



## ЭНЕРГЕТИКА, АВТОМАТИЗАЦИЯ И ЭНЕРГОЭФФЕКТИВНОСТЬ

Научная статья

<https://doi.org/10.17073/2500-0632-2021-3-211-220>**Оценка эксплуатационной надежности электроснабжения развивающихся участков добычи руд на высокогорном руднике**Р. В. Ключев<sup>1</sup> , И. И. Босиков<sup>2</sup> , О. А. Гаврина<sup>2</sup> , В. И. Ляшенко<sup>3</sup> <sup>1</sup> *Московский политехнический университет, г. Москва, Российская Федерация*<sup>2</sup> *Северо-Кавказский горно-металлургический институт (государственный технологический университет), г. Владикавказ, Российская Федерация*<sup>3</sup> *Украинский научно-исследовательский и проектно-изыскательский институт промышленной технологии, г. Желтые Воды, Украина* [kluev-roman@rambler.ru](mailto:kluev-roman@rambler.ru)**Аннотация**

Приоритетными направлениями развития добычи вольфрамо-молибденового сырья являются освоение новых месторождений и модернизация существующих горнодобывающих предприятий с целью повышения их эффективности. При модернизации горных производств внимание уделяется всем технологическим процессам и инженерным системам, трансформация которых должна быть направлена на повышение экономических показателей, в том числе и надежности. Исследования систем электроснабжения горных предприятий и режимов их работы являются актуальной задачей, так как этот класс инженерного обеспечения горных работ, вспомогательных процессов и объектов определяет конкурентоспособность предприятия в целом. В ходе исследований проведена оценка эксплуатационной надежности электроснабжения развивающихся участков добычи руд на высокогорном руднике Тырнаузского месторождения (Кабардино-Балкарская Республика). Установлено, что при существующей схеме раздельного питания сетей напряжением 6 кВ от подстанций полные токи замыкания на землю для этих сетей соответственно равны:  $I_{030} = 17,5$  А и  $I_{0116} = 12,2$  А и достигают предельных значений, при которых возможно их отключение разъединителями (предельный ток составляет 20 А). Рекомендована формула полного тока замыкания на землю в подземных сетях напряжением 6 кВ. Показано, что надежность электроснабжения на указанном руднике, а также уровень опасности поражения электрическим током в электроустановках в значительной степени зависят от количества однофазных замыканий на землю. На основе теоретических и экспериментальных исследований разработаны решения по улучшению эксплуатации электрических сетей, учитывающих структуру и режимы работы высокогорного рудника.

**Ключевые слова**

горнодобывающие предприятия, рудники, электроснабжение, режим работы, эффективность, надежность, безопасность, замыкания, изоляция, проводимость, Тырнаузское месторождение, Кабардино-Балкарская Республика

**Для цитирования**

Ключев Р. В., Босиков И. И., Гаврина О. А., Ляшенко В. И. Оценка эксплуатационной надежности электроснабжения развивающихся участков добычи руд на высокогорном руднике. *Горные науки и технологии*. 2021;6(3):211–220. <https://doi.org/10.17073/2500-0632-2021-3-211-220>

## POWER ENGINEERING, AUTOMATION, AND ENERGY PERFORMANCE

Research article

**Assessment of operational reliability of power supply to developing ore mining areas at a high-altitude mine**R. V. Klyuev<sup>1</sup> , I. I. Bosikov<sup>2</sup> , O. A. Gavrina<sup>2</sup> , V. I. Lyashenko<sup>3</sup> <sup>1</sup> *Moscow Polytechnic University, Moscow, Russian Federation*<sup>2</sup> *North Caucasian Institute of mining and metallurgy (State Technological University), Vladikavkaz, Russian Federation*<sup>3</sup> *Ukrainian Research and Design Institute for Industrial Technology, Zholti Vody, Ukraine* [kluev-roman@rambler.ru](mailto:kluev-roman@rambler.ru)**Abstract**

Development of new deposits and modernization of existing mining enterprises in order to improve their efficiency are the priorities for the development of tungsten-molybdenum resource sector. In the modernization of mining productions, attention is paid to all technological processes and engineering



systems, transformation of which should be aimed at improving economic performance, including reliability. Research of power supply systems of mining enterprises and modes of their operation is an urgent task, as this type of engineering support of mining works, auxiliary processes and facilities determines competitiveness of an enterprise as a whole. In the course of research, an assessment of operational reliability of power supply of developing ore mining areas at a high-altitude mine of the Tyrnyauz deposit (Kabardino-Balkaria) was performed. It was found that under the existing scheme of separate power supply of 6 kV networks from substations, the full ground fault currents for these networks are respectively:  $I_{050} = 17.5$  A and  $I_{011b} = 12.2$  A and reach the limiting values at which it was possible to disconnect them by disconnectors (the limiting current was 20 A). A formula for total ground-fault current in 6 kV underground networks was recommended. It was shown that reliability of power supply in the above mine, as well as the level of danger of electric shock in electrical installations depended largely on the number of single-phase ground faults. On the basis of the theoretical and experimental research, the solutions to improve the operation of electrical networks, taking into account the structure and modes of operation of a high-altitude mine were developed.

### Keywords

mining enterprises, mines, electric power supply, efficiency, operating regime, reliability, safety, ground faults, insulation, conductivity, Tyrnyauz deposit, Kabardino-Balkarian Republic

### For citation

Klyuev R. V., Bosikov I. I., Gavrina O. A., Lyashenko V. I. Assessment of operational reliability of power supply to developing ore mining areas at a high-altitude mine. *Mining Science and Technology (Russia)*. 2021;6(3):211–220. (In Russ.) <https://doi.org/10.17073/2500-0632-2021-3-211-220>

### Введение

Месторождения вольфрамо-молибденовых руд всегда привлекали к себе внимание, так как во многом определяют конкурентоспособность целых отраслей экономики. Приоритетными направлениями развития добычи любого минерального сырья, как правило, являются освоение новых месторождений и модернизация существующих горнодобывающих предприятий с целью повышения их эффективности. При модернизации горных производств внимание уделяется всем технологическим процессам и инженерным системам, трансформация которых должна быть направлена на повышение экономических показателей, в том числе и надежности [1].

Горные предприятия являются в значительной степени энергоемкими, так как многие технологические процессы связаны с добычей, переработкой горной массы, ее перемещением, созданием безопасных условий для ведения технологических процессов, а именно проветриванием, откачиванием рудничных вод и т.д. Поэтому исследования систем электроснабжения горных предприятий и режимов их работы являются актуальной задачей [2]. Исследования проводились на системе (системах) электроснабжения рудника Тырныузского месторождения (Кабардино-Балкарская Республика).

Электрические сети напряжением 6 кВ рассматриваемого рудника развивались постепенно. По мере увеличения горных работ и при ожидаемом их объеме они не смогут обеспечивать надежное электроснабжение развивающихся участков подземной и открытой добычи на руднике. Поэтому повышение электропотребления, необходимость обеспечения более высокой надежности и гибкости системы электроснабжения горных работ и безопасности электрических установок в сетях различных напряжений при расширении фронта горных работ как подземным, так и открытым способами – важная

научно-практическая задача, требующая эффективного решения [3–5].

Объектом исследования являются системы электроснабжения развивающихся участков добычи руд на высокогорном руднике – как подземным, так и открытым способами, в том числе при подземной добыче руд в энергонарушенных массивах [6].

Одним из самых проблемных мест является эксплуатация кабельных сетей напряжением 6 кВ на высокогорном руднике. Сложности связаны с возможным одновременным выходом из строя кабельной изоляции на различных участках кабельной сети при коротком замыкании (КЗ) на землю на одном из ее участков. Такие одновременные повреждения изоляции кабелей в нескольких местах при КЗ на землю могут быть следствием плохого ее состояния или значительных перенапряжений в двух других фазах при замыкании на землю третьей фазы.

Цель исследования – оценка эксплуатационной надежности электроснабжения развивающихся участков добычи руд на высокогорном руднике для обеспечения более высокой гибкости системы электроснабжения горных работ, а также безопасности электрических установок в сетях различных напряжений при расширении фронта горных работ как подземным, так и открытым способами.

Для достижения поставленной цели необходимо решить следующие задачи.

1. Выполнить измерение токов КЗ на землю и разработать методики их расчета, а также мероприятия по их ограничению.

2. Исследовать межфазные токи КЗ для проверки возможности селективной работы релейной защиты элементов электрических сетей.

Методология исследований включает в себя комплекс методов исследования прямого замыкания на землю для определения полной проводимости изоляции, например, метод, использующий искусственное

смещение нейтрали сети относительно земли от постороннего источника тока, а также метод наложения постоянного оперативного тока на рабочую сеть высокого напряжения [7–10].

В последние годы ведется активная работа по восстановлению и вводу в эксплуатацию Тырнаузского месторождения. По оценкам «Ростеха», балансовые запасы месторождения составляют 209,5 тыс. т триоксида вольфрама (содержание – 0,432 %) и 36,6 тыс. т молибдена (содержание – 0,076 %). Проект возрождения ГОКа был включен в «Инвестиционный план первоочередных и перспективных проектов, реализуемых и планируемых к реализации в Северо-Кавказском федеральном округе на период до 2025 года». В работе приведены результаты функционирования месторождения, которые планируется использовать при вводе месторождения в опытную эксплуатацию в ближайшие годы.

Тырнаузское месторождение разрабатывается комбинированным способом: основную долю в добыче составляет подземный способ и около 20% добывается открытым способом. Технологический процесс добычи руды подземным способом состоит из операций бурения, взрывания, погрузки и доставки руды из очистных забоев, откатки к стволу шахты и выдачи руды на поверхность. Транспортировка руды на эксплуатационных горизонтах производится внутришахтным транспортом до рудоспуска электровозами

в вагонетках, а на остальных горизонтах – автосамосвалами. Руда из очистных блоков транспортируется до капитальных рудоспусков и перепускается на горизонт «Штольня Главная». Основными стационарными установками рудника являются: вентиляторные, пневматические, подъемные, водоотливные. Кабельная сеть рудника выполнена кабелями типа АСБ, ААБ и СБ.

Электрические сети напряжением 6 кВ высокогорного рудника состоят из воздушных и кабельных участков. Воздушные электрические линии напряжением 6 кВ представлены двумя фидерами Ф-61 и Ф-63 от подстанции (ПСТ) «Эльбрус», Республика Северная Осетия-Алания (PCO – Алания), до ПСТ № 116, а также отпайками от этих фидеров к ПСТ № 30 и другим подстанциям по пути следования фидеров (рис. 1). Фидеры Ф-61 и Ф-63 выполнены сталеалюминиевыми проводами марки АС сечением 95 мм<sup>2</sup> на деревянных опорах. На отдельных труднопроходимых участках воздушные сети выполнены кабельными вставками с соизмеримой допустимой токовой нагрузкой. Кабельная сеть рудника выполнена бронированными кабелями с бумажной пропитанной изоляцией в свинцовой оболочке или с отдельно оцинкованными жилами, которые по поверхности высокогорного рудника проложены в траншеях и представлены кабелями типа АСБ, ААБ и СБ с медными и алюминиевыми жилами. Кабели в подземных выработках проложены открыто.

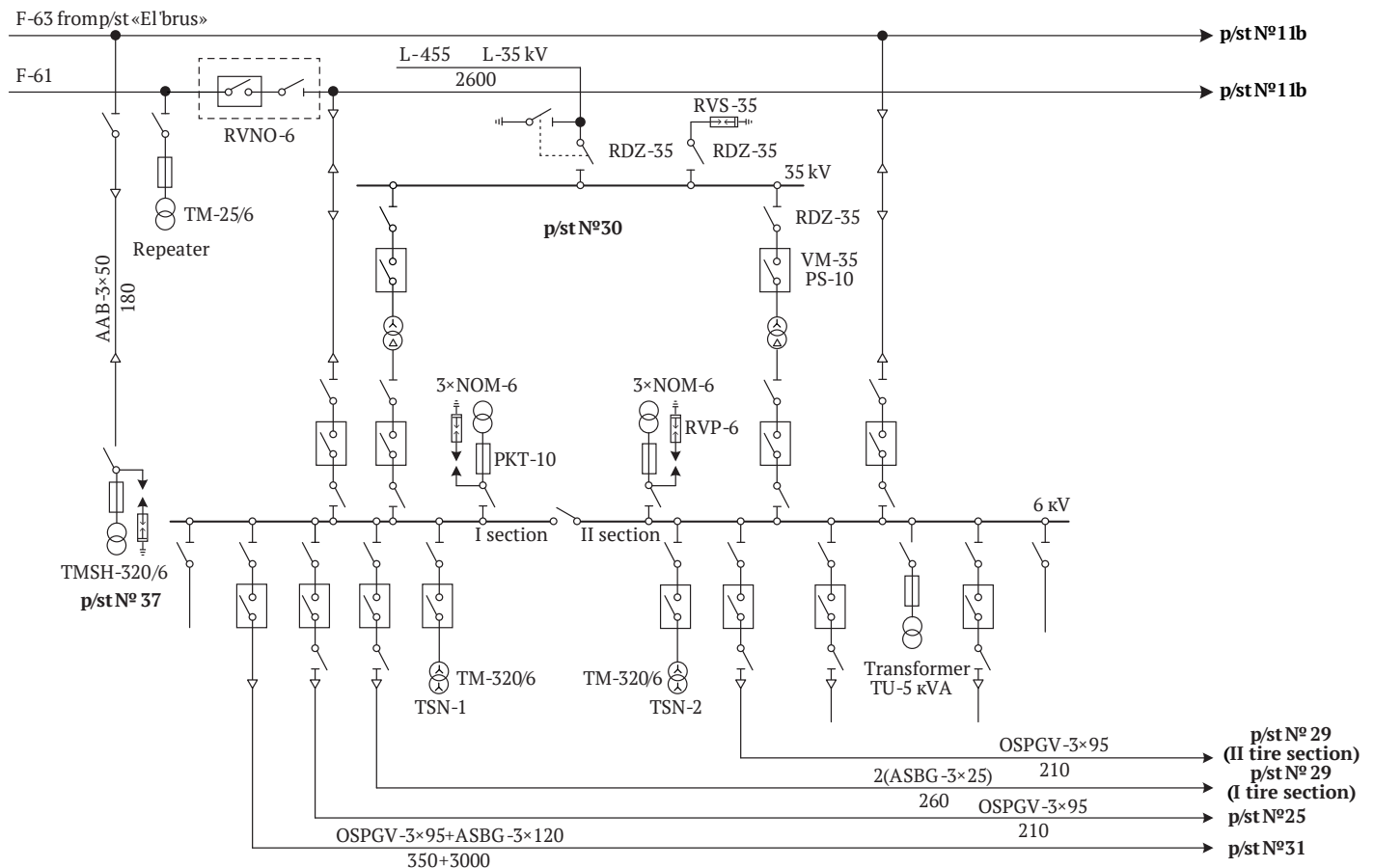


Рис. 1. Фрагмент схемы электроснабжения высокогорного рудника

Fig. 1. Fragment of power supply schematic diagram of mountain mine



Отдельные участки кабельной сети соединяются при помощи типовых и собственного изготовления переходных кабельных муфт с заливкой типовой битумной массой. Для питания сетей напряжением 6 кВ рудника используются два трансформатора ТМ-3200, установленных на ПСТ №30. Оба трансформатора подключены к одной воздушной линии напряжением 35 кВ от ПСТ «Эльбрус» – ЛЭП-455. Распределительные устройства ПСТ № 30 и 116, а также остальных подземных и поверхностных подстанций скомплектованы из комплектных распределительных ячеек типа РВН-6 (РВНО-6) с масляными выключателями ВМБ-10 или ячеек с разъединителями и высоковольтными предохранителями для подключения трансформаторов собственных нужд подстанций и измерительных трансформаторов напряжения типа НОМ-6, НТМИ-6, НТМК-6.

Ячейки оборудованы приводами и масляными выключателями типа ПРБА со встроенными двумя токовыми реле прямого действия типа РТМ без выдержки времени или типа РТВ с выдержкой времени. На ряде ячеек ввода питающих линий на подстанцию (116, 30, ствол, главные вентиляторы и др.) защита выполнена реле косвенного действия типа ЭТ-520 без выдержки времени и типа ИТ-80 с выдержкой времени, воздействующими на привод выключателя через отключающую катушку.

Подстанции верхних горизонтов при наличии двух вводов на подстанцию не имеют секционирования шин РУ-6 кВ. Отсутствие секционирования шин не затрудняет работу максимальной токовой защиты (МТЗ) как на питающих подстанцию линиях, так и на отходящих от них линиях. Надежность системы электроснабжения этих горизонтов при наличии двух линий питания мало отличается от надежности системы с одной линией. Ограниченная пропускная способность фидеров Ф-61 и Ф-63, а также сложная схема питания подстанций и ввода резерва затрудняют бесперебойное электроснабжение ответственных компрессорных и вентиляционных установок, преобразовательных подстанций и т.д. [11, 12].

Состояние изоляции всей сети в целом и отдельных ее элементов на руднике, как и токи КЗ и возможные перенапряжения в сети, исследованиям не подвергались. Надежность электроснабжения на руднике, а также опасность поражения электрическим током в электроустановках напряжением 6 кВ в значительной степени зависят от количества однофазных замыканий на землю (ОЗЗ) и связанных с ними перенапряжений в сети, а также возможности перехода однофазных замыканий в многофазные. ОЗЗ с длительно протекающими токами до 30 А могут вызвать на заземленном оборудовании опасный для человека потенциал от 60 В ( $R_3 = 20$  Ом) до 300 В ( $R_3 = 10$  Ом).

Решение поставленных в работе задач позволит выработать решения по улучшению эксплуатации электрических сетей, более полному использованию существующих сетей и обеспечению безопасных условий обслуживания электроустановок сетей напряжением 6 кВ высокогорного рудника.

## Общая характеристика электрических сетей напряжением 6 кВ высокогорного рудника

Электрические распределительные сети напряжением 6 кВ рассматриваемого рудника получают питание от двух источников: линии 35 кВ и двух воздушных линий 6 кВ от подстанции «Эльбрус». Воздушная ЛЭП напряжением 35 кВ длиной 2,6 км выполнена проводом АС-3×95 на деревянных опорах и подходит к ПСТ №30, на которой установлены два трансформатора мощностью 3200 кВА каждый, питающих две секции шин напряжением 6 кВ. Секции 6 кВ ПСТ №30 секционированы разъединителем.

Воздушные ЛЭП напряжением 6 кВ от ПСТ «Эльбрус»: Ф-61 и Ф-63 – подходят к ПСТ №116, которые на отдельных участках имеют кабельные вставки одинаковой с воздушными линиями пропускной способностью, от обеих ЛЭП имеются отпайки к шинам 6 кВ ПСТ №30. Шины 6 кВ ПСТ №116 не секционированы. Сеть рудника имеет большую разветвленность и значительную протяженность (общая протяженность кабельной сети 6 кВ  $l_{cable} = 45$  км и воздушной  $l_{air} = 11$  км, число подключенных подстанций равно 32). Распределительная сеть 6 кВ проходит по поверхности рудника, по штольням и вертикальным выработкам. Кабельная сеть выполнена кабелем с алюминиевыми и медными жилами, в свинцовой и алюминиевой оболочках с бумажной пропитанной изоляцией на горизонтальных участках и с осушенной изоляцией на вертикальных участках.

## Методы исследования состояния изоляции электрических сетей напряжением 6 кВ

Полная проводимость изоляции сети определяет полный ток ОЗЗ и наоборот согласно выражениям [9, 10]:

$$y_0 = \frac{I_0}{U_{ph}}; \quad I_0 = U_{ph} y_0, \quad (1)$$

где  $y_0$  – полная проводимость изоляции сети, Ом<sup>-1</sup>;  $I_0$  – полный ток замыкания на землю, А;  $U_{ph}$  – напряжение фазы (phase) сети относительно земли, В.

Полная проводимость изоляции представляется двумя составляющими: активной –  $g_0$  и реактивной –  $b_0$ :

$$y_0 = \sqrt{g_0^2 + b_0^2}. \quad (2)$$

Соотношение между  $g_0$  и  $b_0$  зависит от качества и состояния изоляционного материала кабеля, т.е. определяется тангенсом угла диэлектрических потерь:

$$\operatorname{tg} \delta_0 = \frac{b_0}{g_0}.$$

## Метод прямого замыкания на землю

Полная проводимость изоляции  $y_0$  наиболее просто и точно определяется через ток ОЗЗ  $I_0$  и напряжение фазы сети относительно земли  $U_{ph}$ . Значение тока ОЗЗ  $I_0$  определяется при замыкании одной из фаз сети на землю через амперметр (или трансформатор тока) по схеме (рис. 2) [9, 10]. Такой способ измерения

прост, требует минимального времени на выполнение измерений, простейшую измерительную аппаратуру (амперметр, трансформатор тока).

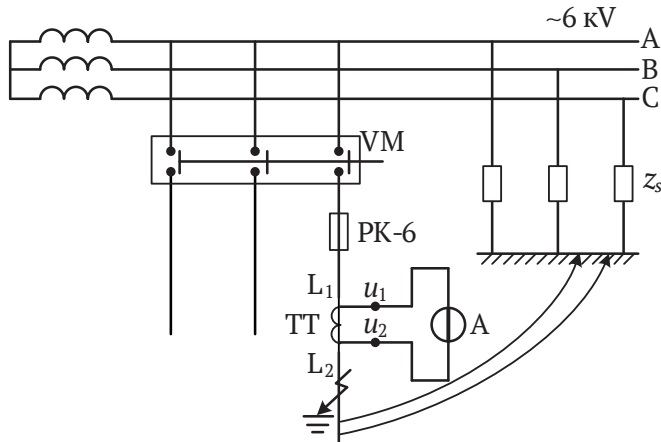


Рис. 2. Метод прямого замыкания на землю  
Fig. 2. Method of direct ground fault

Основным недостатком этого метода является повышение напряжения на двух неповрежденных фазах относительно земли и возможность перехода однофазного замыкания в многофазное замыкание на землю, что негативно сказывается на электробезопасности для условий горных предприятий высокогорья, где необходимо быстрое отключение повреждений для недопущения прекращения электроснабжения потребителей в труднодоступных горных районах.

Для обеспечения безопасности при измерении тока ОЗЗ замыкание производится через предохранитель типа ПК-6 (ПК-6), а установка максимальной токовой защиты на масляном выключателе ячейки, на которой производится замыкание, частично или полностью выводится. Как показывает опыт аналогичных исследований, наличие в замыкаемой цепи предохранителя указанного типа обеспечивает безопасность проведения измерения тока замыкания на землю – вследствие быстрейшего его срабатывания. При возможном многофазном замыкании отключение «земли» производится предохранителем раньше, чем максимальной токовой защитой при полностью выведенной выдержке времени. Максимальная токовая защита при измерении резервирует работу предохранителя [9, 10, 13–15].

Общая протяженность электрически связанной сети 6 кВ высокогорного рудника превышает 56 км, на которых более 45 км кабельной и 11 км воздушной сети. Ожидаемый ток ОЗЗ при параллельной работе всей сети и трансформаторов можно определить по эмпирической формуле:

$$I_0 = U_l \left( \frac{l_{air}}{390} + \frac{l_{cable}}{10} + \frac{N_{el}}{500} \right), \quad (3)$$

где  $U_l$  – линейное (line) напряжение сети, кВ;  $l_{air}$ ,  $l_{cable}$  – протяженность воздушной (air) и кабельной (cable) сети, км;  $N_{el}$  – число подключенных к сети напряжением 6 кВ отдельных элементов (elements): трансформаторных подстанций, двигателей 6 кВ, ячеек 6 кВ и т.д.

При измерении тока ОЗЗ по схеме, приведенной на рис. 2, необходимо: установить предохра-

нитель ПК-6,  $I_{in} = 15$  А; полностью вывести выдержку времени максимальной токовой защиты; установку максимальной токовой защиты по первичному току принять равной 30 А. Для измерения полной проводимости изоляции в сетях 6 кВ высокогорного рудника могут быть использованы и другие методы [13–15].

**Косвенные методы определения полной проводимости** включали: а) метод замыкания фазы на землю через большое сопротивление, дроссель; б) метод искусственного смещения нейтрали при помощи постороннего источника тока. Оба указанных метода измерения полной проводимости сети основываются на методе, предложенном проф. Л. И. Сиротинским [13, 14]. Согласно первому методу одна из фаз сети замыкается на землю через сопротивление (дроссельную катушку). Величина возникшего при этом смещения нейтрали измеряется вольтметром, включенным между землей и искусственно созданной нулевой точкой сети, полученной путем включения в сеть 6 кВ трансформатора напряжения типа НТМИ-6, НТМК-6. Одновременно измеряется ток, протекающий через дроссельную катушку. По величине напряжения смещения нейтрали и величине тока через дроссельную катушку определяется ток ОЗЗ по формуле:

$$I_0 = I_{cc} \frac{U_{ph}}{U_{nbv}}, \quad (4)$$

где  $I_0$  – ток ОЗЗ, А;  $I_{cc}$  – ток, протекающий через дроссельную катушку, А;  $U_{nbv}$  – напряжение смещения нейтрали, вызванное включением дроссельной катушки, кВ.

Метод проф. Л.И. Сиротинского предполагает, что система, в которой производится измерение тока ОЗЗ, симметрична; векторы фазных напряжений равны между собой и сдвинуты на  $120^\circ$ , естественное напряжение смещения нейтрали сети относительно земли  $U_0 = 0$ . При замыкании на землю одной из фаз сети через дроссельную катушку происходит смещение нейтрали сети, величина которого зависит от фазного напряжения сети и параметров дроссельной катушки. Однако в практике эксплуатации электрических сетей из-за разной проводимости изоляции фаз относительно земли симметрия фазных напряжений нарушается, что приводит к появлению естественного смещения нейтрали сети  $U_0$  относительно земли. Включение дополнительной проводимости – дроссельной катушки – в одну из фаз сети приводит к изменению величины  $U_0$  до нового значения, обусловленного сложением векторных значений величин  $\vec{U}_0$  и  $\vec{U}_{nbv}$  – напряжения смещения нейтрали сети относительно земли, вызываемого включением дросселя. Понимание процессов определения электрических величин представляется на векторной диаграмме [13, 14].

Исследования показали, что метод проф. Л. И. Сиротинского применим и при наличии естественного смещения нейтрали, если в знаменатель формулы (4) подставлять только ту часть результирующего напряжения смещения нейтрали  $\vec{U}_{nbv}$ , которая обусловлена включением дросселя во все фазы сети. Если естественное смещение нейтрали по результатам измерений равно  $U_0$ , а после поочередного включения дрос-

селя в разные фазы сети оказалось соответственно равным  $\bar{U}_{01}, \bar{U}_{02}, \bar{U}_{03}$ , то величина напряжения смещения нейтрали сети, обусловленная включением дросселя  $\bar{U}_{nbvi}$ , будет равна:

$$\bar{U}_{nbvi} = \bar{U}_{0i} - \bar{U}_0. \quad (5)$$

Если принять за средние значения величины:

$$I_{nbv.average} = \frac{I_{nbv1} + I_{nbv2} + I_{nbv3}}{3}, \text{ A};$$

$$U_{ph} = \frac{U_{ph1} + U_{ph2} + U_{ph3}}{3}, \text{ кВ};$$

$$U_{nbv.average} = \frac{U_{nbv1} + U_{nbv2} + U_{nbv3}}{3}, \text{ кВ},$$

то формула (4) будет записана в виде:

$$I_0 = I_{nbv.average} \frac{U_{ph}}{U_{nbv.average}}, \text{ A}. \quad (6)$$

При отсутствии естественного смещения нейтрали в сети,  $U_0 = 0$ , на основании формул (4), (5):  $U_{nbvi} = U_{0i} = U_{nbv}$ , выражение (6) превращается в формулу (4). Очевидная сложность работы с векторными величинами и громоздкость графических построений затрудняют практическое применение этого метода в представленном виде. На практике находит применение несколько упрощенный метод расчета, значительно сокращающий объем и сложность измерений, позволяющий вести вычисления не с векторами, а со скалярными величинами. Несколько повышенная погрешность расчетов (до 15 %) не оказывает существенного влияния на практические вычисления [16]. При расчете тока замыкания на землю  $I_0$  по упрощенному методу вместо величины напряжения смещения нейтрали  $U_{nbv.average}$  в формулу (6) подставляется среднеарифметическое значение напряжения смещения  $U_{0average}$ , замеренное при включении дросселя поочередно в три фазы сети, кВ:

$$U_{0average} = \frac{U_{01} + U_{02} + U_{03}}{3}.$$

Относительная ошибка расчетов  $\beta$  равна:

$$U_{0average} = \frac{U_{0average} - U_{nbv.average}}{U_{nbv.average}} \cdot 100\%. \quad (7)$$

При  $U_0/U_{0average} \leq 0,65$   $\beta$  не превышает 15%.

При замене  $U_{nbv.average} = U_{0average}$  зависит от отношения:  $U_0/U_{0average}$  и при  $U_0/U_{0average} \leq 0,65$  не превышает 15 %. График зависимости  $\beta = f(U_0/U_{0average})$  представлен на рис. 3.

Измеряется фазное напряжение сети  $U_{ph}$  относительно земли по показаниям вольтметров  $V_1, V_2$  и  $V_3$  при полной обмотке трансформаторов напряжения НТМИ-6 (НТМК-6). Измеряется естественное смещение нейтрали  $U_0$  при помощи измерительного трансформатора типа НОМ-6 и вольтметра  $V_5$ , включенного во вторичную обмотку НОМ-6. Кроме того, значение можно измерить с помощью вольтметра  $V_5$  или  $V_4$ , включенного в обмотку по схеме открытого треугольника. Дроссель поочередно включается между фазами 1, 2, 3 и землей, одновременно измеряется напряже-

ние смещения нейтрали  $U_{01}, U_{02}, U_{03}$  ( $V_5$ ), и по показанию амперметра (А) определяется значение тока в дросселе  $I_{cc1}, I_{cc2}$  и  $I_{cc3}$ . Находятся величины  $U_{0average}$  и  $I_{nbv.average}$  и отношение  $U_0/U_{0average}$ .

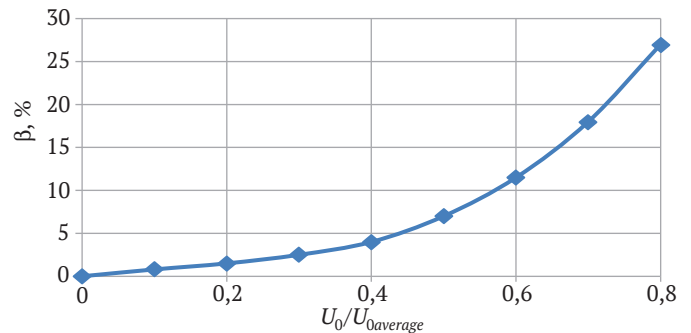


Рис. 3. График зависимости  $\beta = f(U_0/U_{0average})$

Fig. 3. Dependence graph  $\beta = f(U_0/U_{0average})$

По результатам представленной зависимости находится относительная погрешность расчетов  $\beta$  исходя из отношения  $U_0/U_{0average}$  (см. кривая, рис. 3) и вычисляется величина смещения нейтрали, обусловленная только включением дросселя, кВ:

$$U_{nbv.average} = \frac{U_{0average}}{1 + \frac{\beta\%}{100}}. \quad (8)$$

Рассчитывается величина полного тока ОЗЗ и полной проводимости изоляции фаз сети относительно земли:

$$I_0 = I_{nbv.average} \frac{U_{ph}}{U_{nbv.average}}; \quad y_0 = \frac{I_0}{U_{ph}} = \frac{I_{nbv.average}}{U_{nbv.average}}.$$

Для определения тока ОЗЗ и полной проводимости изоляции фаз сети относительно земли предлагается следующий порядок проведения измерений (рис. 4).

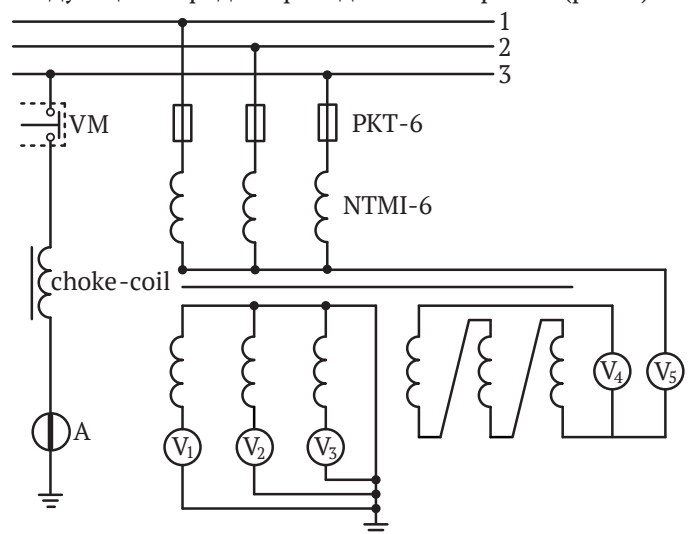
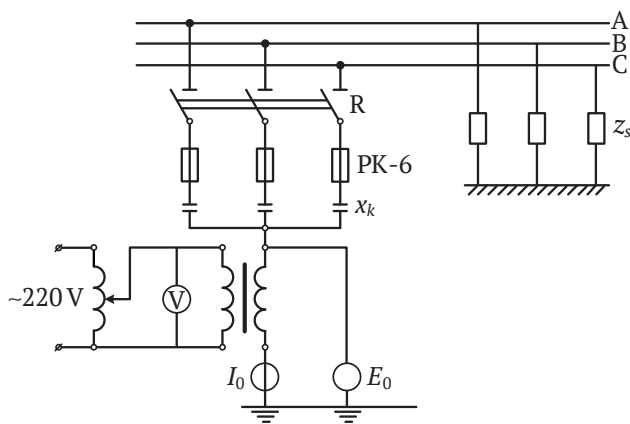


Рис. 4. Порядок проведения измерений для определения тока ОЗЗ и полной проводимости изоляции фаз сети относительно земли

Fig. 4. Measurement procedure for determining the single phase-to-ground fault current and total conductivity of insulation of network phases relative to the ground

В процессе эксплуатации электрических сетей значительный интерес представляет регистрация уровня изоляции сети в течение определенного времени. В условиях разветвленной сети рассматриваемого рудника при большом количестве подстанций несомненный интерес представляет характер изменения проводимости сети в течение времени при различного рода оперативных переключениях, изменении схемы и нагрузки в сети. Регистрацию изменения проводимости изоляции сети во времени можно осуществить методом, использующим искусственное смещение нейтрали сети относительно земли от постороннего источника тока. По этому методу полная проводимость изоляции сети вычисляется с использованием результатов двух измерений, выполненных в данной сети по схеме (рис. 5), по формуле, Ом<sup>-1</sup>:

$$y_0 = \frac{I'_0 - I''_0}{E'_0 - E''_0} \quad (9)$$



**Рис. 5.** Метод измерения проводимости изоляции, использующий искусственное смещение нейтрали сети относительно земли от постороннего источника тока

**Fig. 5.** Method for measuring insulation conductivity using artificial displacement of network neutral relative to ground from an external supply source of current

Для получения достоверных результатов  $y_0$ , с относительной погрешностью до 5 %, необходимо, чтобы величина меньшей ЭДС постороннего источника питания  $E''_0$  была больше 60 % напряжения естественного смещения нейтрали сети  $U_0$ .

Второе измерение в сети производится по той же схеме, что и при значении ЭДС постороннего источника  $E'_0 = 1,5U_0$ , что дает возможность более точно зафиксировать разность токов  $I'_0 - I''_0$ , полученных соответственно при первом и втором измерениях. В связи с тем что внутреннее сопротивление источника смещения нейтрали мало, значения  $E'_0$  и  $E''_0$  при измерении можно заменить соответственно напряжениями  $U'_0$  и  $U''_0$ , замеряемыми с помощью приборов.

По графику, представленному на рис. 6, определяется относительная ошибка  $\sigma$ , %, при соответствующих значениях коэффициента  $K$  и угла  $\alpha$ . Коэффициент  $K$  показывает отношение тока искусственного смещения  $I'_0$  к току естественного смещения  $I_0$ , который можно измерить замыканием нулевой точки системы через амперметр на землю или рассчитать приближенно по формуле [14], А:

$$I_0 \approx U_0 \cdot y_0 \quad (10)$$

Уточненное значение проводимости изоляции  $y_0$  определяется по выражению:

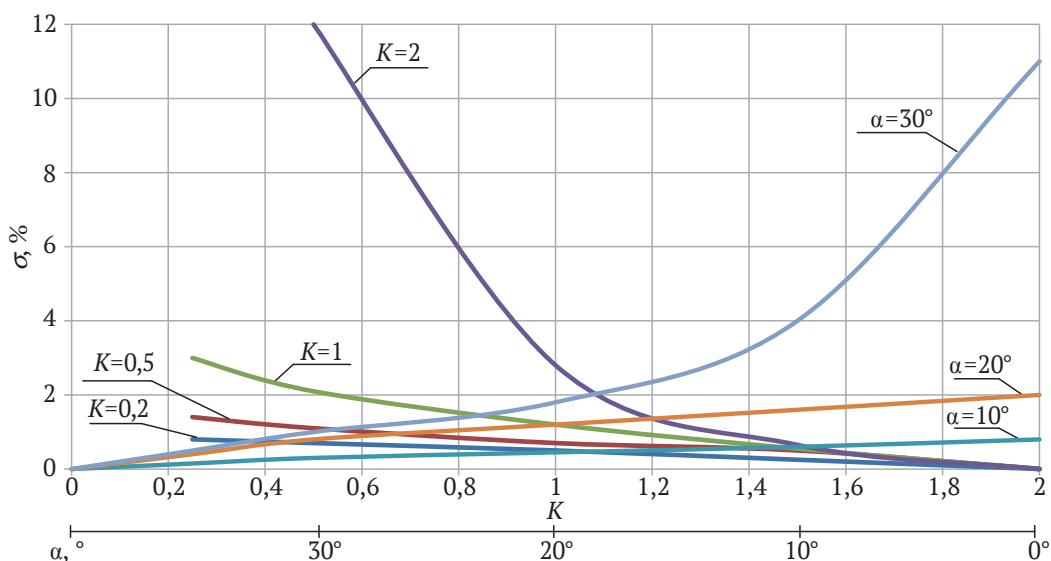
$$y_0 = \frac{y'_0}{1 - \frac{\sigma\%}{100}} \quad (11)$$

Ток замыкания на землю определяется по формуле, А:

$$I_0 = U_{ph} y_0 \quad (12)$$

Таким образом, надежность работы отдельных участков и всей сети в целом определяется следующими факторами:

– состоянием изоляции электрической (преимущественно кабельной) сети, наличием постоянного



**Рис. 6.** График определения относительной ошибки  $\sigma$ , %, при соответствующих значениях коэффициента  $K$  и угла  $\alpha$

**Fig. 6.** Graph for determining the relative error  $\sigma$ , %, at the corresponding values of  $K$  coefficient and angle  $\alpha$



автоматического контроля изоляции, способов определения мест повреждения и быстрого восстановления электрической прочности изоляции;

– существующей схемой электроснабжения и общей протяженностью сети, питающейся от одного источника питания, определяющей величину тока ОЗЗ и внутренних перенапряжений в сети и вероятность их перехода в многофазные КЗ;

– величинами многофазных КЗ в сети, наличием на подстанциях надежной коммутационной отключающей аппаратуры в сочетании с быстродействующей селективной защитой;

– резервированием отдельных элементов сети, определяемым схемой электроснабжения рудника.

### Заключение

В результате проведенных исследований дана оценка эксплуатационной надежности электроснабжения развивающихся участков добычи руд на высокогорном руднике для обеспечения более высокой гибкости системы электроснабжения горных работ, а также повышения надежности и безопасности электрических установок в сетях различных напряжений при расширении фронта горных работ как подземным, так и открытым способами. Представленные результаты исследований имеют важное значение при реализации образовательных программ подготовки горных инженеров [17].

Выводы:

1. Установлено, что при существующей схеме раздельного питания сетей напряжением 6 кВ от подстанций полные токи замыкания на землю для этих сетей соответственно равны:  $I_{030} = 17,5$  А и  $I_{0116} = 12,2$  А и достигают предельных значений, при которых возможно их отключение разъединителями (предельный ток составляет 20 А).

2. Определены полные сопротивления изоляции сетей, которые равны:  $z_{030} = 198$  Ом и  $z_{0116} = 284$  Ом и являются низкими для сетей напряжением 6 кВ. При этом омическое сопротивление изоляции трех фаз в среднем не превышает:  $R_{0,average} = 343 \cdot 10^5$  и составляет около 100 Ом/В или на одну фазу 300 Ом/В, что значительно ниже рекомендуемой для электрооборудования величины 1000 Ом/В.

3. Обосновано, что при полной проводимости сети  $y_0 = 5050 \cdot 10^{-6}$  Ом<sup>-1</sup> и  $y_0 = 3520 \cdot 10^{-6}$  Ом<sup>-1</sup> на три порядка выше, чем омическая проводимость  $g_0 = 2,8 \cdot 10^{-6}$  Ом<sup>-1</sup>, которой можно пренебречь и считать, что емкостная проводимость  $b_0$  равна полной проводимости изоляции  $y_0$ :  $b_0 = y_0 = 1/x_0 = \omega \cdot C_e \cdot l_{cable}$  (здесь  $C_e$  – удельная емкость сети, мкФ/км).

4. Рекомендована формула полного тока замыкания на землю в подземных сетях напряжением 6 кВ и улучшенным электрическим коэффициентом для отдельных элементов сети  $K_{эл} = 1700$  при погрешности расчета не более 7 %.

### Список литературы

1. Ляшенко В. И., Франчук В. П., Кислый Б. П. Модернизация технико-технологического комплекса уранодобывающего производства. *Горный журнал*. 2015;(1):26–32. <https://doi.org/10.17580/gzh.2015.01.05>
2. Пучков Л. А., Пивняк Г. Г. (ред.) *Электрификация горного производства*. В 2-х томах. М: Изд-во Московского государственного горного университета; 2007.
3. Kaboli S., Selvaraj J., Rahim N. Long-term electric energy consumption forecasting via artificial cooperative search algorithm. *Energy*. 2016;115(1):857–871. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2016.09.015>
4. Meira de Oliveira E., Cyrino Oliveira F. L. Forecasting mid-long term electric energy consumption through bagging ARIMA and exponential smoothing methods. *Energy*. 2018;144(1):776–788. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2017.12.049>
5. Садридинов А. Б. Анализ энергетических показателей работы горнопроходческих комплексов угольной шахты. *Горные науки и технологии*. 2020;5(4):367–375. <https://doi.org/10.17073/2500-0632-2020-4-367-375>
6. Ляшенко В. И., Хоменко О. Е., Голик В. И. Развитие природоохранных и ресурсосберегающих технологий подземной добычи руд в энергонарушенных массивах. *Горные науки и технологии*. 2020;5(2):104–118. <https://doi.org/10.17073/2500-0632-2020-2-104-118>
7. Bornschlegl M., Bregulla M., Franke J. Methods-energy measurement – an approach for sustainable energy planning of manufacturing technologies. *Journal of Cleaner Production*. 2016;135(1):644–656. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2016.06.059>
8. Biel K., Glock C. Systematic literature review of decision support models for energy-efficient production planning. *Computers & Industrial Engineering*. 2016;101:243–259. <https://doi.org/10.1016/j.cie.2016.08.021>
9. Бухтояров В. Ф. *Защита от замыканий на землю электроустановок карьеров*. М.: Недра; 1986. 184 с.
10. Цапенко Е. Ф. *Замыкания на землю в сетях 6–35 кВ*. М.: Энергоатомизда; 1986. 128 с.
11. Клюев Р. В., Босиков И. И., Майер А. В., Гаврина О. А. Комплексный анализ применения эффективных технологий для повышения устойчивого развития природно-технической системы. *Устойчивое развитие горных территорий*. 2020;(2):283–290. <https://doi.org/10.21177/1998-4502-2020-12-2-283-290>





12. Ключев Р. В., Босиков И. И., Гаврина О. А., Атрушкевич В. А. Выбор средств защиты высоковольтного двигателя экскаватора на руднике открытых работ горно-металлургического комбината. *Безопасность труда в промышленности*. 2020;(7):46–53. <https://doi.org/10.24000/0409-2961-2020-7-46-53>
13. Сиротинский Л. И. *Техника высоких напряжений*. Ч. 3. Вып. 1: Волновые процессы и внутренние перенапряжения в электрических системах. М: Госэнергоиздат; 1959. 368 с.
14. Ульянов С. А. *Электромагнитные переходные процессы в электрических системах*. М.: Энергия; 1970. 520 с.
15. Zhukovskiy Y., Batueva D., Buldysko A., Shabalov M. Motivation towards energy saving by means of IoT personal energy manager platform. *Journal of Physics: Conference Series*. 2019;1333(6):062033. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/1333/6/062033>
16. Ключев Р. В., Босиков И. И., Гаврина О. А. Повышение эффективности релейной защиты на горно-обогатительном комбинате. *Записки Горного института*. 2021;248:300–311. <https://doi.org/10.31897/PMI.2021.2.14>
17. Верчеба А. А. Подготовка кадров для горно-геологической отрасли России. *Горные науки и технологии*. 2021;6(2):144–153. <https://doi.org/10.17073/2500-0632-2021-2-144-153>

### References

1. Lyashenko V. I., Franchuk V. P., Kisly B. P. Reengineering of technical-and-technological structure of uranium mine. *Gornyi Zhurnal*. 2015;(1):26–32. (In Russ.). <https://doi.org/10.17580/gzh.2015.01.05>
2. Puchkov L. A., Pivnyak G. G. (eds.). *Electrification of mining production*. In 2 volumes. Moscow: Moscow State Mining University Publ.; 2007. (In Russ.)
3. Kaboli S., Selvaraj J., Rahim N. Long-term electric energy consumption forecasting via artificial cooperative search algorithm. *Energy*. 2016;115(1):857–871. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2016.09.015>
4. Meira de Oliveira E., Cyrino Oliveira F. L. Forecasting mid-long term electric energy consumption through bagging ARIMA and exponential smoothing methods. *Energy*. 2018;144(1):776–788. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2017.12.049>
5. Sadridinov A. B. Analysis of energy performance of heading sets of equipment at a coal mine. *Mining Science and Technology (Russia)*. 2020;5(4):367–375. (In Russ.). <https://doi.org/10.17073/2500-0632-2020-4-367-375>
6. Lyashenko V. I., Khomenko O. E., Golik V. I. Development of environment-friendly and resource-saving methods of underground ore mining in disturbed rock masses. *Mining Science and Technology (Russia)*. 2020;5(2):104–118. (In Russ.). <https://doi.org/10.17073/2500-0632-2020-2-104-118>
7. Bornschlegl M., Bregulla M., Franke J. Methods-energy measurement – an approach for sustainable energy planning of manufacturing technologies. *Journal of Cleaner Production*. 2016;135(1):644–656. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2016.06.059>
8. Biel K., Glock C. Systematic literature review of decision support models for energy-efficient production planning. *Computers & Industrial Engineering*. 2016;101:243–259. <https://doi.org/10.1016/j.cie.2016.08.021>
9. Bukhtoyarov V. F. Ground fault protection of open pit electric installations. Moscow: Nedra Publ.; 1986. 184 p. (In Russ.)
10. Tsapenko E. F. The earth faults in 6-35 kV electricity supply networks. Moscow: Energoatomizdat Publ.; 1986. 128 p. (In Russ.)
11. Klyuev R. V., Bosikov I. I., Mayer A. V., Gavrina O. A. Comprehensive analysis of the effective technologies application to increase sustainable development of the natural-technical system. *Sustainable Development of Mountain Territories*. 2020;(2):283–290. <https://doi.org/10.21177/1998-4502-2020-12-2-283-290>
12. Klyuev R. V., Bosikov I. I., Gavrina O. A., Atrushkevich V. A. Selection of protection means for high-voltage excavator engine at the open-pit mine of the mining and metallurgical plant. *Bezopasnost' Truda v Promyshlennosti*. 2020;(7):46–53. (In Russ.). <https://doi.org/10.24000/0409-2961-2020-7-46-53>
13. Sirotsky L. I. *High voltage equipment*. Part. 3, Vol. 1: Wave processes and internal overvoltages in electrical systems. Moscow: Gosenergoizdat Publ.; 1959. 368 p. (In Russ.)
14. Ulyanov S. A. *Electromagnetic transient phenomena in electrical systems*. Moscow: Energiya Publ.; 1970. 520 p. (In Russ.)
15. Zhukovskiy Y., Batueva D., Buldysko A., Shabalov M. Motivation towards energy saving by means of IoT personal energy manager platform. *Journal of Physics: Conference Series*. 2019;1333(6):062033. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/1333/6/062033>
16. Klyuev R. V., Bosikov I. I., Gavrina O. A. Improving the efficiency of relay protection at a mining and processing plant. *Journal of Mining Institute*. 2021;248:300–311. <https://doi.org/10.31897/PMI.2021.2.14>
17. Vercheba A. A. Personnel training for the mining and geological sector of Russia. *Mining Science and Technology (Russia)*. 2021;6(2):144–153. <https://doi.org/10.17073/2500-0632-2021-2-144-153>



### Информация об авторах

**Роман Владимирович Клюев** – доктор технических наук, профессор кафедры «Техника низких температур им. П. Л. Капицы», Московский политехнический университет, г. Москва, Российская Федерация; ORCID [0000-0003-3777-7203](https://orcid.org/0000-0003-3777-7203), SCOPUS ID [57194206632](https://scopus.com/authorid/57194206632); e-mail [kluev-roman@rambler.ru](mailto:kluev-roman@rambler.ru)

**Игорь Иванович Босиков** – кандидат технических наук, доцент кафедры «Прикладная геология», Северо-Кавказский горно-металлургический институт (государственный технологический университет), г. Владикавказ, Российская Федерация; ORCID [0000-0001-8930-4112](https://orcid.org/0000-0001-8930-4112), SCOPUS ID [56919738300](https://scopus.com/authorid/56919738300); e-mail [igor.boss.777@mail.ru](mailto:igor.boss.777@mail.ru)

**Оксана Александровна Гаврина** – кандидат технических наук, доцент кафедры «Электроснабжение промышленных предприятий» Кавказский горно-металлургический институт (государственный технологический университет), г. Владикавказ, Российская Федерация; ORCID [0000-0002-9712-9075](https://orcid.org/0000-0002-9712-9075), SCOPUS ID [57204639532](https://scopus.com/authorid/57204639532); e-mail [Gavrina-Oksana@yandex.ru](mailto:Gavrina-Oksana@yandex.ru)

**Василий Иванович Ляшенко** – кандидат технических наук, ст. науч. сотрудник, Украинский научно-исследовательский и проектно-изыскательский институт промышленной технологии, г. Желтые Воды, Украина; SCOPUS ID [8915855500](https://scopus.com/authorid/8915855500); e-mail [vilyashenko2017@gmail.com](mailto:vilyashenko2017@gmail.com)

### Information about the authors

**Roman V. Klyuev** – Dr. Sci. (Eng.), Professor of the Department of the Technique of Low Temperature name P. L. Kapitza, Moscow Polytechnic University, Moscow, Russian Federation; ORCID [0000-0003-3777-7203](https://orcid.org/0000-0003-3777-7203), SCOPUS ID [57194206632](https://scopus.com/authorid/57194206632); e-mail [kluev-roman@rambler.ru](mailto:kluev-roman@rambler.ru)

**Igor I. Bosikov** – Cand. Sci. (Eng.), Assoc. Professor of the Applied Geology Department, North Caucasian Institute of mining and metallurgy (State Technological University), Vladikavkaz, Russian Federation; ORCID [0000-0001-8930-4112](https://orcid.org/0000-0001-8930-4112), SCOPUS ID [56919738300](https://scopus.com/authorid/56919738300); e-mail [igor.boss.777@mail.ru](mailto:igor.boss.777@mail.ru)

**Oksana A. Gavrina** – Cand. Sci. (Eng.), Assoc. Professor of the Industrial Power Supply Department, North Caucasian Institute of mining and metallurgy (State Technological University), Vladikavkaz, Russian Federation; ORCID [0000-0002-9712-9075](https://orcid.org/0000-0002-9712-9075), SCOPUS ID [57204639532](https://scopus.com/authorid/57204639532); e-mail [Gavrina-Oksana@yandex.ru](mailto:Gavrina-Oksana@yandex.ru)

**Vasiliy I. Lyashenko** – Cand. Sci. (Eng.), Senior Research Fellow, Ukrainian Research and Design Institute for Industrial Technology, Zholti Vody, Ukraine; SCOPUS ID [8915855500](https://scopus.com/authorid/8915855500); e-mail [vilyashenko2017@gmail.com](mailto:vilyashenko2017@gmail.com)

Поступила в редакцию	30.07.2021	Received	30.07.2021
Поступила после рецензирования	31.08.2021	Revised	31.08.2021
Принята к публикации	15.09.2021	Accepted	15.09.2021