

Специфика заземления электрооборудования участка шахты в контексте соответствия критерию эффективности защиты персонала от электропоражения

Е.В. Денисова¹✉, И.Б. Гуляева², М.К. Маренич²

¹ Санкт-Петербургский государственный архитектурно-строительный университет, г. Санкт-Петербург, Российская Федерация

² Донецкий национальный технический университет, г. Донецк, Донецкая Народная Республика
✉deni_sovaev@mail.ru

Резюме: Приведены доказательства того, что действующая нормативно регламентированная концепция построения систем электроснабжения участков шахт изначально предполагает формирование электропоражающего фактора, воздействующего на человека при касании к фазе сети. Это обусловлено наличием активной и ёмкостной проводимостей изоляции вследствие заземления центральных жил шахтных гибких экранированных кабелей. Доказана функциональная недостаточность применяемой в горной промышленности защиты от утечек тока на землю, в том числе применительно к шахтным участковым электрическим сетям с потребителями высокой мощности. Обоснована альтернативная концепция построения системы электроснабжения шахтной участковой электрической сети, в соответствии с которой исключается заземление центральных жил гибких кабелей и реализуется принцип селективности защитного отключения электропотребителей участка шахты на основе применения локальных средств контроля состояния изоляции силовых присоединений.

Ключевые слова: рудничное электрооборудование, гибкий кабель, изоляция, проводимость, электропоражающий фактор, выявление, исследование, контроль, защитное отключение, селективность, локальные средства, система электроснабжения, альтернативная концепция

Для цитирования: Денисова Е.В., Гуляева И.Б., Маренич М.К. Специфика заземления электрооборудования участка шахты в контексте соответствия критерию эффективности защиты персонала от электропоражения. *Горная промышленность*. 2022;(4):110–118. <https://doi.org/10.30686/1609-9192-2022-4-110-118>

Specific features of electrical equipment grounding on a mine site to comply with the requirements for effective protection of personnel against electric-shock hazards

E.V. Denisova¹ ✉, I.B. Guliaeva², M.K. Marenich²

¹ Saint Petersburg State University of Architecture and Civil Engineering, St. Petersburg, Russian Federation

² Donetsk National Technical University, Donetsk, Donetsk People's Republic
✉deni_sovaev@mail.ru

Abstract: The paper provides evidence that the existing standardized design concept of power supply systems for the mine sites inherently involves existence of an electrical shock hazard to humans when touching the phase of the network. This hazard is caused by the active and capacitive conductance of the insulation due to grounding of the central cores of the flexible shielded mining cables. The functional inefficiency of the ground fault protection used in the mining industry has been proved, including the cases of mine electric networks with high power consumption. An alternative concept was justified to design the power supply system for a mine section electric network, which excludes grounding of the central cores of the flexible cables. This approach implements the principle of selective shutoff protection of the electrical consumers in the mine section using local means to control the condition of insulation in the power connections.

Keywords: mine electrical equipment, flexible cable, insulation, conductance, electrical hazard, detection, investigation, monitoring, shutoff protection, selectivity, local means, power supply system, alternative concept

For citation: Denisova E.V., Guliaeva I.B., Marenich M.K. Specific features of electrical equipment grounding on a mine site to comply with the requirements for effective protection of personnel against electric-shock hazards. *Russian Mining Industry*. 2022;(4):110–118. <https://doi.org/10.30686/1609-9192-2022-4-110-118>

Введение

Эксплуатация шахтных участков электрических сетей осуществляется в условиях формирования и действия электропоражающего фактора, поскольку величины номинальных линейных напряжений (660 В, либо 1140 В) обуславливают ток через человека при касании его к фазе сети, существенно превышающий предельно допустимое значение. В качестве мер противодействия электропоражающему фактору предусмотрены:

- заземление металлических корпусов электрооборудования;
- реализация режима изолированной нейтрали трансформатора.

При этом заземление предполагает не только обеспечение защиты человека от электропоражения при возникновении электрической проводимости с фазы на корпус электроустановки, но и при реализации режима изолированной нейтрали трансформатора создаёт условия для применения участкового аппарата защиты от утечек тока на землю. Особенность функционирования такой защиты состоит в выявлении повышенной проводимости тока с фазы на землю (цепь касания человеком фазы сети), формировании команды на защитное отключение (отделение от сети цепей питающего трансформатора) при одновременном выполнении совокупности функций в области снижения тока, протекающего через тело человека.

Однако цепи заземления совместно со схемой электропитания участка шахты (включая электрогенерирующие установки) представляют собой структуру, в которой может быть сформирован и действовать электропоражающий фактор.

В условиях применения всё более мощных электропотребителей и, как следствие, увеличения протяжённости и сечений силовых кабельных присоединений существенно меняются параметры активных и реактивных проводимостей изоляции, что существенно влияет на параметры электропоражающего фактора. В связи с этим научный и практический интерес представляет исследование степени эффективности защитной функции, реализуемой в шахтной участковой электрической сети (содержащей цепи заземления корпусов электропотребителей) в условиях применения высокомоментных электроустановок, протяжённых кабельных линий (с кабелями большого сечения фазных проводников).

Анализ исследований и публикаций

Требования к структуре и параметрам заземляющей сети участка шахты изложены в нормативных документах¹, в соответствии с которыми заземлению подлежат металлические оболочки как стационарного, так и перемещаемого силового электрооборудования. При этом заземление оболочек последнего осуществляется присоединением центрального проводника (заземляющей жилы) силового гибкого экранированного кабеля к корпусу электродвигателя нестационарной электромеханической установки и к заземлённому корпусу соответствующего магнитного пускателя. Такие требования предопределили и саму структуру применяемых шахтных гибких кабелей².

¹ Заземление шахтного электрооборудования. Технические требования и методы контроля: ГОСТ 28298-89. – М.: Стандартинформ, 2005. – 7 с. (Переиздание).

² Кабели шахтные гибкие экранированные марки ГРШЭ: ГОСТ 10694-71 Режим доступа: <http://www.normacs.ru/Doclist/doc/3P35.html>; Кабели силовые гибкие экранированные на напряжение 1140 В. Технические условия: ГОСТ 10694-78. Режим доступа: <http://nrmsoft.ru/Doclist/doc/3A3R.html>

Существенным отличием их конструкции является то, что центрально расположенная медная заземляющая жила по всей своей длине охватывается силовыми фазными проводниками, резиновая изоляция которых с внешней стороны покрыта дополнительным слоем электропроводящей резины (экраном).

При условии подключения центральной (заземляющей) жилы кабеля к заземляющей сети такое техническое решение даёт возможность выявить факт касания человеком (находящимся в контакте с землёй) фазного проводника, нормально находящегося под напряжением, а также в общем случае – факт существенного увеличения электрической проводимости между фазой сети и землёй (как результат снижения сопротивления изоляции).

Таким образом, вся концепция защиты человека от электропоражения при касании к фазному проводнику шахтной участковой электрической сети, находящемуся под напряжением, состоит в создании контура постоянного оперативного тока (цепь: аппарат защиты – фильтры присоединения – фазы сети – цепь утечки тока на землю – земля – аппарат защиты), измерении этого тока и сопоставлении его с величиной предельно допустимого тока. Эта концепция отражена в подавляющем большинстве исследований в области обеспечения электробезопасности эксплуатации шахтных участков электрических сетей [1–3], нормативной документации³ и реализуется вне зависимости от схемных решений разработанных и находящихся в эксплуатации аппаратов защиты:

- схемы на дискретных компонентах (АЗПБ; АЗУР-1; РУ-1140) [4];
- схемы на основе применения интегральных, в том числе аналоговых микросхем (АЗУР-4)⁴;
- схемы на основе применения микроконтроллеров (АЗУР-1М; АЗУР-4МК)⁵ [5].

Принципиальное значение здесь имеет эффект изначального формирования электропоражающего фактора в шахтной участковой электрической сети, поскольку структура гибкого экранированного кабеля предполагает наличие активных и ёмкостных проводимостей изоляции между фазными проводниками и центральной жилой, а заземление последней приводит к появлению соответствующих проводимостей между фазами сети и землёй.

Функция защиты от электропоражения в этом случае сводится не к устранению причины формирования электропоражающего фактора, а к ограничению количества электричества q через тело человека до уровня $q \leq 50 \text{ mA} \cdot \text{с}^6$ в основном за счёт скорости обесточивания электросети. При этом человек, касаясь фазы сети и находясь в контакте с землёй, изначально попадает под действие электропоражающего фактора, обусловленного наличием проводимостей изоляции между фазами сети и землёй, т.е. компоновочными и техническими решениями, принятыми при формировании структуры системы электроснабжения технологического участка шахты.

³ Аппараты защиты от токов утечки рудничные для сетей напряжением до 1200 В. Общие технические условия: ГОСТ 22929-78. С изменениями согласно ИУС 11-80, 7-81, 11-83. Соответствует СТ СЭВ 2309-80. М.: Издательство стандартов, 1978. 13 с. (Межгосударственный стандарт).

⁴ Устройство и принцип работы АЗУР-4. Режим доступа: https://sinref.ru/000_uchebniki/01791shahtnoe_oborudov/084_apparat_zashiti_tokov_utechki_azur_4/004.htm

⁵ Аппарат защиты от токов утечки унифицированный рудничный АЗУР-4МК. Руководство по эксплуатации / ИТЭП 28648513.004.РЭ. Донецк, 2013. 28 с.

⁶ Аппараты защиты от токов утечки рудничные для сетей напряжением до 1200 В. Общие технические условия: ГОСТ 22929-78. С изменениями согласно ИУС 11-80, 7-81, 11-83. Соответствует СТ СЭВ 2309-80. М.: Издательство стандартов, 1978. 13 с. (Межгосударственный стандарт).

Альтернативным техническим решением в этом случае может служить применение локальных средств выявления электрического контакта фазы с металлическим корпусом электроустановки при условии неприсоединения центральных жил силовых гибких кабелей к сети заземления. В этом случае человек при касании к фазному проводнику сети окажется под потенциалом фазы. Однако сведенная к минимуму проводимость изоляции в цепях «фаза – земля» будет препятствовать протеканию электропоражающего уровня тока через тело человека. Принципиальная возможность реализации такого способа отражена в исследовании [6].

В связи с этим представляется актуальным выполнить анализ специфики заземления электрооборудования участка шахты в контексте соответствия критерию эффективности защиты персонала от электротравматизма, имея в виду сопоставление защитных функций:

– действующая концепция: заземлённые заземляющие жилы гибких силовых кабелей обеспечивают защитное заземление стационарного электрооборудования; выявление повышенной проводимости цепи «фаза – земля» при наличии общеучастковой защиты от утечек тока на землю; вследствие заземления центральных жил гибких экранированных кабелей в сети формируется электропоражающий фактор;

– альтернативная концепция: центральные жилы гибких экранированных кабелей отделены от заземляющей сети, что подавляет формирование электропоражающего фактора; контроль повышенной проводимости цепи «фаза – земля», повреждения изоляции фазного проводника и соответствующие защитные функции распространяются на локальные технические средства (в частности, в структурах силовых коммутационных аппаратов и перемещаемого силового электромеханического оборудования).

Следует отметить, что вопросы повышения безопасности эксплуатации электрооборудования шахт остаются актуальными несмотря на многолетний опыт широкого применения аппаратов защиты от утечек тока на землю. В частности, из исследования [7] следует, что «значительное снижение количества электротравм наблюдалось лишь в период широкого внедрения устройств защитного отключения на горных предприятиях (1952–1962 гг.). Совершенствование технических средств обеспечения условий электробезопасности в последующие годы не привело к существенному снижению числа электротравм и выполняло компенсирующую роль, не допуская роста несчастных случаев при возрастании уровня электрификации горного производства, роста электровооружённости труда». При этом полного исключения электротравматизма не достигнуто. Так, в соответствии с [7] распределение электротравм персонала на шахтах Украины (подземные работы) в среднем составляет 15% (сети напряжения > 1000 В) к 85% (сети напряжения ≤ 1000 В). При этом по состоянию, например, на 2012 г. общий показатель электротравматизма – 61 случай, а смертельный электротравматизм составляет 12 случаев.

Структура возникновения травмоопасных факторов в системе «человек – горнорудное производство – электро-технические комплексы» обоснована в исследовании [8]. Анализ данной работы позволяет сделать вывод о наличии совокупности факторов, приводящих к электротравмам персонала шахты и проявляемым в различных, в том числе и сложных комбинациях. В таких условиях особое значение имеет применение технических решений в области

ограничения тех электрических параметров участковой сети, которые способны формировать факторы электропоражения персонала.

Функционирование системы электроснабжения участка шахты, содержащей в своей структуре: трансформаторную подстанцию, силовые коммутационные аппараты, связанные гибкими экранированными кабелями с асинхронными двигателями потребителей, а также аппаратуру защиты от утечек тока на землю и систему заземления корпусов электроустановок, в том числе посредством подключения центральных жил гибких экранированных кабелей, сопряжено не только с выполнением защитных функций, но и с формированием факторов электротравматизма персонала. В этом контексте научную и практическую актуальность представляет установление степени эффективности функций защиты от электропоражения, реализуемых комплексом технических средств, включая средства заземления, составляющих структуру системы электроснабжения участка шахты.

Основной материал исследования

Типовая структура системы электроснабжения участка шахты представлена на рис. 1 и включает такие компоненты, как: комплектная трансформаторная подстанция (КТП), автоматические выключатели (АВ), магнитные пускатели (МП). На рис. 1 изображены силовые контактные группы 1-го и n -го пускателя; асинхронные двигатели M_1 , M_n соответственно 1-го, n -го потребителя; заземления z_1 , z_n соответственно 1-го, n -го силовых присоединений.

Варианты электротравматизма персонала иллюстрируются:

– контактом человека $R_{ч1}$, стоящего на земле, с корпусом электродвигателя M_1 (обозначен пунктиром), который (в связи с ухудшением изоляции) может находиться в контакте с фазой сети;

– контактом человека $R_{ч2}$, стоящего на земле, с фазой сети.

В соответствии с этим защита от электропоражения персонала в электроустановках участка шахты обеспечивается:

– в первом случае – заземлением корпусов электрооборудования, включая электрическое присоединение корпусов перемещаемого электрооборудования к корпусам стационарного посредством центральных (заземляющих) жил (ЗЖ) гибких кабелей;

– во втором случае – применением (в структуре КТП участка шахты) аппарата защиты (АЗ) от утечек тока на землю при условии использования в структуре кабельной сети участка гибких экранированных кабелей с заземлёнными центральными (заземляющими) жилами, находящимися в контакте с экранами изоляции фазных проводников.

Отличаясь простотой реализации, принцип защитного заземления тем не менее имеет ряд проблемных позиций. Во-первых, в условиях эксплуатации многомашинного электротехнического комплекса и вследствие повреждения изоляции существует вероятность контакта разных фаз с заземлёнными корпусами соответственно разных электроустановок. В этом случае участок почвы между ними будет находиться под линейным напряжением U_n сети, что обусловит относительно высокое значение тока в элементах заземления ($I_z = U_n / \sum R_3 + R_n$), где $\sum R_3$ – сумма активных сопротивлений компонентов цепи заземления; R_n – сопротивление участка почвы между кор-

пусами электроустановок, контактирующими с фазами сети. Как результат, здесь может иметь место искрение в контактных соединениях цепи заземления. Помимо этого, возможно появление электропоражающего фактора в виде шагового напряжения $\Delta U_{ш}$ – разности потенциалов почвы на участке, равном длине шага человека.

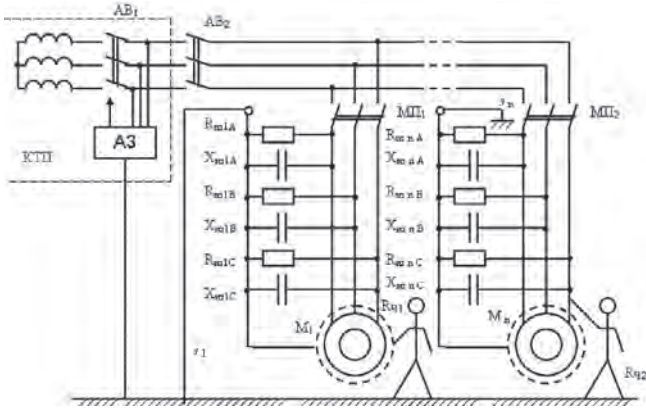


Рис. 1
Типовая структура системы электроснабжения участка шахты с указанием вариантов формирования фактора электропоражения человека

Fig. 1
Typical structure of a mine site power supply system with indication of possible electrical hazards to humans

Во-вторых, эффективность защитной функции заземления определяется качеством электрического контакта металлического корпуса с элементами цепи заземления, что делает показатель надёжности такой защиты соизмеримым с показателем надёжности локального устройства контроля и защиты, присоединяемого между компонентами электрической сети и корпусом электроустановки.

Реализуемая в промышленности концепция защиты человека от электропоражения при касании к фазе сети содержит следующие принципиальные положения:

- электрическая сеть функционирует в режиме изолированной нейтрали трансформатора;
- выявление утечки тока на землю осуществляется подачей в сеть постоянного оперативного тока (проходящего по сопротивлениям изоляции и утечки) и его сравнения с «эталонным» током, соответствующим предельно допустимому току цепи утечки;
- централизованное отключение всей электросети участка шахты автоматическим выключателем КТП по команде аппарата защиты (АЗ);
- применяемое в ряде типов АЗ ограничение ёмкостной составляющей тока утечки средствами статической либо автоматической компенсации (к недостатку последней следует отнести инерционность перестройки автокомпенсатора при изменении величины постоянного тока в катушке управления дросселя);
- быстродействующее выявление «повреждённой» фазы (т.е. фазы, к которой прикоснулся человек) и её последующее закорачивание на землю через сопротивление малой величины.

Достигнутые показатели быстродействия закорачивания «повреждённой» фазы позволили реализовать эту функцию в качестве ускоряющей процесс защитного обесточивания электрической сети номинального линейного напряжения до 1140 В включительно. При этом выявление «повреждённой» фазы осуществляется на основе измере-

ния напряжений первой, второй и третьей фаз относительно земли и определения минимального из этих напряжений:

$$U_{10} = U \sqrt{1 - (1 + 2K_1)a}; \quad (1)$$

$$U_{20} = U \sqrt{1 + (2 + K_1 - \sqrt{3}K_2)a}; \quad (2)$$

$$U_{30} = U \sqrt{1 + (2 + K_1 + \sqrt{3}K_2)a}; \quad (3)$$

где $a = 1 + K_1(2 + K_1) + K_2^2$; $K_1 = R_{ут} / R_{из}$; $K_2 = R_{ут} / X_{из}$; $R_{ут}$ – сопротивление утечки на землю (сопротивление тела человека, прикоснувшегося к фазе сети); $R_{из}$; $X_{из}$ – соответственно активное и ёмкостное сопротивления изоляции сети.

В сетях с ёмкостью изоляции до 1,0 мкФ/фазу и сопоставимыми между собой параметрами ёмкостной ($\epsilon = 1/X_{из}$) и активной ($g = 1/R_{из}$) проводимости изоляции такое техническое решение позволяет поддерживать количество электричества q в теле человека на интервале времени от момента его касания к фазе сети до момента её защитного закорачивания на землю – на уровне, не превышающем предельно допустимый ($q = 50 \text{ mA}\cdot\text{с}$)⁷. Однако защитный в отношении человека эффект закорачивания на землю «повреждённой» фазы исчезает в электрических сетях высокоомных потребителей (когда $\epsilon \gg g$). Так, исследованиями [1] установлено, что при сопротивлении утечки $R_{ут} > 1,6 \text{ кОм}$ в соотношениях напряжений (U_{10} ; U_{20} ; U_{30}) первой, второй и третьей фаз наступают изменения, когда напряжение фазы с присоединённым сопротивлением утечки снижается до уровня, меньшего минимального напряжения фазы с нормальной изоляцией. В этом случае полностью исключается эффект защиты человека от электропоражения, а вместо этого в сети формируется крайне опасный электропоражающий фактор, поскольку аппарат защиты присоединит на землю неповреждённую фазу, и человек, присоединившийся к фазе сети и находящийся в контакте с землёй, окажется под действием линейного напряжения сети.

К проблемным вопросам эксплуатации аппаратов защиты от утечек тока на землю может быть отнесена также их реакция на коммутационные перенапряжения в сети, что в ряде случаев приводит к ложным срабатываниям защиты⁸, а также их функциональная недостоверность, так как защитным отключением сети не удаётся в полной мере подавить электропоражающий фактор вследствие наличия в сети экспоненциально снижающейся обратной ЭДС асинхронных двигателей потребителей, переходящих в режим выбега [9]. Однако принципиальное значение имеет факт обязательного подключения к цепи заземления центральной жилы каждого силового гибкого кабеля (при обязательности применения экранированных кабелей), что является как условием заземления корпусов нестационарных электроустановок, так и условием функционирования аппаратуры защиты (АЗ) от утечек тока на землю.

Схема формирования активно-ёмкостных проводимостей изоляции шахтного гибкого экранированного кабеля приведена на рис. 2. В соответствии с взаиморасположением силовых и центральной жил в таком кабеле имеются

7 Аппараты защиты от токов утечки рудничные для сетей напряжением до 1200 В. Общие технические условия: ГОСТ 22929-78. С изменениями согласно ИУС 11-80, 7-81, 11-83. Соответствует СТ СЭВ 2309-80. М.: Издательство стандартов, 1978. 13 с. (Межгосударственный стандарт).

8 Аппараты защиты от токов утечки рудничные для сетей напряжением до 1200 В. Общие технические условия: ГОСТ 22929-78. С изменениями согласно ИУС 11-80, 7-81, 11-83. Соответствует СТ СЭВ 2309-80. М.: Издательство стандартов, 1978. 13 с. (Межгосударственный стандарт).

активные и ёмкостные сопротивления как между фазами ($R_{\phi-\phi}$; $X_{\phi-\phi}$), так и между каждой из фаз и центральной (заземляющей) жилой ($R_{\phi-3}$; $X_{\phi-3}$). Причем именно последние создают путь тока через сопротивление утечки в случае касания человеком фазы сети.

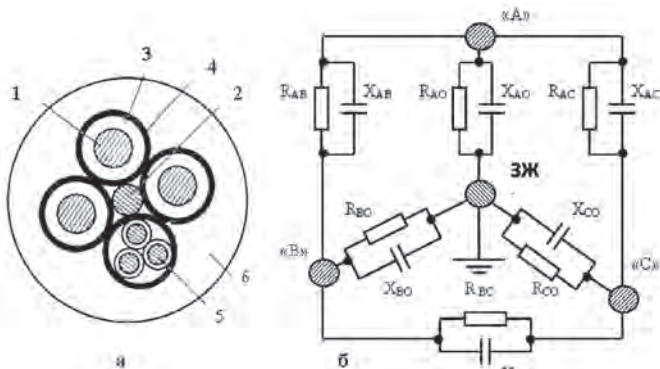


Рис. 2
Взаиморасположение (а) силовых жил 1 и центрального провода (заземляющей жилы, ЗЖ) 2 гибкого экранированного шахтного кабеля (3 – резиновая изоляция; 4 – резиновый электропроводящий экран; 5 – сигнальная жила; 6 – оболочка кабеля) и формирования (б) активных ($g=1/R$) и ёмкостных ($b=1/X$) проводимостей изоляции кабеля при заземлении центрального провода

Fig. 2
Relative position (a) of power conductors 1 and the central core (protective earthing, PE) 2 of a flexible shielded mining cable (3 – rubber insulation; 4 – rubber semiconducting screen; 5 – signal cable; 6 – cable sheath) and formation (b) of active ($g=1/R$) and capacitive ($b=1/X$) conductance of the cable insulation when the central core is grounded

С учётом n кабелей, подключенных к выходу (u_A ; u_B ; u_C) трансформатора участковой подстанции (КТП), общие активная и ёмкостная проводимости изоляции между k -й фазой ($k = 1; k = 2; k = 3$) и землёй вследствие параллельности соединений будут описываться выражениями:

$$G_{\phi-3k} = \frac{\sum_{i=1}^n R_{\phi-3k}^{-1}}{\prod_{i=1}^n R_{\phi-3k}}; \tag{4}$$

$$B_{\phi-3k} = 2\pi f \sum_{i=1}^n C_{\phi-3k}, \tag{5}$$

где $C_{\phi-3k}$ – ёмкость изоляции между k -й комбинацией фаз i -го кабеля; $C_{\phi-3ki}$ – ёмкость изоляции между k -й фазой I -го кабеля и землёй (при заземлении центральных жил кабелей сети участка); f – частота напряжения сети, Гц.

При этом импеданс и комплексная проводимость фазно-го присоединения будут составлять соответственно:

$$Z_{\phi-3k} = R_{\phi-3k} / \sqrt{1 + (2\pi f C_{\phi-3k} R_{\phi-3k})^2}; \tag{6}$$

$$Y_{\phi-3k} = 1/Z_{\phi-3k}, \tag{7}$$

где $k = 1; k = 2; k = 3$

В случае появления в цепи утечки ($R_{YT} = 1 \text{ кОм}$) тока с фазы на общую точку схемы «звезда» (что соответствует прикосновению человека к фазе сети при заземлённых центральных проводах кабелей) комплексная проводимость соответствующего фазного присоединения преобразуется к виду:

$$Y_{\phi-3k} = \sqrt{1 + \frac{2\pi f R_{YT} R_{\phi-3k} C_{\phi-3k}}{(R_{YT} + R_{\phi-3k})}} \cdot (R_{YT} R_{\phi-3k} / (R_{YT} + R_{\phi-3k})). \tag{8}$$

Полученные выражения позволяют выполнить анализ распределения токов в ветвях сети (схема по рис. 4), сформированных активно-ёмкостными проводимостями изоляции кабелей, включая степень влияния импедансов изоляции цепей «фаза – земля» на величину тока в цепи R_{YT} , а также на величину тока в точке соединения в «звезду» активно-ёмкостных проводимостей, определяемых импедансами $Z_{\phi-3k}$ (при $k = 1; k = 2; k = 3$). Следует отметить, что ток в цепи заземления протекает как между фазами (по цепи проводимостей изоляции в структуре гибкого кабеля), так и в общей структуре системы электроснабжения, т.е.:

- в единичном кабеле – ток, протекающий по всей длине кабеля по линейным проводимостям изоляции между фазами (А-В; В-С; С-А);

- в структуре системы электроснабжения участка – ток между точками присоединения заземлителей отдельных объектов, меняющий свою величину и направление протекания стохастически в зависимости от включаемых в работу либо отключаемых кабельных присоединений (рис. 3).

Существенное влияние ёмкости изоляции на величины токов в цепи утечки R_{YT} и в сети заземления подтверждается результатами моделирования (рис. 4; рис. 5) В частности, на рис. 4 представлена зависимость амплитуд токов (mA) в сети заземления от ёмкости изоляции (мкФ/фазу) при величине активного сопротивления изоляции $R_{из} = 150 \text{ кОм/фазу}$, величине активного сопротивления цепи «земля» $R_3 \approx 0 \text{ кОм}$; отсутствии в цепи утечки тока на землю ($R_{YT} = \infty$); линейное напряжение сети $U = 1140 \text{ В}$. На рис. 5 представлены осциллограммы токов (a, b, z, d) и количества электричества (e, e) в цепи утечки тока на землю ($R_{YT} = 1 \text{ кОм}$) в зависимости от емкости изоляции сети в диапазоне от $C_{из} = 0,1 \text{ мкФ/фазу}$ (нижние кривые) до $1,0 \text{ мкФ/фазу}$ (верхние кривые) с шагом в $0,1 \text{ мкФ/фазу}$: a, b, e – линейное напряжение сети – 660 В ; z, d, e – линейное напряжение сети – 1140 В ; a, z – синусоиды тока в цепи изоляции между фазой и землёй; b, d – синусоиды тока в цепи утечки тока на землю. На рис. 5, в и рис.5, д моментом времени t_1 отмечен интервал времени в $0,17 \text{ с}$ протекания тока утечки через человека, что соответствует продолжительности отработки отделения от сети энергетического потока питающей трансформаторной подстанции (КТП) методом шунтирования «повреждённой» фазы на землю через сопротивление малой величины⁹ [5] в процессе отключения сети. Однако представленная на этих диаграммах зависимость количества электричества q через тело человека от ёмкости изоляции сети $C_{из}$ свидетельствует о наличии неблагоприятных условий электропоражения. Так, в сети линейного напряжения 660 В при $C_{из} \geq 0,8 \text{ мкФ/фазу}$ параметр $q > 37 \text{ мА}\cdot\text{с}$, что сопоставимо с предельно допустимым¹⁰ $q = 50 \text{ мА}\cdot\text{с}$. В сети линейного напряжения 1140 В параметр $q > 50 \text{ мА}\cdot\text{с}$ при $C_{из} > 0,6 \text{ мкФ/фазу}$. При этом не учитывается последующее увеличение параметра q вследствие действия обратных ЭДС асинхронных двигателей потребителей, переходящих в режим выбега.

9 Аппарат защиты от токов утечки унифицированный рудничный АЗУР-4МК. Руководство по эксплуатации / ИТЭП 28648513.004.РЭ. Донецк, 2013. 28 с.

10 Аппараты защиты от токов утечки рудничные для сетей напряжением до 1200 В . Общие технические условия: ГОСТ 22929-78. С изменениями согласно ИУС 11-80, 7-81, 11-83. Соответствует СТ СЭВ 2309-80. М.: Издательство стандартов, 1978. 13 с. (Межгосударственный стандарт).

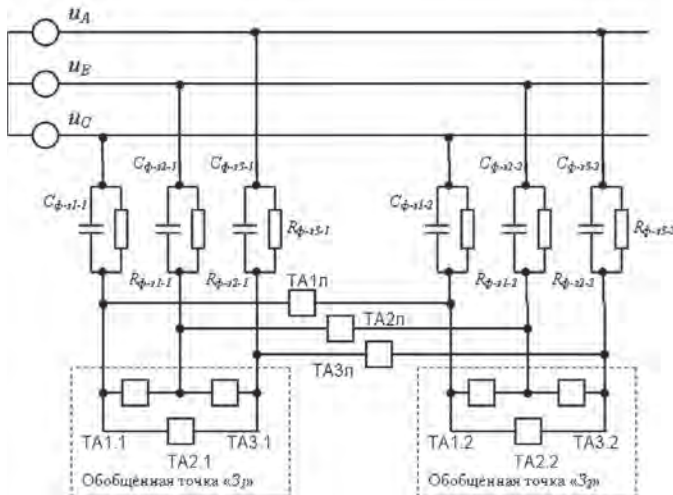


Рис. 3
Схема распределения тока, обусловленного проводимостями изоляции кабелей в сети заземления участка шахты между точками заземления «З₁» и «З₂»

Fig. 3
Diagram of current distribution due to cable insulation conductances in the mine section ground network between the «З₁» and «З₂» grounding points

В этом случае представляется уместной хотя бы частичная компенсация ёмкостных токов утечки индуктивностями. Однако применяемый в аппаратах защиты от утечек тока на землю последних разработок¹¹ [5] принцип выявления утечки тока на землю, включающий контроль смещения фазовых параметров сети (совместно с измерением оперативного тока), исключает подключение дополнительных индуктивностей в цепь оперативного тока аппарата защиты, т.е. исключает функцию компенсации ёмкостного тока в цепях утечки и изоляции сети. В целом же усложнение алгоритма выявления факта утечки тока на землю и формирования управляющих воздействий на ускорение отделения цепи утечки от энергетического потока участковой трансформаторной подстанции обусловливает снижение надёжности реализации защитной функции, а вероятность ошибочного выявления и закорачивания на землю «повреждённой фазы» предопределяет возможность создания предельно опасного условия электропоражения человека при его касании к фазе сети. Не может считаться достаточным и быстрое действие данной защитной функции в контексте ограничения количества электричества ($q \leq 50 \text{ mA}\cdot\text{с}$) через человека. Это подтверждается результатами исследования, приведенными на рис.5, в, рис. 5, д.

Таким образом:

1. Обязательное присоединение центральных проводов гибких кабелей в сети заземления системы электроснабжения участка шахты априори создаёт цепи проводимости с параметрами, представляющими опасность поражения человека электрическим током, а также обуславливает формирование токов в заземляющей сети участка шахты, сопоставимых по величине с токами, способными вызвать искрение в местах случайного разъединения проводников цепи заземления, т.е. превысить минимальные воспламеняющие токи, определяе-

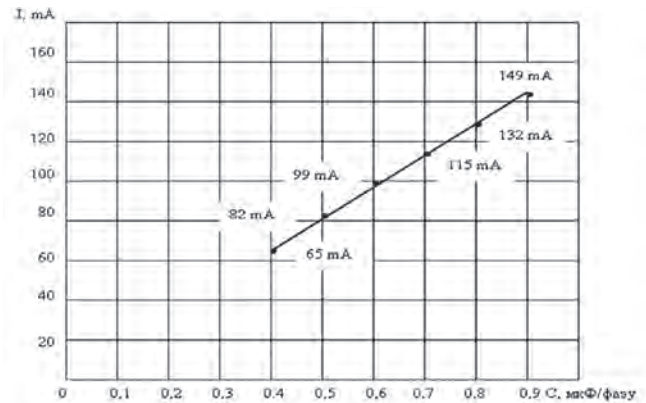


Рис. 4
Зависимость амплитуд токов в сети заземления от емкости изоляции

Fig. 4
Dependence of the ground network current amplitudes on the insulation capacitance

2. Режим изолированной нейтрали трансформатора не обеспечивает достаточный уровень безопасности шахтной участковой электрической сети по критерию электропоражения в условиях подключения центральных проводов шахтных гибких кабелей (охваченных по всей длине экранами изоляции силовых фазных проводников) к заземлениям. Фактически это делает шахтную участковую электрическую сеть, функционирующую в режиме изолированной от земли нейтрали трансформатора, гальванически связанной пофазно с сетью заземления.
3. Существующие подходы к обустройству шахтных участковых электрических сетей изначально предполагают формирование в них электропоражающего фактора методом заземления передвижного (переносного) электрооборудования подключением к его корпусам и заземлённым корпусам магнитных пускателей центральных проводов гибких кабелей, гальванически связанных с проводящими экранами их силовых жил. В этом случае функции защиты человека от электропоражения сводятся не к устранению электропоражающего фактора, а к ускорению отделения человека от энергетического потока трансформаторной подстанции в условиях постоянно действующего электропоражающего фактора, созданного вследствие заземления центральных проводов гибких кабелей.

Учитывая это и в связи с невозможностью исключения вероятности соприкосновения человека с корпусом асинхронного двигателя электропотребителя, находящимся в контакте (вследствие повреждения изоляции) с фазой сети, представляется целесообразным принципиальное изменение самой концепции построения системы электроснабжения участка шахты, где за основу должен быть взят принцип изначального исключения электропоражающего фактора. В этом случае имеющая электрическую связь (через RC – сопротивления изоляции) с фазами сети

¹² Электрооборудование взрывозащищённое. Часть 11. Искробезопасная электрическая цепь. Electrical apparatus for explosive atmospheres. Part 11. Intrinsic safety. Межгосударственный стандарт. ГОСТ 30852.10-2002 (МЭК 60079-11:1999). МКС 29.260.20 Дата введения 2014-02-15. Режим доступа: <https://docs.cntd.ru/document/1200103397?marker=7D20K3>; Взрывоопасные среды. Часть 11. Искробезопасная электрическая цепь «и». IEC 60079-11:2011 Explosive atmospheres – Part 11: Equipment protection by intrinsic safety «i» (IDT). ГОСТ Р МЭК 60079-11-2010. Национальный стандарт Российской Федерации. Дата введения 2010-11-30. Режим доступа: <https://files.stroyinf.ru/Data2/1/4293801/4293801459.pdf>

¹¹ Аппарат защиты от токов утечки унифицированный рудничный АЗУР-4МК. Руководство по эксплуатации / ИТЭП 28648513.004.РЭ. Донецк, 2013. 28 с.

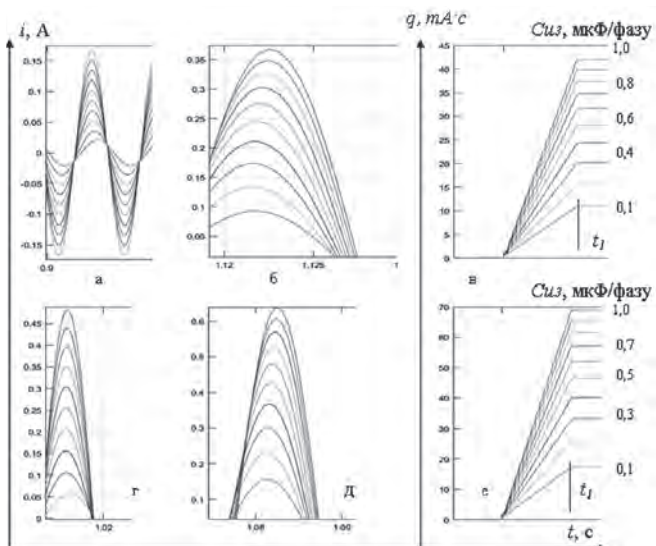


Рис. 5
Осциллограммы токов (а, б, г, д) и количества электричества (в, е) в цепи утечки тока на землю

Fig. 5
Oscillograms of currents (а, б, г, д) and electric quantity (в, е) in the earth leakage circuit

центральная жила силового гибкого кабеля, будучи отключенной от заземляющего контура, может выполнять функцию контроля состояния изоляции фазных проводников кабеля и функцию передачи информационного сигнала на защитное отключение магнитного пускателя в случае применения локального устройства выявления контакта фазы на корпус подключенного к пускателю асинхронного двигателя (АД) технологической (в том числе перемещаемой) установки. Такое техническое решение поясняется схемой (рис. 6), где $Z_{ТР А}$, $Z_{ТР В}$, $Z_{ТР С}$ – импедансы вторичных обмоток первой (А), второй (В) и третьей (С) фаз трансформатора участковой подстанции; $Z_{АД А}$, $Z_{АД В}$, $Z_{АД С}$ – импедансы фазных обмоток (А, В, С) статора асинхронного двигателя потребителя.

Способ выявления замыкания на землю фазы сети основан на подключении между землёй и «звездой» обмоток статора асинхронного двигателя R-C-VD-цепи [6]. Здесь эффект отделения нейтрали сети от земли выполняет конденсатор. Применительно к решению задачи выявления контакта в цепи «фаза – корпус асинхронного двигателя» не усматривается технических противоречий, если указанную измерительную R-C-VD-цепь присоединить между «звездой» обмоток статора АД и его корпусом. Последовательно в цепь может быть введено исполнительное реле К1, размыкающий контакт К1.1 которого может быть задействован для управления отключением контактора магнитного пускателя.

Переходное сопротивление $R_{п}$ между корпусом двигателя и землёй может быть не регламентировано, так как контролироваться будет эффект появления электрического контакта между фазой сети и корпусом двигателя, а отсутствие такого контакта является нормальным режимом эксплуатации электрооборудования, не сопровождается формированием электропоражающего фактора и не требует выполнения предварительных функций, сопоставимых с заземлением корпусов асинхронных двигателей (в условиях шахты – через центральные жилы кабелей). Результаты моделирования напряжений на резисторе R_1 (рис. 6) сопротивления 1 кОм (ёмкость конденсатора C_1 – 500 мкФ) представлены на рис. 7, где позициями «а», «б»,

«в», «г», «д» обозначены: а, в – линейное напряжение сети 660 В; б, г, д – линейное напряжение сети 1140 В; а, б, в – импедансы изоляции кабеля между 1-й, 2-й, 3-й фазами и землёй одинаковы; а, б, г – непосредственное соединение фазы с корпусом двигателя; в, д – соединение «фаза – земля – корпус двигателя» через активное сопротивление $R_{ут} = 1$ кОм; г, д – параметры импедансов изоляции цепей «фаза – корпус двигателя»: 1-я фаза: $R_{ф-з} = 100$ кОм; $C_{ф-з} = 0,2$ мкФ; 2-я фаза: $R_{ф-з} = 120$ кОм; $C_{ф-з} = 0,5$ мкФ; 3-я фаза: $R_{ф-з} = 60$ кОм; $C_{ф-з} = 0,3$ мкФ; масштаб напряжения 500 В/деление.

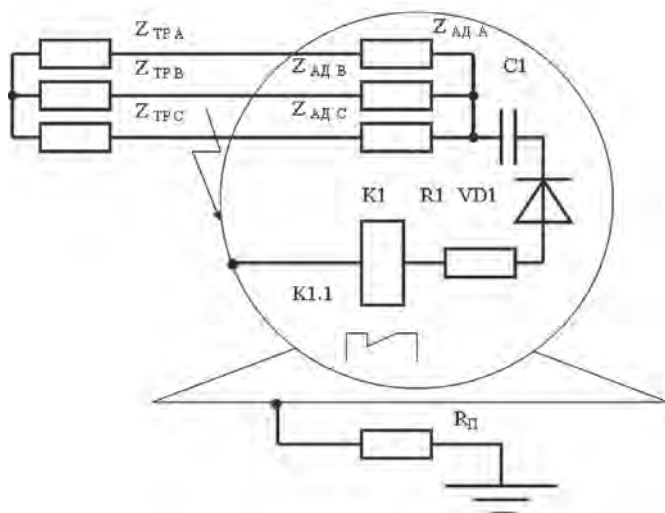


Рис. 6
Схема устройства выявления контакта фазы сети с корпусом электродвигателя (электротехнической установки)

Fig. 6
Schematic diagram of a device to detect the contact between the live wire and the electric motor (device) housing

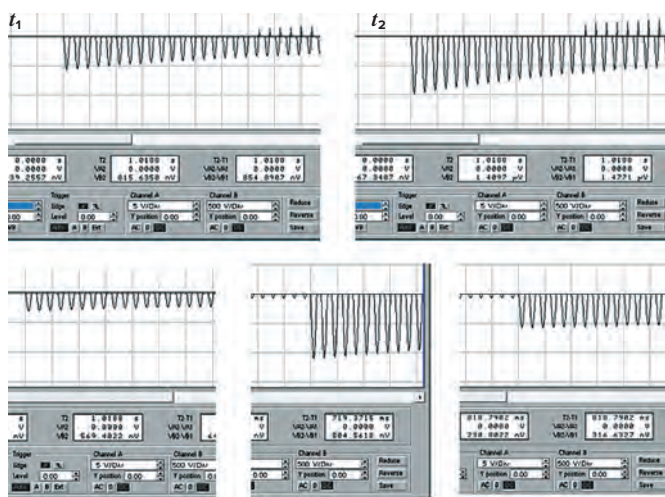


Рис. 7
Осциллограммы напряжений на резисторе R1 устройства (рис. 6) в момент времени t1 появления высокой проводимости с фазы на корпус электродвигателя

Fig. 7
Oscillograms of voltages at R1 resistor of the device (Fig. 6) at the time t1 when high conductance from the live wire to the electric motor housing occurs

Результаты исследования позволяют утверждать, что амплитуда информационного сигнала на резисторе R_1 (рис. 6), начиная с момента времени t_1 (рис. 7) появления высокой

проводимости с фазы на корпус асинхронного двигателя, достаточна для формирования команды на отключение контактора магнитного пускателя (срабатывание реле K_1):

- при появлении контакта ($R \approx 0$ Ом) между фазой и корпусом двигателя;

- при появлении контакта ($R \approx 0$ Ом) между фазой и землёй, в том числе между фазой и землёй через сопротивление человека ($R_{чч}=1$ кОм), прикоснувшегося к фазе (при малом переходном сопротивлении R_p почвы);

- при появлении контакта ($R \approx 0$ Ом) между фазой и землёй (в предположении, что $R_{нн} > 1$ кОм) в момент t_1 (рис. 5, в, рис. 5, д) касания человеком ($R_{чч}=1$ кОм), находящимся в контакте с землёй, корпуса двигателя.

До момента времени t_1 появления высокой проводимости с фазы на корпус асинхронного двигателя величина информационного сигнала на резисторе R_1 устройства (рис. 6) существенно ниже величины, соответствующей команде на защитное отключение магнитного пускателя, в том числе и при существенной разности импедансов изоляции между фазами сети и землёй (рис. 5, з, рис. 5, д), что позволяет устройству надёжно реагировать на аварийное (опасное) состояние.

Если $R_{нн} \gg 0$, эффект прикосновения человека одновременно к фазе сети и к земле не будет сопровождаться электропоражающим фактором ввиду протекания безопасной величины тока через тело человека, отсутствия активных и ёмкостных проводимостей между фазами сети и землёй.

Данное техническое решение позволяет отказаться от использования центральных проводов шахтных гибких кабелей в качестве заземляющих проводников (заземляющих жил) и использовать их в качестве обособленных проводников, в частности, для выявления повышенной проводимости изоляции силовой жилы кабеля.

Эта же схема может быть применена и для выявления фазных проводников гибкого кабеля, если устройство на рис. 6 присоединить не к корпусу электроустановки, а к центральной жиле гибкого кабеля, при том что катод диода VD1 (по рис. 6) будет присоединён в общую точку трёхфазной индуктивной цепи присоединения к фазам сети. Техническая реализация такого варианта защиты возможна при размещении устройства в структуре магнитного пускателя.

Предложенный способ применения локальных средств выявления повышенной проводимости изоляции фаз электрической сети позволяет:

- отказаться от концепции обязательного заземления центральных жил шахтных гибких экранированных кабелей в системе электроснабжения участка шахты;

- предотвратить появление электропоражающего фактора в системе электроснабжения участка шахты, обусловленного заземлением центральных жил шахтных гибких экранированных кабелей;

- обеспечить защитное отключение магнитного пускателя при возникновении электрического контакта между фазой и корпусом присоединённого асинхронного двигателя, между фазой и землёй (в момент прикосновения человека к корпусу электродвигателя), а также при снижении сопротивления изоляции силовой жилы в кабеле присоединения магнитного пускателя;

- обеспечить селективность контроля состояния изоляции кабелей включенных в работу электропотребителей участка шахты и, соответственно, селективность защитного отключения их от сети.

Выводы

Установлено, что существенное влияние на уровень электропоражающего фактора в шахтной участковой электрической сети оказывает ёмкость изоляции, образуемая между фазными проводниками гибких экранированных кабелей и их центральными жилами при подключении последних к цепи заземления. При этом ток в цепи заземления может достигать уровней, сопоставимых с величинами, предельно допустимыми по критерию искробезопасности.

В условиях подключения центральных жил шахтных гибких экранированных кабелей к заземлениям режим изолированной нейтрали трансформатора не является достаточным в контексте обеспечения электробезопасности эксплуатации шахтной участковой электрической сети. При этом функции применяемой защиты человека от электропоражения сводятся не к устранению электропоражающего фактора, а к ускорению отделения человека от энергетического потока трансформаторной подстанции в условиях постоянно действующего электропоражающего фактора, созданного вследствие заземления центральных проводов гибких кабелей.

Функции аппаратов защиты от утечек тока на землю распространяются на шахтные участковые электрические сети при обязательном заземлении центральных жил шахтных гибких экранированных кабелей, однако при этом не исключается электропоражение человека вследствие:

- воздействия электропоражающего фактора в течение времени срабатывания защиты;

- возможного шунтирования на землю фазы сети, ошибочно выявленной аппаратом защиты как фаза, к которой прикоснулся человек;

- воздействия электропоражающего фактора со стороны энергетических потоков асинхронных двигателей потребителей, переходящих в режим выбега после защитного отключения электрической сети участка шахты.

Обособление центральных жил силовых шахтных гибких экранированных кабелей (исключение использования их в качестве заземляющих проводников) и использование их совместно с R-C-VD-цепями контроля в структуре магнитных пускателей является техническим решением, позволяющим выявить повреждение изоляции кабеля, отходящего от пускателя, реализовать селективный контроль состояния изоляции кабелей и селективность защитного отключения электропотребителей в случае существенного снижения импеданса изоляции силовых фазных проводов кабеля относительно земли.

Неиспользование центральных жил шахтных гибких экранированных кабелей в качестве заземляющих позволит предотвратить появление электропоражающего фактора в системе электроснабжения участка шахты, обусловленного активно-ёмкостными проводимостями изоляции фазных проводников.

Подключения R-C-VD-цепей контроля между «звездой» обмоток статора асинхронного двигателя электропотребителя и его корпусом позволяет эффективно выявить электрическое соединение фазы сети с корпусом этого двигателя, а также прикосновение человека к фазе сети и корпусу двигателя (сформировать команду на защитное отключение сети), что позволяет исключить необходимость заземления двигателя посредством подключения к заземлению центральной жилы подводящего кабеля.

Список литературы

1. Дзюбан В.С. Аппараты защиты от токов утечки в шахтных электрических сетях. М.: Недра; 1982. 152 с.
2. Ягудаев Б.М., Шишкин Н.Ф., Назаров В.В. Защита от электропоражения в горной промышленности. М.: Недра; 1982. 152 с.
3. Вареник Є.О. *Обмеження та захист від витоків струму у рудникових електроустановках напругою 1200 В: дис. ... канд. техн. наук: 05.09.03.* Днепропетровск; 2004. 191 с.
4. Белошистов А.И., Савицкий А.В., Савицкий В.Н. Модернизация аппаратов защиты от токов утечки АЗУР-1. *Взрывозащищённое электрооборудование.* 2017;(1):45–57.
5. Савицкий А.В. Новая серия микроконтроллерных аппаратов защиты от токов утечки на землю в шахтных распределительных сетях напряжением до 1200 В. *Наукові праці ДонНТУ. Серія «Електротехніка та електроенергетика».* 2013;(2):211–216.
6. Гуляева И.Б., Маренич М.К., Муфель Л.А., Демченко О.А. Проводимость изоляции электрической сети участка шахты как фактор риска электротравматизма. Проблемные вопросы и пути их решения. *Вестник Донецкого национального технического университета.* 2021;(3):34–47.
7. Синчук О.Н., Харитонов А.А. О проблеме электротравматизма при эксплуатации электроустановок в подземных горных выработках железорудных шахт. *Восточно-Европейский журнал передовых технологий.* 2014;(2):21–25.
8. Мorkун В.С., Синчук И.О., Харитонов А.А. К вопросу анализа и оценки причин электротравматизма в условиях железорудных производств. *Гірничий вісник.* 2014;(97):157–161.
9. Ковальова І.В. *Електротехнічний комплекс шахтної дільниці з функцією двобічного знеструмлення при виникненні аварійного стану: дис. ... канд. техн. наук: 05.09.03.* Донецк; 2012. 184 с.

Список литературы

1. Dzyuban V.S. Devices for protection against leakage currents in mine electrical networks. Moscow: Nedra; 1982. 152 p. (In Russ.)
2. Yagudaev B.M., Shishkin N.F., Nazarov V.V. Protection from electric shock in the mining industry. Moscow: Nedra; 1982. 152 p. (In Russ.)
3. Varenik Ye. O. The exchange of that zachist vid vitokiv struma at the mine electrical installations in the other 1200V: dis. ... Cand. Sci. (Eng.): 05.09.03. Dnepropetrovsk; 2004. 191 p. (In Ukr.)
4. Beloshistov A.I., Savitsky A.V., Savitsky V.N. Modernization of devices of protection from currents of leakage of AZUR-1. *Vzryvozashchishchennoe elektrooborudovanie.* 2017;(1):45–57. (In Russ.)
5. Savitsky A.V. A new series of microcontroller devices for protection against leakage currents to the ground in mine distribution networks with voltage up to 1200 V. Scientific works of DonNTU. Series “Elektrotehnika ta elektroenergetika”. 2013;(2):211–216. (In Ukr.)
6. Guliaeva I.B., Dubinka Ye.S., Marenich M.K., Mufel L.A., Demchenko O.A. Conductivity of insulation of the electric network of the mines as a risk factor of electric injury. problem issues and ways of their solution. *Vestnik Donetsk National Technical University.* 2021;(3):34–47. (In Russ.)
7. Sinchuk O.N., Kharitonov A.A. The problem of electrical injury during the operation of electrical installations in underground workings of iron-ore mines. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies.* 2014;(2):21–25. (In Russ.)
8. Morkun V.S., Sinchuk I.O., Kharitonov A.A. On the issue of analysis and estimates of the causes of electrotraumatism in the conditions of iron ore production. *Girnichy visnik.* 2014;(97):157–161. (In Ukr.)
9. Kovalyova I.V. *Engine electrotechnical complex of mine with function of two-end power supply disconnection at emergency condition: dis. ... Cand. Sci. (Eng.): 05.09.03.* Donetsk; 2012. 184 p. (In Ukr.)

Информация об авторах

Денисова Елена Васильевна – кандидат технических наук, доцент, заведующая кафедрой начертательной геометрии и инженерной графики, Санкт-Петербургский государственный архитектурно-строительный университет, г. Санкт-Петербург, Российская Федерация; e-mail: deni_sovaev@mail.ru

Гуляева Ирина Борисовна – кандидат технических наук, доцент кафедры электрические системы, Донецкий национальный технический университет, г. Донецк, Донецкая Народная Республика; e-mail: iraguliaeva@gmail.com

Маренич Мария Константиновна – магистр по специальности автоматизация и компьютерно-интегрированные технологии, соискатель ученой степени по кафедре электрические системы, Донецкий национальный технический университет, г. Донецк, Донецкая Народная Республика; e-mail: marenichmk@gmail.com

Информация о статье

Поступила в редакцию: 01.07.2022

Поступила после рецензирования: 21.07.2022

Принята к публикации: 23.07.2022

Information about the authors

Elena V. Denisova – Cand. Sci. (Eng.), Associate Professor, Head of the Department of Descriptive Geometry and Engineering Graphics, Saint Petersburg State University of Architecture and Civil Engineering, St. Petersburg, Russian Federation; e-mail: deni_sovaev@mail.ru

Irina B. Guliaeva – Cand. Sci. (Eng.), Associate Professor of the Department of Electrical Systems, Donetsk National Technical University, Donetsk, Donetsk People's Republic; e-mail: iraguliaeva@gmail.com

Mariya K. Marenich – Master's degree in Automation and Computer-integrated Technologies, candidate of academic degree in the Department of Electrical Systems, Donetsk National Technical University, Donetsk, Donetsk People's Republic; e-mail: marenichmk@gmail.com

Article info

Received: 01.07.2022

Revised: 21.07.2022

Accepted: 23.07.2022