

ЁМКОСТЬ ИЗОЛЯЦИИ ЭЛЕКТРОСЕТИ УЧАСТКА ШАХТЫ КАК ФАКТОР ФОРМИРОВАНИЯ ТОКА В ЦЕПИ ЗАЗЕМЛЕНИЯ

Установлена существенность влияния ёмкости изоляции силовых проводников гибких кабелей шахтной участковой электрической сети на величину токов в ветвях проводимости системы заземления участка шахты в случае возникновения цепи однофазной утечки тока на землю. Установлены условия формирования тока в сети заземления, который превышает нормируемую величину по критерию искробезопасности. Обоснована целесообразность изменения концепции построения системы электроснабжения участка шахты в части отказа от присоединения центральных проводников шахтных гибких экранированных кабелей к заземлениям при условии применения локальных средств выявления контакта фазы сети с корпусом электроустановки.

Ключевые слова: шахтная участковая электрическая сеть, ёмкость изоляции, заземляющая сеть, ток, моделирование, анализ, система электроснабжения, концепция построения, обоснование.

Постановка проблемы

Безопасность эксплуатации электрической сети технологического участка угольной шахты обеспечивается средствами противодействия условиям возникновения взрыва метано-воздушной смеси в атмосфере горной выработки и средствами защиты человека от электропоражения. В этой связи, в структуре системы электроснабжения участка предусмотрен комплекс специальных технических решений:

- конструкция металлических корпусов электрооборудования соответствует критериям взрывоустойчивости и взрывонепроницаемости;
- внешние сигнальные цепи соответствуют критерию искробезопасности;
- металлические корпуса стационарных электроустановок заземлены непосредственным подключением к элементам заземления;
- металлические корпуса перемещаемого электрооборудования заземлены через центральные проводники кабелей электропитания присоединением последних к заземлённым корпусам стационарных электроустановок;
- защита персонала от электропоражения при касании к фазному проводнику, находящемуся под напряжением, осуществляется аппаратурой защиты от утечек тока на землю (АЗ);
- с целью выявления повышенной проводимости изоляции фазного проводника кабеля электропитания в структуре системы электроснабжения участка шахты предусмотрены экранированные кабели, экраны

изоляции фаз которых находятся в непосредственном контакте с заземлёнными центральными проводниками.

Таким образом, для защиты человека от электропоражения в условиях шахты предусмотрены технические решения как для случая касания к корпусу электроустановки, находящемуся под потенциалом фазы сети вследствие повреждения изоляции; так и для случая касания к фазному проводнику, находящемуся под напряжением.

Учитывая относительно малую величину сопротивления утечки тока на землю – тела человека (нормируемое значение: $R_{ym}=1$ кОм), следует отметить, что в результате его прикосновения к фазе сети возникнет эффект смещения потенциала нейтрали сети. Процесс будет сопровождаться не только протеканием тока по цепи утечки с фазы на землю, но и компонентам самой структуры системы заземления участка шахты, что предопределяется наличием и параметрами активных и ёмкостных проводимостей изоляции кабельной сети.

В связи с этим, научную и практическую актуальность представляет исследование степени влияния параметров изоляции и, в частности, ёмкости изоляции кабельных присоединений на величины токов в элементах структуры заземляющей сети с учётом пространственного распределения путей протекания токов в контексте установления степени соответствия величин этих токов критериям искробезопасности внешних

электрических присоединений структуры электротехнического комплекса участка шахты.

Анализ исследований и публикаций

Проблематика обеспечения безопасности эксплуатации шахтных участков электротехнических комплексов в научной литературе не рассматривается в контексте применения устройств защиты от утечек тока на землю, включая вопросы повышения эффективности их защитной функции [1,2]. При этом, рассматривается регламентируемая нормативными документами [3] концепция построения системы электроснабжения участка шахты, предусматривающая применения системы заземления металлических корпусов как стационарного, так и перемещаемого электрооборудования, применение радиальных схем присоединения силовых гибких экранированных кабелей с заземляемыми центральными проводниками (заземляющими жилами). В исследованиях [4,5] обосновывается функциональная недостаточность применяемой концепции построения системы электроснабжения участка шахты в контексте противодействия формированию электропоражающего фактора. В частности, рассматривается эффект формирования значительных по величине ёмкостных проводимостей изоляции – цепей «фаза-земля» вследствие подключения к заземлению центральных проводников силовых гибких кабелей. Кроме этого, выявлены ограничения в формировании защитной функции структурных компонентов самих устройств защиты от утечек тока на землю.

В то же время, очевидным результатом появления цепи однофазной утечки тока на землю (вследствие касания человеком фазы сети) является смещение потенциала нейтрали и формирование токов в распределённых территориально ответвлениях системы заземления электросети участка шахты. Величины этих токов могут удовлетворять, либо не удовлетворять критериям искробезопасности [6,7], что предопределяет актуальность соответствующего исследования.

Цель исследования

Целью исследования является установление степени влияния ёмкостных составляющих проводимости изоляции кабельной сети участка шахты на формирование и распределение токов в участковой сети заземления в контексте выявления состояний, не удовлетворяющих

критерию искробезопасности электрических цепей.

Результаты исследования

Заземляющая сеть системы электроснабжения технологического участка шахты представляет собой структуру проводимостей, территориально распределённую по площади размещения электрооборудования участка между точками присоединения к земле технических средств заземления. Наличие тока в сети заземления является следствием возникновения цепи однофазной утечки (R_{ym}) на землю в случае повреждения изоляции фазного проводника, либо касания к фазному проводнику (находящемуся под напряжением сети) человека, имеющего контакт с землёй.

В этом случае нарушается симметрия сети, происходит смещение напряжения нейтрали, и напряжения фаз принимают значения:

$$\begin{aligned} \Delta \dot{U}'_A &= \dot{U}_A - \dot{U}_N; \quad \Delta \dot{U}'_B = \dot{U}_B - \dot{U}_N; \\ \Delta \dot{U}'_C &= \dot{U}_C - \dot{U}_N \end{aligned} \quad (1)$$

где $\dot{U}'_A; \dot{U}'_B; \dot{U}'_C$ – векторы фазных напряжений сети; \dot{U}_N – вектор напряжения смещения нейтрали сети при несимметрии нагрузки:

$$\dot{U}_N = \frac{\dot{U}_A Y_{A-3} + \dot{U}_B Y_{B-3} + \dot{U}_C Y_{C-3}}{Y_{A-3} + Y_{B-3} + Y_{C-3}} \quad (2)$$

С одной стороны, эти соотношения позволяют определить:

– ток, протекающий через человека (через сопротивление утечки):

$$I_{ym} = \frac{\dot{U}_C - \dot{U}_N}{R_{ym}}; \quad (3)$$

– ток через комплексное сопротивление ($Z=1/Y$) изоляции:

$$\dot{I}_A = \frac{\dot{U}_A - \dot{U}_N}{Z_{A-3}}; \quad \dot{I}_B = \frac{\dot{U}_B - \dot{U}_N}{Z_{B-3}};$$

$$\dot{I}_C = \frac{\dot{U}_C - \dot{U}_N}{Z_{C-3}} \quad (4)$$

Применительно к структуре системы заземления участка шахты токи, представленные выражениями (3, 4), определяют формирование соответствующих составляющих тока утечки на землю, распределённых в её ветвях проводимости.

Рассматривая процессы в сети заземления технологического участка шахты, введём следующие допущения:

– технологический комплекс участка шахты представлен электропотребителями (табл. 1), каждый из которых подключен к трёхфазной сети линейного напряжения 1140 В промышленной частоты 50 Гц посредством одного шахтного экранированного гибкого кабеля марки КГЭШ. Параметры кабелей сведены в табл.1 [8];

– параметрами магистрального кабеля, связывающего выход трансформатора (ТВ1) участковой подстанции со входом радиальной схемы

Табл. 1. Параметры кабельных присоединений расчётной схемы электротехнического комплекса участка шахты

№ п/п	Наименование электропотребителя	Сечение силовой жилы кабеля марки КГЭШ, мм ²	Удельная ёмкость изоляции, (мкФ/фазу) /км	Длина кабеля, км	Ёмкость изоляции кабеля, мкФ/фазу
1	Комбайн очистной	70	0,870	0,35	0,3045
2	Конвейер лавы	50	0,670	0,35	0,2345
3	Конвейер штрека	50	0,670	0,10	0,0670
4	Маслостанция №1	35	0,520	0,05	0,0260
5	Маслостанция № 2	25	0,424	0,05	0,0212
6	Станция орошения	16	0,363	0,05	0,0182

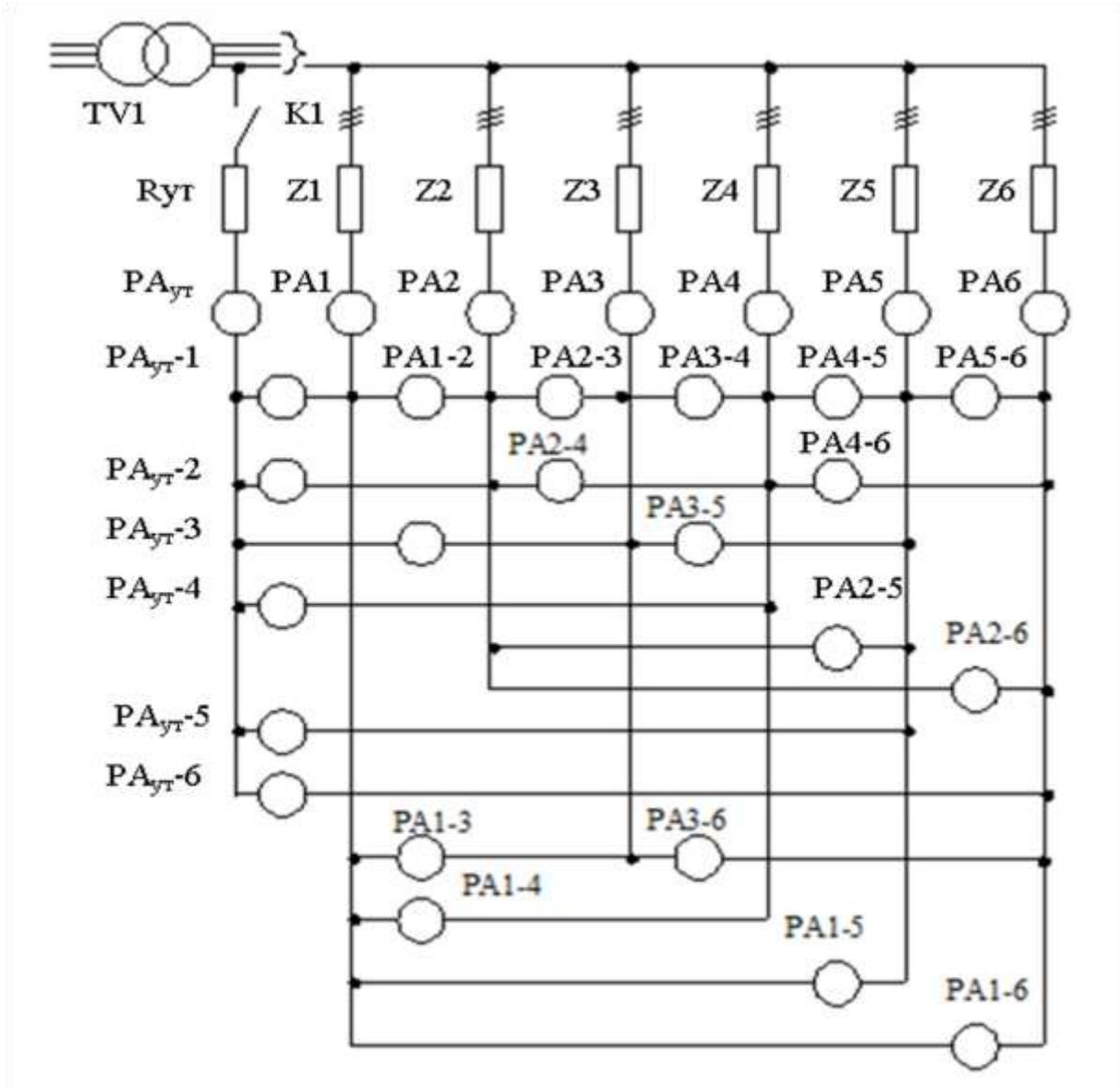


Рис. 1. Расчётная схема измерения токов в распределённых ветвях заземляющей сети участка шахты.

соединения гибких кабелей пренебрегаем в связи с малой протяжённостью последнего;

- активные ($R_{из}$) и ёмкостные ($X_{из}$) сопротивления изоляции каждого гибкого кабеля (между фазами и землёй) на расчётной схеме объекта исследования (рис. 1) могут быть представлены сосредоточенными комплексными величинами Z_i , структурно соответствующими схеме (рис. 2);

- ёмкостные сопротивления изоляции каждой фазы конкретного кабеля равны между собой, определяются структурой кабеля соответствующей марки, его сечением и протяжённостью, и соответствуют параметрам, приведенным в табл. 1;

- активные сопротивления изоляции кабелей зависят от их технического состояния. Принимаем, что активные сопротивления

изоляции каждой фазы каждого кабеля равны между собой. В исследовании рассматриваем два варианта: $R_{из}=0,5$ МОм / фазу; $R_{из}=1,0$ МОм/фазу;

- активными сопротивлениями элементов заземляющей сети пренебрегаем в виду их предельно малых величин;

- прикосновение к фазе сети человека, имеющего контакт с землёй, имитируется замыканием контакта K1 (рис. 1), соединяющим цепь утечки ($R_{ут}$) на землю;

- с учётом возможных различий физических состояний человека, принимаем величину его сопротивления в фиксированных значениях: $R_{ут}=1,0$ кОм; $R_{ут}=0,8$ кОм; $R_{ут}=1,2$ кОм;

- вычисление величин токов в заземляющей сети производим в её ветвях в соответствии с расчётной схемой (рис. 1) в местах подключения амперметров (PA_i) методом компьютерного

моделирования [9] с учётом стационарности процесса, синусоидальности, периодичности симметрии в фазах и полуволнах токов сети.

Результаты моделирования сведены в табл. 2. Для сравнения в колонке 3 данной таблицы приведены величины токов в ветвях сети заземления участка шахты (рис. 1) при $R_{ym}=1,0$ кОм, величинах активного сопротивления изоляции каждого фазного проводника каждого кабеля $R_{из}=0,5$ мОм для случая полной компенсации ёмкости изоляции (отсутствия ёмкости изоляции) фаз сети ($C_{из}=0$ мкФ/фазу; $X_{из}=\infty$).

Анализ результатов моделирования позволяет сделать следующие выводы относительно процессов в шахтной участковой сети заземления, обусловленных возникновением цепи однофазной утечки тока на землю:

– активные сопротивления изоляции фазных проводников шахтных силовых гибких кабелей, соответствующие по величине техническим условиям их эксплуатации, не оказывают существенного влияния на величину токов в ветвях проводимостей участковой системы заземления;

– существенное влияние на величину токов в ветвях проводимостей системы заземления технологического участка шахты оказывают ёмкости изоляции фазных проводников силовых гибких кабелей (образуемые между фазными проводниками и землёй);

– электропитание потребителей высокой мощности предполагает применение силовых гибких кабелей, отличающихся высоким уровнем параметра ёмкости изоляции, что, в свою очередь, предопределяет формирование относительно высокого уровня токов в ветвях проводимости системы заземления, проходящих между точками заземления электропотребителей высокой мощности;

– если сопротивление человека, прикоснувшегося к фазе сети (сопротивление однофазной утечки на землю), оказывается меньшим нормативно регламентируемой величины ($R_{ym}=1,0$ кОм), это обуславливает увеличение токов в ветвях проводимости сети заземления;

– зафиксированные величины токов в ветвях проводимости сети заземления, прилегающих к точкам заземления электрооборудования высокой мощности (электропитание осуществляется посредством силовых кабелей больших сечений и протяжённостей, т.е., обладающих высокими величинами ёмкости изоляции), превышают предельно допустимые значения, отвечающие критериям искробезопасности, в соответствии с которыми допустимые уровни энергии в искробезопасной электрической цепи простираются от 20 до 180 мкДж, что соответствует максимальному напряжению разомкнутой электрической цепи 36 В, значению тока короткого замыкания 120 мА, допустимой мощности 0,45 Вт) [6,7].

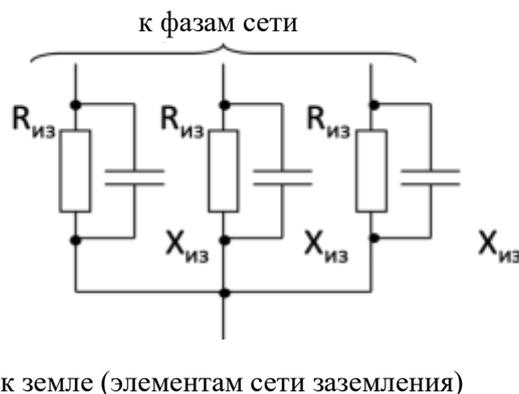


Рис. 2. Структура комплексного сопротивления изоляции кабельного присоединения Z_i расчётной схемы по рис. 1

Табл. 2. Результаты вычисления токов в ветвях сети заземления (рис. 1) при возникновении цепи утечки (R_{ym}) тока на землю

№ п/п	Обозначение амперметра	Показания амперметров, мА						
		$C_{из} = 0$ мкФ/фазу ($X_{из} = \infty$) $R_{из} = 0,5$ мОм/фазу $R_{yt} = 1,0$ кОм	$C_{из} \gg 0$ мкФ/фазу (соответствует табл. 1)					
			$R_{из} = 0,5$ мОм /фазу			$R_{из} = 1,0$ мОм/фазу		
			R_{yt} (кОм):			R_{yt} (кОм):		
			0,8	1,0	1,2	0,8	1,0	1,2
1	2	3	4	5	6	7	8	9
1	РА _{УТ}	22,93	368,60	347,9	327,00	372,40	351,90	331,00
2	РА1	3,822	167,00	157,60	148,10	168,80	159,50	150,10
3	РА2	3,822	128,60	121,40	114,10	130,0	122,91	115,60
4	РА3	3,822	36,89	34,81	32,72	37,19	35,14	33,05
5	РА4	3,822	14,66	13,84	13,01	14,52	13,72	12,91
6	РА5	3,822	12,12	11,44	10,75	11,88	11,23	10,56

7	РА6	3,822	10,56	9,96	9,361	10,24	9,675	9,101
8	РА _{УТ} -1	3,822	76,50	72,19	67,86	77,32	73,06	68,72
9	РА _{УТ} -2	3,822	71,03	67,03	63,00	71,78	67,82	63,80
10	РА _{УТ} -3	3,822	57,93	54,66	51,38	58,52	55,29	52,01
11	РА _{УТ} -4	3,822	16,33	51,64	48,54	55,27	52,22	49,12
12	РА _{УТ} -5	3,822	54,35	51,29	48,20	54,89	51,86	48,78
13	РА _{УТ} -6	3,822	54,11	51,07	48,00	54,65	51,64	48,57
14	РА1-2	0	5,482	5,173	4,862	5,545	5,239	4,928
15	РА1-3	0	18,60	17,55	16,50	18,81	17,77	16,72
16	РА1-4	0	21,81	20,58	19,34	22,06	20,84	19,61
17	РА1-5	0	22,18	20,94	19,68	22,44	21,20	19,95
18	РА1-6	0	22,42	21,16	19,89	22,68	21,43	20,16
19	РА2-3	0	13,12	12,38	11,63	13,27	12,54	11,79
20	РА2-4	0	16,33	15,41	14,48	16,52	15,60	14,68
21	РА2-5	0	16,70	15,76	14,82	16,90	15,96	15,02
22	РА2-6	0	16,94	15,98	15,03	17,13	16,19	15,23
23	РА3-4	0	3,211	3,030	2,848	3,248	3,068	2,886
24	РА3-5	0	3,587	3,385	3,181	3,628	3,428	3,224
25	РА3-6	0	3,821	3,606	3,390	3,865	3,652	3,436
26	РА4-5	0	0,376	0,355	0,333	0,380	0,359	0,338
27	РА4-6	0	0,611	0,576	0,542	0,618	0,584	0,549
28	РА5-6	0	0,235	0,222	0,208	0,238	0,225	0,211

Таким образом, совпадение состояния электрической сети участка шахты с наличием цепи утечки тока на землю с состоянием нарушения контакта в элементах цепи заземления может спровоцировать искрение, что представляет собой потенциальную опасность взрыва метано-воздушной смеси в шахтной атмосфере.

Из анализа структуры компонентов электротехнического комплекса участка шахты [4,5] следует, что формирование ёмкостных проводимостей между фазами кабельной сети и землёй является следствием присоединения к заземлению центральных проводников шахтных гибких экранированных кабелей, играющих роль заземляющих жил для присоединения к заземлению металлических корпусов электрооборудования, перемещаемого в процессе эксплуатации. Таким образом, обязательное [3] присоединение центральных проводников гибких кабелей в сети заземления системы электроснабжения участка шахты априори 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, определяемые ГОСТ 30852.10-2002; ГОСТ Р МЭК 60079-11 – 2010 [6,7]. Это позволяет утверждать о целесообразности изменения концепции построения системы электроснабжения участка шахты в части отказа

от присоединения центральных проводников шахтных гибких экранированных кабелей к заземлениям при условии применения локальных средств выявления контакта фазы сети с корпусом электроустановки, перемещаемой в процессе эксплуатации с функцией защитного отключения. Соответствующие технические решения разработаны [4].

Выводы

Установлена существенность влияния ёмкости изоляции силовых проводников гибких кабелей шахтной усатковой электрической сети на величину токов в ветвях проводимости системы заземления участка шахты в случае возникновения цепи однофазной утечки тока на землю.

Зафиксированы величины токов в ветвях проводимости сети заземления, прилегающих к точкам заземления электрооборудования высокой мощности, превышающие предельно допустимые значения, отвечающие критериям искробезопасности.

Обоснована целесообразность изменения концепции построения системы электроснабжения участка шахты в части отказа от присоединения центральных проводников шахтных гибких экранированных кабелей к заземлениям при условии применения локальных средств выявления контакта фазы сети с корпусом электроустановки.

Список литературы

1. Дзюбан В.С. Аппараты защиты от токов утечки в шахтных электрических сетях / В.С. Дзюбан. – М.: Недра, 1982. – 152 с.
2. Вареник Є.О. Обмеження та захист від витоків струму у рудникових електроустановках напругою 1200 В: дис. ... канд. техн. наук: 05.09.03 / Вареник Євген Олександрович. – Днепропетровск, 2004. – 191 с.
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. – [Вступил в силу 01.01.79]. – М.: Издательство стандартов, 1978. – 13 с. – (Межгосударственный стандарт).
4. Денисова Е.В. Специфика заземления электрооборудования участка шахты в контексте соответствия критерию эффективности защиты персонала от электропоражения / Е.В. Денисова, И.Б. Гуляева, М.К. Маренич – Горная промышленность. Научно-техн. и производств. журнал, 2022, №4. – С. 110-118.
5. Гуляева И.Б. Анализ эффективности защитной функции автокомпенсатора ёмкостного тока в структуре аппарата защиты серии «АЗУР-1» / И.Б. Гуляева, Е.С. Дубинка, М.К. Маренич. – Вестник ДонНТУ, Вып 1(27)2022. – С. 50-60.
6. 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. [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://docs.cntd.ru/document/1200103397?marker=7D20K3>. – Загл. с экрана.
7. Взрывоопасные среды. Часть 11. Искробезопасная электрическая цепь «i». 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. [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://files.stroyinf.ru/Data2/1/4293801/4293801459.pdf>. – Загл. с экрана.
8. Сидоренко И.Т. Проектирование электроснабжения горных предприятий: учебное пособие / И.Т. Сидоренко и др. – Москва: Вологда: Инфра-Инженерия, 2021. – С. 124.
9. Чернышов Н.Г. Моделирование и анализ схем в Electronics Workbench: учебное пособие / Н.Г. Чернышов, Т.И. Чернышова/ Тамбов, Изд-во Тамб. гос. техн. ун-та, 2005. – 52 с.

M.K. Marenich, I.B. Guliaeva /Cand. Sci. (Eng.)/
Donetsk National Technical University (Donetsk)

THE INSULATION CAPACITY OF THE ELECTRICAL NETWORK OF THE MINE SITE AS A FACTOR IN THE FORMATION OF CURRENT IN THE GROUNDING CIRCUIT

Background. *The relevance of the study is justified by the need to identify the degree of influence of the insulation capacity of the cables of the mine district electrical network on the magnitude of currents in the branches of the conductivity of the grounding network.*

Materials and/or methods. *the results of the study of the nature of the influence of the insulation capacity of the cables of the mine district electrical network on the values of currents in the branches of the conductivity of the grounding system in the conditions of the occurrence of a single-phase leakage current to the ground are presented.*

Results. *The significance of the influence of the insulation capacity of the power conductors of flexible cables of the mine usatkov electric network on the magnitude of currents in the conduction branches of the grounding system of the mine in the event of a single-phase leakage current to the ground.*

The values of currents in the conduction branches of the grounding network adjacent to the grounding points of high-power electrical equipment exceeding the maximum permissible values that meet the intrinsic safety criteria are recorded.

The expediency of changing the concept of building a power supply system for a mine site is justified in terms of refusing to connect the central conductors of mine flexible shielded cables to earths,

provided that local means of detecting the contact of the network phase with the electrical installation housing are used.

Conclusion. *As a result of the study, a significant influence of the insulation capacity of the cables of the electrical network of the mine site on the magnitude of currents in the conduction branches of the grounding system was established. The conditions for the formation of a current in the grounding network that exceeds the normalized value according to the intrinsic safety criterion are established. The expediency of changing the concept of building a power supply system for a mine site is justified in terms of refusing to connect the central conductors of mine flexible shielded cables to earths, provided that local means of detecting the contact of the network phase with the electrical installation housing are used.*

Keywords: *mine precinct electrical network, insulation capacity, grounding network, current, modeling, analysis, power supply system, construction concept, justification.*

Сведения об авторах

М.К. Маренич

SPIN-код: 7697-9855

Телефон: +7 (949) 328-05-79

Эл. почта: marenich_mk@mail.ru

И.Б. Гуляева

SPIN-код: 7065-0724

ORCID iD: 0000-0001-8215-4297

Телефон: +7 (949) 332-75-75

Эл. почта: iraguliaeva@gmail.com

Статья поступила 01.09.2022 г.

© М.К. Маренич, И.Б. Гуляева, 2022

Рецензент д.т.н., проф. Ковалёв А.П.