

ВЫСОКОВОЛЬТНАЯ КАРЬЕРНАЯ ПЕРЕГОННАЯ СТАНЦИЯ: АНАЛИЗ ЭЛЕКТРОБЕЗОПАСНОСТИ

С.И. Малафеев^{1,2}, В.И. Микрюков², А.А. Малафеева¹

¹ Владимирский государственный университет имени А.Г. и Н.Г. Столетовых, Владимир, Россия,
e-mail: simalafeev@gmail.com

² ООО Компания «Объединенная Энергия», Москва, Россия

Аннотация: Рассмотрены вопросы безопасной работы электрооборудования высоковольтной (6 кВ) станции при перегоне экскаваторов на карьере. Перегонная станция представляет собой мобильный комплекс с установленной на автомобиле автономной энергетической установкой, включающей дизельный двигатель, синхронный генератор, электрическое распределительное устройство и систему управления. Корпуса оборудования станции соединяются металлической связью с рамой базовой автомашины. Для подключения экскаватора к перегонной станции используется штатный пятижильный кабель марки КГЭ с контрольной жилой заземления. Электрическое соединение корпусов экскаватора и станции осуществляется четвертой жилой кабеля. Электрическая система «перегонная станция — экскаватор» напряжением 6 кВ с изолированной нейтралью представляет один автономный замкнутый контур, в котором металлические корпуса электрически замкнуты жилой заземления в кабеле. Изолированные силовые жилы кабеля имеют проводящий слой, который при повреждении обеспечивает их замыкание на жилу заземления и срабатывание защиты от замыканий на корпус. Замкнутая система электропитания не имеет ответвлений и снабжена защитами от замыканий на корпус. Применение специального кабеля с металлическим экраном и заполнением полупроводниковым проводящим материалом, соединение корпусов экскаватора и перегонной станции металлической связью, отсутствие дополнительных присоединений и короткая линия электрической связи между машинами обеспечивают дополнительно повышенную безопасность. Расчетные параметры токов однофазного замыкания и напряжений прикосновения не превышают предельных значений, установленных ГОСТ 12.1.038-82 ($U = 550$ В; $I = 650$ мА). Безопасная эксплуатация перегонной станции обеспечивается при эффективной защите при нарушении изоляции. Комплект защит перегонной станции обеспечивает отключение при однофазном замыкании на землю в течение 70 мс.

Ключевые слова: напряжение, ток, безопасность, генератор, кабель, изоляция, защита.

Для цитирования: Малафеев С. И., Микрюков В. И., Малафеева А. А. Высоковольтная карьерная перегонная станция: анализ электробезопасности // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2022. – № 3. – С. 143–153. DOI: 10.25018/0236_1493_2022_3_0_143.

High-voltage mobile station in open pit mine: Electrosafety analysis

S.I. Malafeev^{1,2}, V.I. Mikryukov², A.A. Malafeeva¹

¹ Alexander and Nikolay Stoletovs Vladimir State University, Vladimir, Russia, e-mail: simalafeev@gmail.com

² «Joint Power» Company, Ltd, Moscow, Russia

Abstract: The article addresses safety of a high-voltage (6 kV) mobile station to feed shovels in an open pit mine. The station is a mobile truck-mounted self-sustaining power plant including a diesel engine, a synchronous generator, an electrical switching center and a control system. The housings of the plant equipment have metallic bonding with the master truck frame. The mobile station and shovel connection uses a standard five-cord cable KGE with an earthing pilot. The electrical connection between the housings of shovels and the station uses the fourth cord of the cable. The mobile station–shovel system with voltage of 6 kV and with an insulated neutral represents a joint independent closed circuit with all metal housings electrically closed by the earthing cord in the cable. The insulated cords of the cable have a conducting layer which ensures their bridging to the earthing cord in case of damage and actuates the frame ground protection. The closed power supply system has no branching and is fitted with the frame ground protection. The special cable with metallic shield and semi-conducting filler, the metallic bonding between the housings of the shovels and ferry station, no additional linkages and the short-line electric connection between the machines ensure improved safety. The estimated parameters of the line-to-earth fault currents and contact voltages are lower than the limits set by the state standard (GOST 12.1.038-82: $I=650$ mA; $U=550$ V). Safe operation of the mobile station is ensured in case of effective protection of insulation damage. The protection package of the mobile station provides cutoff in case of line-to-earth fault within 70 ms.

Key words: voltage, current, safety, generator, cable, insulation, protection.

For citation: Malafeev S. I., Mikryukov V. I., Malafeeva A. A. High-voltage mobile station in open pit mine: Electrosafety analysis. *MIAB. Mining Inf. Anal. Bull.* 2022;(3):143-153. [In Russ]. DOI: 10.25018/0236_1493_2022_3_0_143.

Введение

Низковольтные мобильные электрические станции используются при отсутствии стационарных электрических линий на предприятиях добывающей промышленности при перемещении карьерных машин: экскаваторов, буровых станков и др. Такие станции обычно содержат преобразователи, к которым подключаются двигатели хода при передвижении экскаватора. Недостатками такого технического решения являются необходимость изменений в электрической схеме привода хода при подключении станции и специальной настройки преобразователей для каждого экскаватора, использование кабелей большого сечения, большие потери напряжения и мощности в низковольтном кабеле. В Компании «Объединенная Энергия», г. Москва, впервые в России разработа-

на серия высоковольтных станций различной мощности напряжением 6 кВ [1, 2]. Станции предусматривают подключение к высоковольтному штатному вводу карьерной машины. В этом случае горная машина, например экскаватор, переводится в режим «Ход»; привод хода работает в обычном режиме. При остановке экскаватора и переводе в режим «Экскавация» возможны перемещение стрелы, например, подъем и опускание ковша, и поворот платформы. Станция обеспечивает перегон электрических экскаваторов и буровых станков с любыми типами приводов.

Высоковольтная перегонная станция представляет собой объект повышенной опасности на карьере. Поэтому при эксплуатации такого оборудования должен быть реализован комплекс мероприятий, обеспечивающий при эффективной ра-

боте полную электрическую безопасность [3–6].

Перегонная станция в части электробезопасности должна соответствовать требованиям действующих нормативных документов, в том числе ПУЭ, ред. 7; ГОСТ 3115-2014; ГОСТ 12.1.030-81; ГОСТ 165556-81; РД 06-572-03 (Инструкция по безопасной эксплуатации электроустановок в горнорудной промышленности) [3].

В настоящей статье приведены основные результаты анализа электрической опасности для персонала при эксплуатации высоковольтной перегонной станции на карьере и дано краткое описание системы защиты.

Работа электрооборудования при перегоне карьерного экскаватора

Экскаваторная перегонная станция (рис. 1) представляет собой мобильный комплекс на автомобиле КАМАЗ с установленными на нем автономной энергетической установкой, включающей дизельный двигатель, синхронный генератор, электрическое распределительное устройство и систему управления [2]. Для подключения экскаватора к перегонной станции используется штатный пятижильный кабель марки КГЭ с контрольной жилой заземления. Сечение жилы кабеля зависит от типа экскаватора, длина кабеля обычно составляет $L = 200$ м. Все оборудование

высоковольтной генераторной станции (компоненты шкафов, корпуса электрических машин и аппаратов) заземляется к основанию модуля, которое соединяется металлической связью с рамой базовой автомашины.

Заземляющие жилы высоковольтного кабеля станции, проложенного от силового генератора к распределительному шкафу, измерительному трансформатору, трансформатору нулевой последовательности, присоединяются к заземляющим болтам электрических машин и агрегатов. Электрическое соединение корпусов экскаватора и станции осуществляется четвертой жилой кабеля. Целостность цепи этого соединения контролируется защитой «КЖЗ» (контроль жилы заземления) с действием без выдержки времени на отключение главного контактора 6 кВ.

Таким образом, электрическая система электроснабжения напряжением 6 кВ с изолированной нейтралью представляет один автономный замкнутый контур, в котором металлические корпуса электрически замкнуты жилой заземления (площадь сечения жилы $S = 16$ мм²) в кабеле. Изолированные силовые жилы кабеля имеют проводящий слой, который при повреждении обеспечивает их замыкание на жилу заземления и срабатывание защиты от замыканий на корпус. Замкнутая система электропитания не имеет ответвлений и снабжена защитами от замыканий на корпус («землю»).

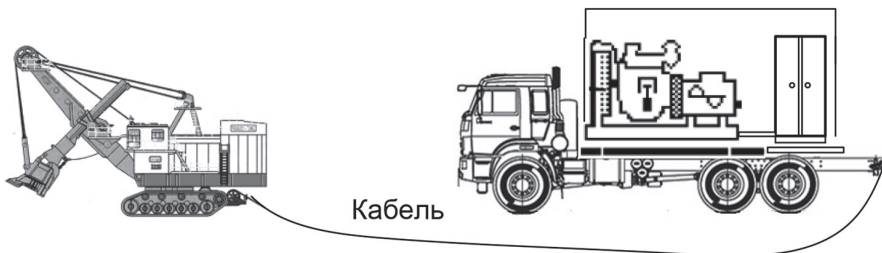


Рис. 1. Экскаваторная перегонная станция

Fig. 1. Mobile shovel power station

Для электрической сети с изолированной нейтралью основную опасность представляют замыкания на землю [7–10]. Для таких установок «Правилами безопасности при ведении горных работ и переработке полезных ископаемых» и ПУЭ допускается не выполнять защитное заземление. Безопасная работа персонала в электроустановках обеспечивается средствами защиты, в том числе защитным отключением [10–13].

Основные характеристики системы электропитания экскаватора от перегонной станции

Основными параметрами электрической системы перегонная станция – экскаватор, влияющими на опасность для персонала, являются емкости фаз и сопротивление заземления. Длина кабелей между перегонной и горной машиной составляет $L = 200$ м. Активное сопротивление жилы заземления кабеля сечением 16 мм^2 составляет $0,21$ Ом. Собственная емкость электрооборудования 6 кВ перегонной станции относительно корпуса – $C_{\text{ст}} = 0,017$ мкФ. Емкость дополнительных конденсаторов, включенных между фазами и жилой заземления на перегонной станции, составляет $C_{\text{д}} = 0,08$ мкФ. Собственная

Таблица 1

Удельные величины емкостей, полные емкости, токи, напряжения и значения количества электричества через тело человека при ОЗЗ
Specific capacitances, total capacitances, currents, voltages and the quantities of electric charge through human body in case of line-to-ground fault

Тип кабеля КГЭ	$C_{\text{уд}}$, мкФ/км	C , мкФ	I_3 , mA	$U_{\text{зм}}$, В	$R_{\text{зм}}$, Ом	Q (0,07с), мА·с
3×25+1×10	0,28	0,147	450	450	521	31,5
3×35+1×10	0,32	0,155	506	506	493	35,4
3×50+1×16+1×10	0,35	0,161	525	525	476	36,8
3×70+1×16+1×10	0,39	0,169	551	551	453	38,6

Примечание. В таблице $C_{\text{уд}}$ приведено по данным НИКИ; C – полная емкость фазы, вычисленная по формуле (1); I_3 – ток однофазного замыкания на землю, рассчитанный по формуле (3); $U_{\text{зм}}$ – напряжение прикосновения; $R_{\text{зм}}$ – максимальное сопротивление заземлителя, рассчитанное по формуле (2); Q – количество электричества через тело человека в случае прикосновения за время 0,07 с.

емкость электрооборудования экскаватора (трансформаторов и кабелей) – $C_3 = 0,004$ мкФ.

Полная емкость (мкФ) фазы определяется по формуле

$$C = C_3 + C_{\text{ст}} + C_{\text{д}} + Lc_{\text{уд}} = 0,091 + Lc_{\text{уд}} \quad (1)$$

где L – длина кабеля; $c_{\text{уд}}$ – удельная емкость кабеля.

В табл. 1 приведены величины удельных емкостей кабелей по данным Научно-исследовательского проектно-конструкторского и технологического кабельного института (НИКИ), г. Томск, и полных емкостей для разных кабелей длиной 200 м.

Согласно ГОСТ 12.1.030-81 в электроустановках напряжением выше 1000 В с изолированной нейтралью сопротивление заземляющего устройства не должно быть более

$$R_{\text{з.м}} = 250 / I_3 \quad (2)$$

где I_3 – расчетный ток однофазного замыкания на землю.

Экскаватор имеет самозаземление. Сопротивление самозаземления зависит от свойств грунта, его влажности и температуры. По данным исследований, приведенных в [14], отношение сопротивления самозаземления к сопротивле-

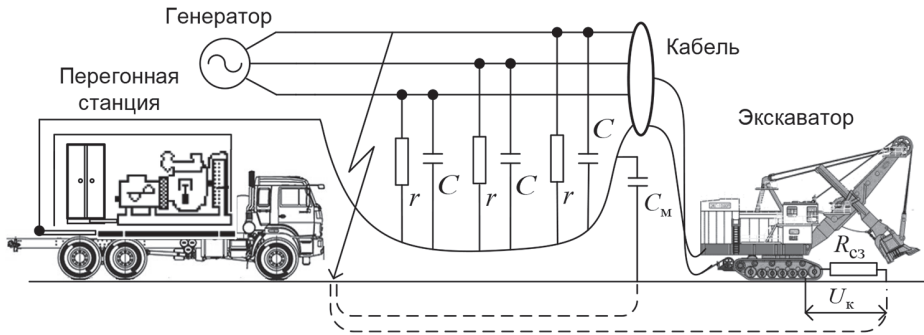


Рис. 2. Схема однофазного замыкания на землю

Fig. 2. Line-to-ground fault circuit

нию местных (стержневых) заземлителей экскаваторов карьерах АК АЛРОСА находится в диапазоне от 1 до 2.

Время срабатывания защиты от однофазных замыканий на землю (ОЗЗ) определяется суммой времени измерения и обнаружения неисправности и времени отключения контактора. Для ненаправленной защиты от ОЗЗ время обнаружения замыкания составляет 0,03... 0,04 с [15]. Время отключения контактора равняется 0,025 с. Таким образом, можно принять, что время срабатывания защиты не превышает 0,07 с.

Ток однофазного замыкания на землю

Для расчета используется схема заземления трехфазной сети 6 кВ в режиме однофазного замыкания на землю (ОЗЗ). Схема представлена на рис. 2. На схеме условно показаны сопротивление самозаземления экскаватора $R_{сз}$ и емкость между металлическим экраном кабеля и землей C_M .

Ток однофазного замыкания на землю определяется по приближенной формуле [16]

$$I_3 = 3U_\phi \omega C, \quad (3)$$

где ω — угловая частота сети, $\omega = 314$ рад/с; U_ϕ — фазное напряжение сети, $U_\phi = 6000/\sqrt{3}$ В.

Значения токов однофазного замыкания на землю для различных кабелей приведены в табл. 1. В таблице также представлены значения допустимых сопротивлений заземления, рассчитанные по формуле (2).

Данные токов однофазного замыкания и напряжений прикосновения, приведенные в табл. 1, свидетельствуют о том, что эти параметры не превышают предельных значений, установленных ГОСТ 12.1.038-82 ($U = 550$ В; $I = 650$ мА) [17].

Корпуса перегонной станции и экскаватора соединены четвертой жилой кабеля. В случае однофазного замыкания на землю ток замыкания будет протекать через сопротивление самозаземления экскаватора $R_{сз}$ и емкость кабеля C_M (рис. 2). Корпуса машин, а также все элементы соединяющей их электрической цепи окажутся под напряжением относительно земли. Напряжение на металлических элементах корпусов с учетом соотношения $1/(\omega C_M) \gg R_{сз}$ при этом равно

$$U_k = I_3 R_{сз} = 3U_\phi \omega C R_{сз}.$$

На рис. 3 приведен график напряжения на корпусах машин при замыкании фазы на корпус в зависимости от сопротивления самозаземления для кабеля КГЭ 3×50+1×16+1×10.

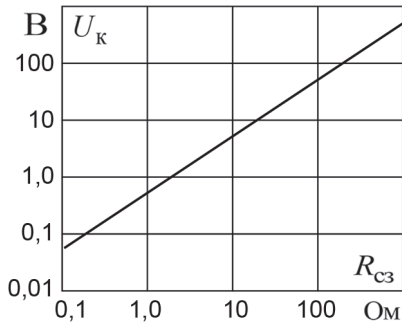


Рис. 3. Зависимость напряжения на корпусах машин от величины сопротивления самозаземления для кабеля КГЭ 3×50+1×16+1×10 длиной 200 м
 Fig. 3. Voltage on machine bodies versus self-earthing resistance for cable KGE 3×50+1×16+1×10 with length of 200 m

Часть тока замыкания протекает через стоящего на земле человека, если он прикасается к корпусу перегонной станции или экскаватора.

На рис. 4 показана электрическая схема системы при замыкании фазы А на корпус перегонной станции или экскаватора.

Активное сопротивление жилы заземления, соединяющей металлические корпуса машин, составляет 0,21 Ом и в расчетах не учитывается.

Ток через тело человека в случае прикосновения к корпусу определяется по формуле

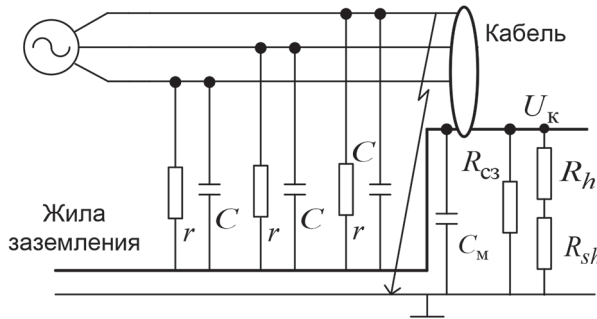


Рис. 4. Эквивалентная схема электрической цепи при действии на корпусе напряжения
 Fig. 4. Equivalent electric circuit in case of voltage on the housing

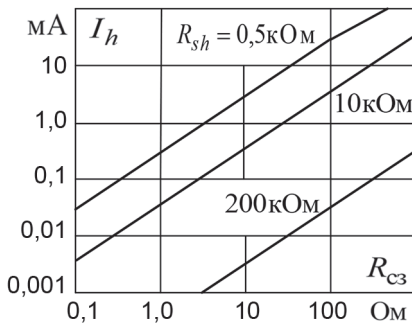


Рис. 5. Зависимости величины тока через тело человека в случае прикосновения к корпусу машины при замыкании фазы на землю от сопротивления самозаземления при разных значениях переходного сопротивления человека — земля
 Fig. 5. Electric current through human body in case of contact with machine housing in line-to-earth fault versus self-earthing resistance at different values of transition human-earth resistance

$$I_h = \frac{3U_{\phi} \omega C R_{c3}}{R_{c3} + R_h + R_{sh}},$$

где R_{sh} — переходное сопротивление человек — земля, включая сопротивление обуви и спецодежды.

На рис. 5 показаны зависимости тока через тело человека в случае прикосновения к корпусу экскаватора или автомобиля от сопротивления самозаземления экскаватора для трех значений переходного сопротивления R_{sh} : 0,5, 10 и 100 кОм ($R_h = 1,0$ кОм).

Например:

в случае $R_{sh} = 0,5$ кОм и $R_{c3} = 100$ Ом имеем $I_h = 32,8$ мА;

в случае $R_{sh} = 0,5$ кОм и $R_{c3} = 10$ Ом имеем $I_h = 3,2$ мА.

Токи и напряжения при однофазном замыкании на корпус перегонной станции или экскаватора

Корпуса перегонной станции и экскаватора соединены четвертой жилой кабеля. В случае однофазного замыкания на корпус одной из машин ток замыкания будет протекать через корпуса машин и жилу заземления (рис. 6).

Ток однофазного замыкания на землю определяется по приближенной формуле (3). Значения тока замыкания на корпус практически совпадают с токами замыкания на землю.

Корпуса машин, а также все элементы соединяющей их электрической цепи при замыкании окажутся соединенными с поврежденной фазой. В сети с изолированной нейтралью при исправной изоляции двух других фаз замкнутый контур протекания тока через землю не образуется. Поэтому прикосновение человека, стоящего на земле, к корпусу машины не представляет опасности.

Напряжение между корпусом и исправной фазой равно линейному напряжению сети. Поэтому при замыкании фазы на корпус прикосновение человека, находящегося на одной из машин, к исправной фазе является смертельно опасным.

При однофазном замыкании происходит срабатывание защиты в течение

70 мс. Работа системы при аварийном режиме не допускается. Поэтому вероятность двухфазного замыкания близка к нулю.

Обеспечение электробезопасности при эксплуатации перегонной станции

Защита персонала от поражения электрическим током, организованная на перегонной станции, состоит из основной защиты, защиты при наличии неисправности и дополнительной защиты [18].

Основная защита исключает прямое прикосновение к находящимся под напряжением (активным) частям электроустановки с помощью: изоляции; двойной или усиленной изоляции; оболочек; ограждений; гальванического разделения цепей (силовых высоковольтных и низковольтных цепей и цепей управления).

Защита при наличии неисправности в случае отказа основной изоляции исключает возникновение опасного напряжения от прикосновения на проводящих частях электроустановки путем автоматического отключения источника питания за установленное время. В перегонной станции предусмотрены следующие защиты:

- по напряжению нулевой последовательности (ННП) при ОЗЗ в любой точке сети с чувствительностью $R = 30 - 40 \text{ кОм}$;

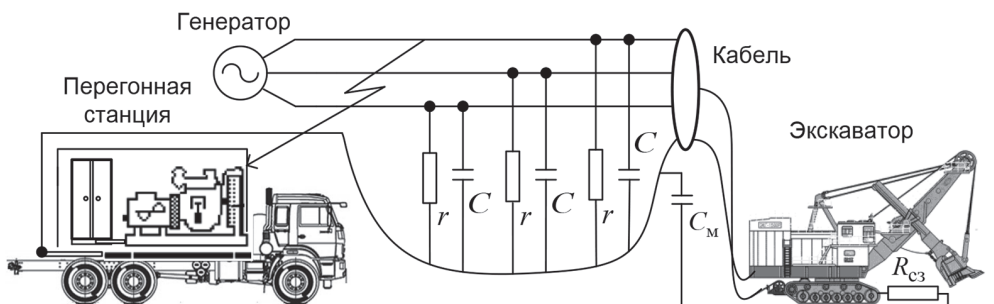


Рис. 6. Схема однофазного замыкания на корпус перегонной станции

Fig. 6. Mobile station frame ground circuit



Рис. 7. Перегон экскаватора ЭКГ-20 на Лебединском ГОКе

Fig. 7. Mobile station at Lebedinsky GOK

- направленная защита при ОЗЗ в присоединении (на экскаваторе или буровом станке) с чувствительностью по току нулевой последовательности $I_0 = 0,2 \text{ A}$;

- направленная защита при ОЗЗ в сети на борту перегонной станции с чувствительностью по току нулевой последовательности $I_0 = 0,2 \text{ A}$;

- защита при двойных замыканиях (ДЗЗ), когда при ОЗЗ происходит замыкание другой фазы на корпус, с уставкой $I_{уст} = 50 \text{ A}$.

Дополнительная защита обеспечивает повышение электробезопасности и отключение источника питания и формирование аварийных сигналов для персонала в случаях отказа основной защиты, отказа защиты при наличии неисправности, а также при повышенной опасности при неблагоприятных условиях.

Дополнительная защита осуществляется дублированием устройств автоматического защитного отключения; применением специальных дополнительных средств, устройств звуковой аварийной сигнализации и средств индивидуальной защиты персонала.

Заключение

Электрическая система «перегонная станция – экскаватор» представляет со-

бой традиционную трехфазную систему с изолированной нейтралью. Такая система характеризуется высоким уровнем электробезопасности.

Применение специального кабеля с металлическим экраном и заполнением полупроводниковым проводящим материалом, соединение корпусов экскаватора и перегонной станции металлической связью, отсутствие дополнительных присоединений и короткая линия электрической связи между машинами дополнительно обеспечивают повышенную безопасность.

Расчетные параметры токов однофазного замыкания и напряжений прикосновения не превышают предельных значений, установленных ГОСТ 12.1.038-82 ($U = 550 \text{ В}$; $I = 650 \text{ мА}$). Безопасная эксплуатация перегонной станции возможна при эффективной защите при нарушении изоляции. Комплект защит перегонной станции обеспечивает отключение в течение 70 мс.

Высоковольтные перегонные станции успешно эксплуатируются в ОАО «Апатит» (мощность дизельного двигателя 560 кВт) и на Лебединском горно-обогатительном комбинате (мощность дизельного двигателя 800 кВт).

На рис. 7 показан перегон экскаватора ЭКГ-20 на Лебединском ГОКе.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Malafeev S. I., Malafeev S. S.* Analysis of a quarry mobile diesel generator station during the moving of an excavator / Proceedings of the 6th International Conference on Industrial Engineering (ICIE 2020), Lecture Notes in Mechanical Engineering. Vol. II. 2021, pp. 803–810. DOI: 10.1007/978-3-030-54817-9_93.

2. *Малафеев С. И., Серебренников Н. А.* Патент РФ № 2670964. МПК H02P 9/48; H02P 9/02; E21C 47/02; E02F 7/02; E02F 9/20. Способ управления электрооборудованием при перегоне экскаватора. Оpubл. 26.10.2018. Бюл. № 33.

3. *Пичуев А. В., Шевырев Ю. В.* Нормативно-правовые положения, регламентирующие условия обеспечения электробезопасности на горных предприятиях России // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2015. – № 9. – С. 365–372.

4. *Binjian Wu, Jianmin Bai, ZhuJun Ling, Zaifu Zhou, Feijie Wang, Shunding Hu, Aijun Liu* The safety design suggestions of autonomous mine transportation system / 2020 IEEE 5th International Conference on Intelligent Transportation Engineering. 2020. Pp. 388–392. DOI: 10.1109/ICITE50838.2020.9231329.

5. *Modern American coal mining. Methods and applications.* Bise C. J. (Ed.) Society for Mining, Metallurgy and Exploration, 2013, 576 p.

6. *Nikulin A., Ikonnikov D., Dolzhikov I.* Smart personal protective equipment in the coal mining industry // International Journal of Civil Engineering and Technology. 2019, vol. 10, no. 4, pp. 852–863. <http://www.iaeme.com/IJCIET/issues.asp?JType=IJCIET&VType=10&IType=4>.

7. *Ляхомский А. В., Герасимов А. И., Перфильева Е. Н.* Моделирование режимов однофазных замыканий на землю в электрических сетях напряжением 6 кВ открытых горных работ // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2021. – № 2. – С. 164–178. DOI: 10.25018/0236-1493-2021-2-0-164-178.

8. *Kuliski K.* Simulation of earth faults in parallel lines in mine medium voltage networks // 2019 IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. 2019, vol. 261, article 012025, pp. 1–9. DOI: 10.1088/1755-1315/261/1/012025.

9. *Diamenu G.* Statistical analysis of electric power distribution grid outages // European Journal of Engineering and Technology Research. 2021, vol. 6, no. 3, pp. 92–98. DOI: 10.24018/ejers.2021.6.3.2406.

10. *Roberts J., Altuve H. J., Hou D.* Review of ground fault protection methods for grounded, ungrounded, and compensated distribution systems. Schweitzer Engineering Laboratories, Inc. Pullman, WA, USA, 2001, 40 p.


11. *Toader D., Vintan M., Solea C., Vesa D.* Marian Greconici Analysis of the possibilities of selective detection of a single line-to-ground fault in a medium voltage network with isolated neutral // Energies. 2021, vol. 14, no. 21, article 7019. DOI: 10.3390/en14217019.

12. *Шуин В. А., Воробьева В. А., Добрягина О. А., Шадрикова Т. Ю.* Принципы выполнения адаптивной токовой защиты от замыканий на землю в некомпенсированных кабельных сетях напряжением 6–10 кВ // Вестник ИГЭУ. – 2018. – № 2. – С. 29–37. DOI: 10.17588/2072-2672.2018.3.029-037.

13. *Pelenev D. N., Abramovich B. N., Sychev Yu. A., Babyr K. V.* Study of the efficiency of the invariant protection against single-phase ground faults in the microprocessor terminals // 2019 IEEE Conference of Russian Young Researchers in Electrical and Electronic Engineering (EIConRus). 2019, pp. 620–625. DOI: 10.1109/EIConRus.2019.8657040.

14. *Найденев А. И., Дмитриев Е. А.* Параметры заземляющих устройств для защиты персонала и оборудования // Вестник ИрГТУ. – 2011. – № 11(58). – С. 109–112.

15. *Малафеев С. И., Мамай В. С., Микроков В. И. и др.* Микроконтроллерное устройство для защиты электрической сети от однофазных замыканий на землю // Электротехника. – 2000. – № 1. – С. 40–42.

16. Расчет и построение систем электроснабжения угольных разрезов. Руководящий технический материал. РТМ 12.25.006-90. — М.: ИГД им. А.А. Скочинского, 1990. — 169 с.
17. ГОСТ 12.1.038-82. Система стандартов безопасности труда. Электробезопасность. Предельно допустимые значения напряжения прикосновения и токов. — М., 1996. — 7 с.
18. ГОСТ IEC/TR 62368-2-2014. Аудио-, видеоаппаратура, оборудование информационных технологий и техники связи. Ч. 2. Пояснительная информация к IEC 62368-1 (IEC/TR 62368-2:2011, ЮТ). — М.: Стандартинформ, 2015 — 130 с. 

REFERENCES

1. Malafeev S. I., Malafeev S. S. Analysis of a quarry mobile diesel generator station during the moving of an excavator. *Proceedings of the 6th International Conference on Industrial Engineering (ICIE 2020)*, Lecture Notes in Mechanical Engineering. Vol. II. 2021, pp. 803–810. DOI: 10.1007/978-3-030-54817-9_93.
2. Malafeev S. I., Serebrennikov N. A. *Patent RU 2670964. IPC H02P 9/48; H02P 9/02; E21C 47/02; E02F 7/02; E02F 9/20*. 26.10.2018. [In Russ].
3. Pichuev A. V., Shevyrev Yu. V. Regulatory and legal provisions regulating the conditions for ensuring electrical safety at mining enterprises of Russia. *MIAB. Mining Inf. Anal. Bull.* 2015, no. 9, pp. 365–372. [In Russ].
4. Binjian Wu, Jianmin Bai, Zhujun Ling, Zaifu Zhou, Feijie Wang, Shunding Hu, Aijun Liu The safety design suggestions of autonomous mine transportation system. *2020 IEEE 5th International Conference on Intelligent Transportation Engineering*. 2020. Pp. 388–392. DOI: 10.1109/ICITE50838.2020.9231329.
5. *Modern American coal mining. Methods and applications*. Bise C. J. (Ed.) Society for Mining, Metallurgy and Exploration, 2013, 576 p.
6. Nikulin A., Ikonnikov D., Dolzhikov I. Smart personal protective equipment in the coal mining industry. *International Journal of Civil Engineering and Technology*. 2019, vol. 10, no. 4, pp. 852–863. <http://www.iaeme.com/IJCIET/issues.asp?JType=IJCIET&VType=10&IType=4>.
7. Lyakhomskiy A. V., Gerasimov A. I., Perfil'eva E. N. Modeling phase-to-ground faults in 6kW grids in open pit mining. *MIAB. Mining Inf. Anal. Bull.* 2021, no. 2, pp. 164–178. [In Russ]. DOI: 10.25018/0236-1493-2021-2-0-164-178.
8. Kuliski K. Simulation of earth faults in parallel lines in mine medium voltage networks. *2019 IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*. 2019, vol. 261, article 012025, pp. 1–9. DOI: 10.1088/1755-1315/261/1/012025.
9. Diamenu G. Statistical analysis of electric power distribution grid outages. *European Journal of Engineering and Technology Research*. 2021, vol. 6, no. 3, pp. 92–98. DOI: 10.24018/ejers.2021.6.3.2406.
10. Roberts J., Altuve H. J., Hou D. *Review of ground fault protection methods for grounded, ungrounded, and compensated distribution systems*. Schweitzer Engineering Laboratories, Inc. Pullman, WA, USA, 2001, 40 p.
11. Toader D., Vintan M., Solea C., Vesa D. Marian Greconici Analysis of the possibilities of selective detection of a single line-to-ground fault in a medium voltage network with isolated neutral. *Energies*. 2021, vol. 14, no. 21, article 7019. DOI: 10.3390/en14217019.
12. Shuin V. A., Vorobyeva V. A., Dobryagina O. A., Shadrikova T. Yu. Principles of implementing adaptive earth fault current protection in 6–10 kV uncompensated cable networks. *Vestnik Ivanovskogo gosudarstvennogo energeticheskogo universiteta*. 2018, no. 2, pp. 29–37. [In Russ]. DOI: 10.17588/2072-2672.2018.3.029-037.
13. Pelenev D. N., Abramovich B. N., Sychev Yu. A., Babyr K. V. Study of the efficiency of the invariant protection against single-phase ground faults in the microprocessor terminals. *2019 IEEE Conference of Russian Young Researchers in Electrical and Electronic Engineering (EIConRus)*. 2019, pp. 620–625. DOI: 10.1109/EIConRus.2019.8657040.

14. Naidenov A. I., Dmitriev E. A. Parameters of grounding devices for personnel and equipment protection. *Vestnik Irkutskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta*. 2011, no. 11(58), pp. 109 – 112. [In Russ].

15. Malafeev S. I., Mamai V. S., Mikryukov V. I., et. al. A microcontroller device for protecting the electrical network from single-phase earth faults. *Elektrotehnika*. 2000, no. 1, pp. 40 – 42. [In Russ].

16. *Raschet i postroenie sistem elektrosnabzheniya ugol'nykh razrezov. Rukovodyashchiy tekhnicheskii material. RTM 12.25.006-90* [Calculation and construction of power supply systems for coal mines. Technical guidance material RTM 12.25.006-90], Moscow, IGD im. A.A. Skochinskogo, 1990, 169 p. [In Russ].

17. *Sistema standartov bezopasnosti truda. Elektrobezopasnost'. Predel'no dopustimye znacheniya napryazheniya prikosnoveniya i tokov. GOST 12.1.038-82* [Occupational safety standards system. Electric safety. Maximum permissible values of pick-up voltages and currents. State Standart 12.1.038-82], Moscow, 1996. [In Russ].

18. *Audio-, videoapparatura, oborudovanie informatsionnykh tekhnologiy i tekhniki svyazi. GOST IEC/TR 62368-2-2014. Ch. 2. Poyasnitel'naya informatsiya k IEC 62368-1 (IEC/TR 62368-2:2011, YuT)* [Audio, video equipment, information technology and communication equipment. State Standart IEC/TR 62368-2-2014. Part 2. Explanatory information to IEC 62368-1 (IEC/TR 62368-2:2011, UT)], Moscow, Standartinform, 2015. [In Russ].

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Малафеев Сергей Иванович^{1,2} – д-р техн. наук, профессор;
главный научный сотрудник, e-mail: simalafeev@gmail.com,
e-mail: sim@jpc,

*Микрюков Виктор Игоревич*² – канд. техн. наук,
ведущий научный сотрудник,
e-mail: mikrukov@jpc.ru,

*Малафеева Алевтина Анатольевна*¹ – д-р техн. наук,
доцент, профессор, e-mail: amalafeeva@rambler.ru,

¹ Владимирский государственный университет
имени А.Г. и Н.Г. Столетовых, Россия,

² ООО Компания «Объединенная Энергия».

Для контактов: Малафеев С.И., e-mail: simalafeev@gmail.com.

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

S.I. Malafeev^{1,2}, Dr. Sci. (Eng.), Professor;
Chief Researcher, e-mail: simalafeev@gmail.com,
e-mail: sim@jpc,

*V.I. Mikryukov*², Cand. Sci. (Eng.),
Leading Researcher, e-mail: mikrukov@jpc.ru,

*A.A. Malafeeva*¹, Dr. Sci. (Eng.),
Assistant Professor, Professor,
e-mail: amalafeeva@rambler.ru,

¹ Alexander and Nikolay Stoletovs Vladimir State University,
600000, Vladimir, Russia,

² «Joint Power» Company, Ltd, 111672, Moscow, Russia.

Corresponding author: S.I. Malafeev, e-mail: simalafeev@gmail.com.

Получена редакцией 13.11.2021; получена после рецензии 24.01.2022; принята к печати 10.02.2022.

Received by the editors 13.11.2021; received after the review 24.01.2022; accepted for printing 10.02.2022.