

## II. ПРОМЫШЛЕННАЯ БЕЗОПАСНОСТЬ

УДК 622 (621.315.05+621.316.93) 004.2

О.А. ДЕМЧЕНКО, канд. техн. наук, и. о. директора,  
Л.А. МУФЕЛЬ, канд. техн. наук, ст. науч. сотрудник; МакНИИ,  
г. Макеевка

### ОЦЕНКА ЭЛЕКТРО– И ВЗРЫВОБЕЗОПАСНОСТИ ПОДЗЕМНОЙ ВЫСОКОВОЛЬТНОЙ СЕТИ

*На основе аналитических исследований проведена оценка защитных характеристик цепи местного заземления и общешахтной сети заземления. Показано, что токи утечки, формируемые активной и емкостной проводимостями, образуют вне рабочей сети цепи относительно земли, обуславливающие электропоражение людей и опасное искрение в цепи заземления. Предложена защита от замыкания фаз на корпус путем наложения на внутреннюю поверхность оболочек электрооборудования защитной изоляции с пробивным напряжением не менее 40 кВ/мм и одновременно предусмотрено защитное изолирование токоведущих частей, которое является второй линией защиты от замыканий. Представлена новая структура подземной высоковольтной сети, исключая цепи местного заземления и общешахтной сети заземления, что кардинально повышает безопасность применения электрической энергии в шахтах.*

**Ключевые слова:** токи утечки, местное заземление, высоковольтная сеть, электрооборудование, электропоражение, взрывобезопасность.

Согласно действующей в угольной отрасли концепции безопасности подземная высоковольтная сеть (ПВС) построена так, что возникающие в аварийных режимах токи утечки протекают по цепи местного заземления и общешахтной сети заземления. Токи утечки вызваны активной составляющей вследствие повреждения изоляции и емкостной составляющей тока утечки. До тех пор, пока изоляция токопроводящих проводников не повреждена, а емкость не превышает нормированного значения, сеть не представляет опасности. Опасность поражения электрическим током возникает в случаях, когда человек прикасается к токопроводящему проводнику, нормально находящемуся под напряжением, или к оболочке электрооборудования, случайно оказавшейся под напряжением. Возникающий при этом ток, текущий вне рабочей сети, указывает на появление аварий-

ного режима в трехфазной сети и для его устранения необходимо проведение ремонтных и профилактических работ. Поскольку оказавшийся под напряжением человек стоит на земле, протекающий через него ток утечки является опасным с точки зрения поражения. Большую опасность в подземных выработках представляет короткое замыкание фазы на корпус (землю), поскольку это, в отдельных случаях, приводит к поражению людей электрическим током, взрыву и пожарам в шахтах. Дуговые замыкания на корпус вызывают прожоги взрывобезопасных оболочек и потери ими взрывозащитных свойств.

Для обеспечения безопасной работы ПВС необходимы радикальные меры борьбы с утечками тока. Защита от утечек тока является одним из важных мероприятий для предупреждения опасности поражения электрическим током и опасности взрыва метана при повреждении изоляции и образовании емкости сети в протяженных кабельных линиях. Однако даже эффективная защита не может обеспечить полной гарантии безопасности ведения работ в шахтах. Радикальное решение проблемы по обеспечению электробезопасности и взрывобезопасности состоит в исключении условий для перехода токов утечки на землю и устранении формирования емкостной проводимости вне рабочей сети.

Цель статьи – разработка эффективных мер защиты от поражения человека электрическим током, взрывов и пожаров в шахтах путём оценки электро- и взрывобезопасности подземной высоковольтной сети.

Произведем оценку электробезопасности и взрывобезопасности ПВС с учетом применяемых защитных мер безопасности таких, как местное заземление и общешахтная сеть заземления.

Как уже отмечалось, электропоражение происходит, когда человек касается токоведущего провода или корпуса, оказавшегося под напряжением (рис. 1). Во всех приведенных вариантах опасность поражения человека сопровождается утечками тока на землю и протеканием его через тело человека по цепи “рука - ноги” и “рука – рука”. На возможность электропоражения существенно влияет наличие в шахтной атмосфере влаги и токопроводящей угольной и породной пыли, которые снижают электрическое сопротивление тела человека, а также сопротивление изоляции электрооборудования, в результате чего усугубляется опасность электропоражения.

Из анализа условий поражения людей током следует, что в применяемой в настоящее время в шахтах схеме высоковольтного электроснабжения имеются электрические цепи для протекания тока через тело человека, в том числе при нарушении параметров цепи местного заземления. Такие цепи образованы распределенными параметрами (емкостное и активное сопротивление) высоковольтной сети, токопроводимостью вмещающих

пород выработок ввиду их обводненности и прокладки по ним металлической крепи, рельсового пути, трубопроводов, проводников общешахтной сети заземления и других открытых токопроводящих устройств.

В ПВС местное заземление является единственной технической мерой защиты от поражения электрическим током. Защита от утечки тока пока не выполняет такую функцию, однако ее можно обеспечить быстродействующим отключением напряжения питающей сети, позволяющим сократить время прохождения тока через тело человека.

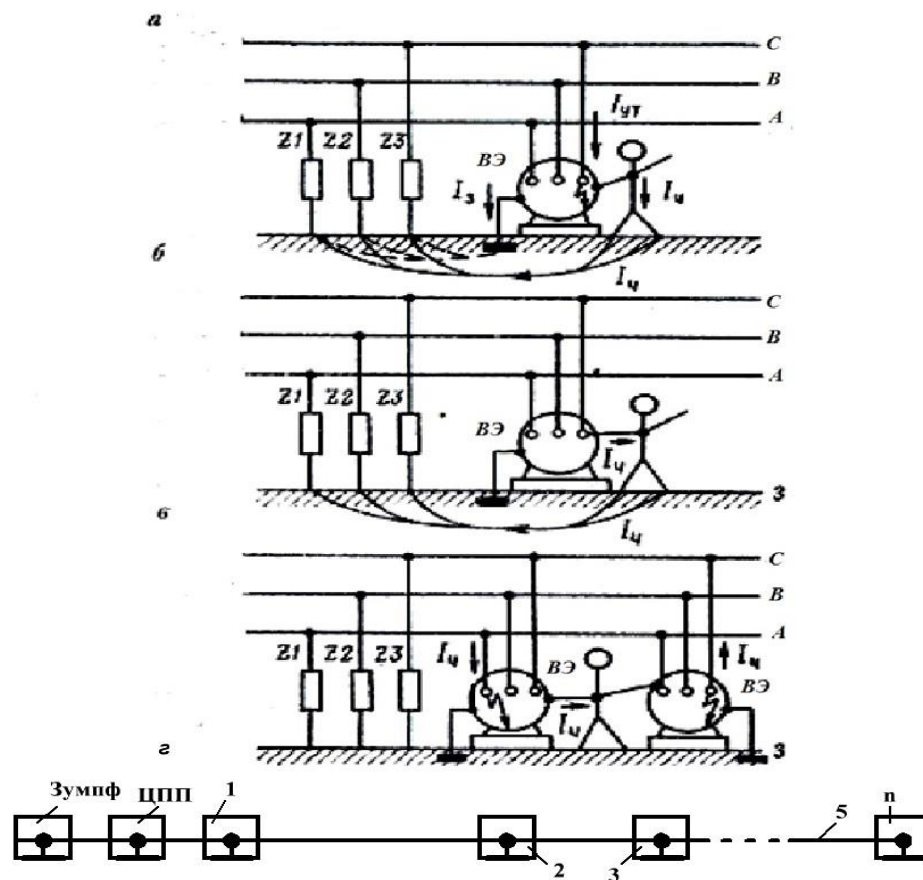


Рис. 1. Условия поражения человека электрическим током в высоковольтной сети переменного тока:

*а* – прикосновение человека к корпусу и замыкание фазы на корпус; *б* – прикосновение человека к токоведущему проводу, находящемуся под напряжением; *в* – прикосновение человека одновременно к двум корпусам и замыкание разных фаз на корпус; *г* – общешахтная сеть заземления: 1, 2, 3, *n* – различные виды электрооборудования с местным заземлением; 5 – жила заземления в кабеле; ВЭ – высоковольтный электродвигатель; ЦПП – центральная подземная подстанция;  $Z_1, Z_2, Z_3$  – суммарное (активное и емкостное) сопротивление фаз;  $I_{ут}, I_3, I_ч$  – токи утечки, протекающие через заземление и тело человека.

При замыкании фазы на корпус через местное заземление образуется замкнутая цепь тока и при прикосновении к случайно оказавшемуся под напряжением электрооборудованию человек оказывается подсоединенным параллельно защитному заземлению (рис. 1, а). Напряжение, действующее на тело человека, определяется известной формулой:

$$\bar{U}_{C_0} = \frac{\bar{U}_{BC} \cdot Y_B - \bar{U}_{CA} \cdot Y_A}{Y_A + Y_B + Y_C + Y_3}, \quad (1)$$

где  $\bar{U}_{BC}$ ,  $\bar{U}_{CA}$  – линейные напряжения;

$Y_A$ ,  $Y_B$ ,  $Y_C$  – полные проводимости изоляции трех фаз относительно земли;

$Y_3$  – проводимость цепи местного заземления.

Учитывая, что проводимость защитного заземления  $Y_3$  намного больше проводимости  $Y_0 = Y_A + Y_B + Y_C$  изоляции проводов относительно земли, то формулу (1) можно преобразовать следующим образом:

$$\bar{U}_{C_0} = \frac{\bar{U}_{BC} \cdot Y_B - \bar{U}_{CA} \cdot Y_A}{Y_3}. \quad (2)$$

В частном случае, когда проводимости изоляции фаз одинаковые, т.е.  $Y_A = Y_B = Y$ , формула (2) примет вид:

$$\bar{U}_{C_0} = \frac{(\bar{U}_{BC} - \bar{U}_{CA}) \cdot Y}{Y_3}. \quad (3)$$

При равенстве модулей линейных напряжений и сдвиге линейных напряжений по фазе на угол  $120^\circ$  разность векторов линейных напряжений  $\bar{U}_{BC}$  и  $\bar{U}_{CA}$  равна  $\sqrt{3}U_L$ . Тогда

$$U_{C_0} = \frac{\sqrt{3}U_L \cdot Y}{Y_3}. \quad (4)$$

Переходя от проводимостей к сопротивлениям, формула (4) примет вид:

$$U_{C_0} = \frac{\sqrt{3}U_L \cdot r_3}{Z}, \quad (5)$$

где  $r_3$  – сопротивление цепи заземления;

$Z$  – общее сопротивление фаз сети.

В формуле (5) величина  $\frac{\sqrt{3}U_{\text{Л}}}{Z} = I_3$  представляет ток однофазного замыкания на землю.

При наличии большого сопротивления изоляции фаз относительно земли, значение тока замыкания на землю через цепь местного заземления и значение напряжения на корпусе электрооборудования с поврежденной изоляцией одной из фаз обычно весьма малы и не представляют опасности для человека. Когда сопротивление изоляции одной из фаз снижено или превалирует емкость сети, происходит замыкание тока на землю. Если этот ток превышает предельное безопасное значение, возникает опасность для жизни человека.

В случае прикосновения человека к одной токоведущей фазе (рис. 1, б) опасность его поражения зависит от распределённых параметров сети, вызывающих утечки тока на землю и от сопротивления тела человека.

Наибольшая опасность для человека возникает в случае одновременного замыкания на землю в двух разных фазах (рис. 1, в), поскольку напряжение фазы составляет:

$$U_{\text{C}_0} = \frac{U_{\text{Л}} \cdot r_3}{r_{\text{Л}} + r_3 + r'_3 + r'_{\text{Л}}}, \quad (6)$$

Разделив правую часть уравнения на  $r_3$ , получим:

$$U_{\text{C}_0} = \frac{U_{\text{Л}}}{1 + \frac{r_{\text{Л}} + r'_3 + r'_{\text{Л}}}{r_3}}, \quad (7)$$

где  $r_3, r'_3$  – сопротивления индивидуальных местных заземлений в точках повреждения;

$r_{\text{Л}}, r'_{\text{Л}}$  – сопротивления токоведущих проводов до точек повреждения.

Наибольшее значение напряжения корпуса относительно земли достигается при замыканиях вблизи источника тока, т.е. при  $r_{\text{Л}} = 0$  и  $r'_{\text{Л}} = 0$ . Тогда

$$U_{\text{C}_0} = \frac{U_{\text{Л}}}{1 + \frac{r'_3}{r_3}}. \quad (8)$$

В этом случае линейное напряжение распределится между точками замыкания на землю пропорционально сопротивлениям отдельных зазем-

лителей и будет достигать значения, которое опасно для жизни человека. Следовательно, защитное заземление обеспечивает безопасное напряжение на корпусе относительно земли только при однофазном замыкании. В случае одновременного замыкания на землю в двух фазах опасность для жизни сохраняется.

Незначительное снижение напряжения корпусов относительно земли достигается устройством общей сети заземления (рис. 1, з), соединяющей между собой заземлители в шахте. Потерю напряжения в общей сети заземления можно определить по формуле:

$$\Delta U_c = \frac{U_{л} \cdot r_c}{r_{л} + r_c + r'_л}, \quad (9)$$

где  $r_c$  – сопротивление заземляющей сети между точками замыкания на землю.

Напряжение корпуса относительно земли можно определить по формуле:

$$U_{c_0} = X_0 \frac{\Delta U_c}{a}, \quad (10)$$

где  $X_0$  – расстояние точки замыкания на землю от точки общей сети заземления, имеющей нулевое напряжение относительно земли;

$a$  – расстояние между точками замыкания на землю.

Отмечаем, что с помощью устройства общей сети заземления невозможно снизить напряжение на корпусах электрооборудования до безопасного значения для жизни человека. Вместе с тем, устройство общей сети заземления обуславливает, в случае повреждения изоляции в одном месте, появление напряжения на корпусах всего электрооборудования в шахтах, в том числе расположенного в загазированных выработках.

Оценивая общую сеть заземления, можно выделить крупный ее недостаток в части формирования напряжения на корпусах всего электрооборудования в шахте относительно земли при повреждении электрической сети. В этом случае повреждение в сети заземления вызывает искрение, способное воспламенить метановоздушную смесь, и создает условия для электропоражения людей особенно при двойных замыканиях в сети.

В том случае, когда местное заземление отсутствует или заземлитель выполнен с достаточно большим сопротивлением растеканию, корпус

электрооборудования при замыкании фазы окажется под тем же напряжением, которое имеют при нормальной работе токоведущие части.

Прикосновение человека, стоящего на почве выработки, к корпусу, случайно находящемуся под напряжением, приводит к тому, что он оказывается под напряжением фазы относительно земли. В сети с изолированной нейтралью цепь замыкается через сопротивления двух других фаз относительно земли. При этом напряжение, под которым оказывается человек, определяется формулой (1), (в знаменателе отсутствует проводимость земли  $Y_3$ ), т.е.

$$U_{C_0} = \frac{\bar{U}_{BC} - \bar{U}_{CA} \cdot Y_A}{Y_A + Y_B + Y_C}. \quad (11)$$

Поскольку проводимость изоляции фазы, к которой прикоснулся человек, входит только в знаменатель формулы (11), напряжение этой фазы относительно земли падает с увеличением проводимости ее изоляции, в том числе и за счет дополнительной цепи, замкнутой через тело человека, и растет с ее уменьшением при условии, что сопротивление изоляции двух других фаз не меняется.

При металлическом замыкании фазы С на корпус (землю) ( $Y_C \rightarrow \infty$ ) её напряжение относительно земли равно нулю. При полном замыкании на землю одной из двух других фаз, например при  $Y_B \rightarrow \infty$ , напряжение фазы С относительно земли равно линейному напряжению

$$U_{C_0} = \bar{U}_{BC}. \quad (12)$$

Из этого следует, что в зависимости от соотношения проводимостей изоляции трех фаз относительно земли, напряжение каждой из них относительно земли может изменяться в пределах от нуля до линейного напряжения. Поэтому невозможно предвидеть под каким напряжением окажется прикоснувшийся к фазе человек. Следовательно, прикосновение к корпусам незаземленного электрооборудования, оказавшимся под напряжением, и к токоведущей фазе, в ряде случаев, опасно для жизни человека. При этом необходимо учитывать сопротивление тела человека.

Поскольку ПВС является протяженной и разветвленной, и в ней преобладает емкостная проводимость, то активной можно пренебречь. В этом случае значительный интерес представляет рассмотрение однофазного замыкания на корпус согласно схеме, приведенной на рис. 2. В нормальном режиме работы, когда отсутствует замыкание фазы на корпус, фазные токи равны геометрической сумме токов нагрузки и емкостных токов фаз. Если

нагрузка сети симметрична, а емкости отдельных фаз одинаковы и равны  $C$ , то симметричны и одинаковы будут фазные напряжения  $U_A, U_B, U_C$ .

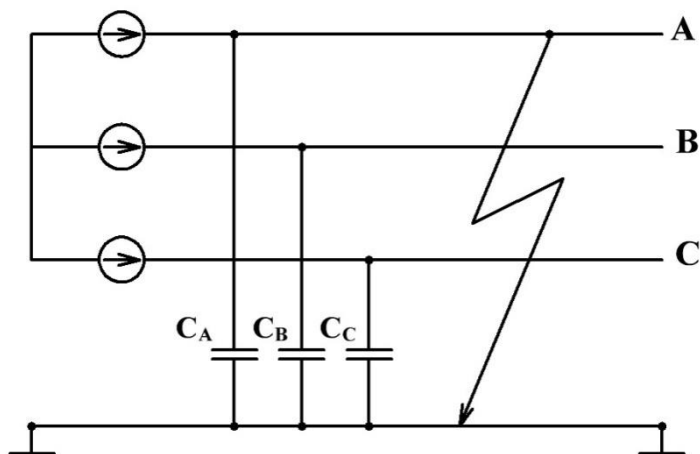


Рис. 2. Однофазное замыкание на землю в сети

Тогда емкостные токи отдельных фаз будут равны:

$$\left. \begin{aligned} \dot{I}_A &= j\omega C \dot{U}_A \\ \dot{I}_B &= j\omega C \dot{U}_B \\ \dot{I}_C &= j\omega C \dot{U}_C \end{aligned} \right\}.$$

Токи  $\dot{I}_A, \dot{I}_B, \dot{I}_C$  по значению равны, а по фазе опережают соответствующее напряжение на  $90^\circ$ . Эти токи в сумме будут равны, вследствие чего нулю будет равен и ток в земле. Напряжение между нулевой точкой сети и землей будет равно:

$$U_0 = \frac{\dot{U}_A Y_A + \dot{U}_B Y_B + \dot{U}_C Y_C}{Y_A + Y_B + Y_C}, \quad (13)$$

где  $Y_A = Y_B = Y_C = j\omega C$  – емкостные проводимости отдельных фаз в нормальном режиме.

При металлическом замыкании на землю одной из фаз (например А)  $Y_A = \infty$  и в точке повреждения фаза А получает потенциал земли, вследствие чего потенциал нулевой точки сети, до этого имеющей потенциал земли, приобретёт по отношению к земле напряжение, равное фазному. Напряжения двух неповрежденных фаз по отношению к земле увеличиваются в  $\sqrt{3}$  раз и равны:



$$\dot{U}_B = \sqrt{3} U_A e^{j150^\circ}, \quad \dot{U}_C = \sqrt{3} U_A e^{-j150^\circ}. \quad (14)$$

В соответствии с зависимостями (14) в  $\sqrt{3}$  раз увеличиваются емкостные токи фаз  $I_B$  и  $I_C$ , опережая напряжения  $\dot{U}_B$  и  $\dot{U}_C$  на  $90^\circ$ , суммируются в земле, возвращаются через поврежденную фазу, ток в которой равен:

$$I_A = -(I_B + I_C) = 3j\omega C \dot{U}_A.$$

Ток  $I_A$  опережает напряжение  $\dot{U}_A$  на  $90^\circ$  и определяемый емкостями фаз системы, обычно не превышает нескольких ампер. Учитывая, что ПВС является протяженной и разветвленной, значение емкости может составлять до 30 мкФ. В свою очередь, емкость сети представляет емкостное сопротивление, которое можно определить по формуле:

$$X_C = \frac{3180}{C}, \text{ Ом,}$$

а ток утечки – по формуле:

$$I_A = \frac{U_\Phi}{X_C} \quad \text{или} \quad I_A = \frac{U_\Phi \cdot C}{3180}.$$

Результаты вычислений тока утечки представлены зависимостями  $I_A = f(C)$  и  $X_C = f(C)$  на рис. 3.

Анализ рис. 2 и рис. 3 показывает, что емкость распределительной сети и цепь местного заземления формируют электрическую цепь для перехода тока утечки на землю и, кроме того, ток утечки ( $I_A$ ) прямо пропорционален емкости сети. В ПВС, для которой свойственно преобладание емкости, короткое замыкание фазы на землю или на корпус электрооборудования связано с опасностью поражения людей электрическим током.

Опасность утечек усиливается применением в ПВС общешахтной сети заземления, поскольку утечки и появление на одном из корпусов электрооборудования напряжения относительно земли, влечет за собой появление напряжения на других корпусах электрооборудования, установленного в шахте, включая электрооборудование, расположенное в загазированных выработках. Прикосновение человека к токоведущей фазе или к корпусу электрооборудования, находящемуся под напряжением, приводит к его поражению электрическим током.

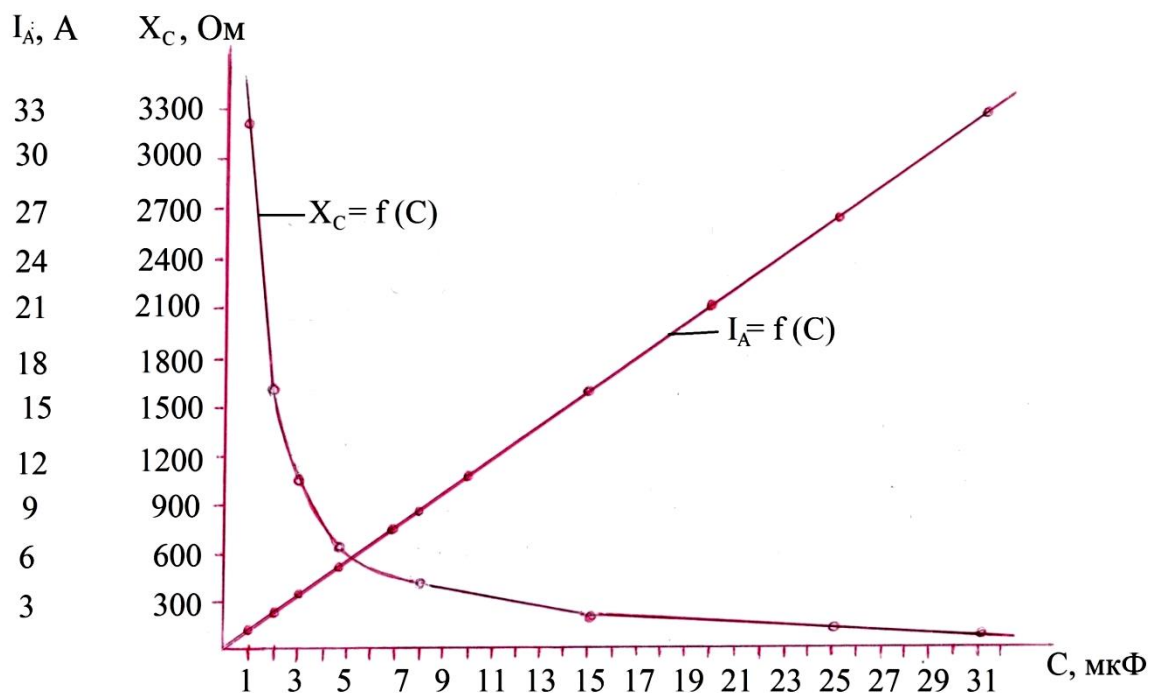


Рис. 3. Зависимости тока утечки ( $I_A$ ) и емкостного сопротивления ( $X_C$ ) от емкости сети ( $C$ )

Емкость, даже в нормальном состоянии сети, представляет опасность с точки зрения электробезопасности и взрывобезопасности. В настоящее время используется только один метод борьбы с емкостью – её компенсация. Компенсация, как известно, заключается в снижении емкостной составляющей полного тока утечки за счет подключения катушки индуктивности к нулевой точке трансформатора, ток которой противоположен по фазе емкостному току утечки. При соблюдении равенства емкостного и индуктивного токов, что соответствует полной компенсации, значение емкостного тока утечки минимально и практически равно активной составляющей тока утечки.

Вместе с тем, применение автоматической компенсации емкости обуславливает протекание индуктивного тока по цепи заземления, который является достаточно большим (до 7 А) ввиду того, что процесс компенсации происходит в режиме резонанса индуктивного и емкостного токов. В результате этого по цепи заземления протекает большой индуктивный ток и в случае повреждения этой цепи возможно открытое электрическое искрение, которое даже при небольшом значении емкости сети представляет опасность взрыва и поражения человека электрическим током. Здесь следует учитывать, что успешная компенсация емкостного тока про-

исходит только при металлическом замыкании фазы на корпус, а при дуговом – достигается трудно.

Следует отметить, что до настоящего времени большое значение придавалось разработке технических мер защиты, направленных на локализацию емкостного тока утечки.

В [1, 2] предложена новая схема ПВС, в которой впервые устранено формирование емкости в распределительной сети, а утечка тока, обусловленная снижением сопротивления изоляции токоведущих частей, поступает не в цепь заземления, как это было раньше, а снова возвращается в силовую цепь. В этой схеме отсутствует жила заземления и общешахтная сеть заземления, поэтому в ней не образуются электрические цепи вне рабочей сети, что исключает условия для прохождения тока через тело человека.

Как известно, замыкание фазы на корпус вызывает необходимость обустройства местного заземления электрооборудования [3].

Рассматривая меру защиты от поражения электрическим током с помощью местного заземления, нужно отметить, что его применение является прямым результатом выполнения оболочек из токопроводящего металла. Замена металла прочными, не проводящими электрический ток пластмассами, устраняет необходимость обустройства местного (защитного) заземления [4].

Широкое применение металлических оболочек при изготовлении рудничного электрооборудования требует использование защитной изоляции и защитного изолирования, при котором замыкание фазы на корпус будет не опасным [2].

Защитная изоляция, наложенная на внутреннюю поверхность оболочки, исключает возникновение короткого замыкания фазы на корпус. Поэтому, по аналогии с нетоковедущими пластмассами, металлическую оболочку можно считать нетоковедущей при наличии защитной изоляции с пробивным напряжением не менее 40 кВ/мм. Выполнение защитного изолирования и надёжного крепления токоведущих частей является дублирующей защитой от однофазного замыкания на корпус.

Применение в конструкции электрооборудования защитной изоляции для исключения контакта его оболочки с землей, позволяет не допустить электропоражение человека [2].

Приведенные технические меры защиты позволяют кардинально повысить безопасные характеристики электрооборудования и обеспечить электробезопасность и взрывобезопасность в шахтах.

## **ВЫВОДЫ**

1. Аналитическими исследованиями показано, что местное заземление, как техническая мера защиты от поражения человека электрическим током при однофазном замыкании на корпус, обеспечивает безопасное напряжение относительно земли на корпусах электрооборудования, если параметры цепи заземления не будут нарушены, а в случае одновременного замыкания на землю в двух фазах – имеется опасность для жизни человека.

2. Устройство общей сети заземления позволяет достичь некоторого снижения напряжения на корпусах электрооборудования относительно земли, однако электробезопасность в полной мере зависит от параметров цепи местного заземления. При двойных замыканиях на землю общая сеть заземления не обеспечивает снижение напряжения на корпусах электрооборудования до значения, безопасного для жизни человека.

3. В электрооборудовании исключены условия для возникновения однофазного замыкания на корпус за счет защитной изоляции внутренних поверхностей оболочек, защитного изолирования токоведущих частей, изолирования корпусов от земли. Это позволяет не обустривать цепь местного заземления и обеспечить полное изолирование трехфазной сети от земли.

4. Предложено построение ПВС без общешахтной сети заземления, позволяющее устранить формирование электрических цепей вне рабочей сети и, тем самым, обеспечить эффективную защиту человека от электропоражения, взрывов и пожаров в шахтах.

## **СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ**

1. Новая стратегия электро- и взрывобезопасности сети высоковольтного электроснабжения / А.М. Брюханов, О.А. Демченко, Л.А. Муфель и [др.] // Способы и средства создания безопасных и здоровых условий труда в угольных шахтах: сб. науч. тр. / МакНИИ. – Макеевка: МакНИИ. – 2014. – № 1 (33). – С. 7-14.

2. Безопасная схема высоковольтного электроснабжения / О.А. Демченко, Л.А. Муфель, А.Ю. Гладков и [др.] // Способы и средства создания безопасных и здоровых условий труда в угольных шахтах: сб. науч. тр. / МакНИИ. – Макеевка: МакНИИ. – 2015. – № 2 (34). – С. 5-13.

3. Гладиллин Л.В. Основы электроснабжения предприятий / Гладиллин Л.В. – М: Недра, 1970. – 256 с.

4. Лейбов Ф.М. Утечки в шахтных электрических сетях / Лейбов Ф.М. – М: Углетехиздат, 1952. – 363 с.

Получено: 19.09.17

## **ASSESSMENT OF ELECTRICAL AND EXPLOSION SAFETY OF AN UNDERGROUND HIGH-VOLTAGE NETWORK**

*On basis of analytical studies the assessment of protection characteristics of local earth circuit and general mine earth network has been carried out. It has been showed that leakage currents resulting from both electrical conductance and capacity susceptance form a dangerous sparking outside the working network circuits in relation to earth which cause electrical injury of workers and dangerous sparking in the earth circuit. The passive measures have been proposed for protection against the phase-to-closure fault by applying insulation with breakdown voltage of minimum 40 kV/mm on the inner surface of electrical equipment closure and simultaneous protection insulation of conducting parts to be the second-line-protection against short circuits. The new structure of an underground high-voltage network has been presented where both the local earth circuits and the general mine earth network are excluded which allows to increase the safety by using of electrical energy in mines cardinally.*

**Keywords: leakage currents, local ground, high voltage network, electrical equipment, electrical injury, explosion safety.**