency of protection of the DC traction network: Abstract of the thesis. dis. for the degree of Cand. tech. Sciences. Novosibirsk State Technical University. 2013, 19 p. [In Russ].

20. Du F., Hye J. H., Yu L., Li M. H., Bo Z. K., Klimek A. Simulation of the DC traction system in the subway with various electric trains. (*APPEEC*), *IEEE 2010 Asia-Pacific*. 2010, pp. 1–4. DOI: 10.1109/APPEEC.2010.5448372.

## ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

*Сергей Михайлович Кузнецов*<sup>1</sup> – канд. техн. наук, доцент, e-mail: ksmetk@mail.ru;

*Павел Сергеевич Лисицын*<sup>1</sup> – ассистент, e-mail: lisic9@mail.ru;

<sup>1</sup> Новосибирский государственный технический университет.

**Для контактов:** *Кузнецов С. М.*, e-mail: ksmetk@mail.ru.

## INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

*Kuznetsov S. M.*<sup>1</sup>, Cand. Sci. (Eng.), Associate Professor, e-mail: ksmetk@mail.ru;

*Lisitsyn P. S.*<sup>1</sup>, assistant, e-mail: lisic9@mail.ru;

<sup>1</sup> Novosibirsk State Technical University.

**For contacts:** *Kuznetsov S. M.*, e-mail: ksmetk@mail.ru.

Получена редакцией 24.01.2022; получена после рецензии 27.09.2022; принята к печати 10.11.2022.

Received by the editors 24.01.2022; received after the review 27.09.2022; accepted for printing 10.11.2022.

