

УДК 621.315.231:622.33.012

**А.М. БРЮХАНОВ**, докт. техн. наук, директор,  
**О.А. ДЕМЧЕНКО**, канд. техн. наук, зам. директора,  
**Л.А. МУФЕЛЬ**, канд. техн. наук, ст. науч. сотрудник,  
**А.Ю. ГЛАДКОВ**, зав. лаб.,  
**В.Н. СТОЯН**, канд. техн. наук, зав. лаб.; МакНИИ, Макеевка

## НОВАЯ СТРАТЕГИЯ ЭЛЕКТРО- И ВЗРЫВОБЕЗОПАСНОСТИ СЕТИ ВЫСОКОВОЛЬТНОГО ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ

*Впервые предложена и обоснована новая стратегия электро- и взрывобезопасности, реализуемая при построении трехфазной системы электроснабжения высоковольтной сети, когда ток утечки, как опасный источник искрения, протекает в изолированной от цепи заземления системе, образованной силовыми жилами кабеля и экранной жилой, используемой в качестве обратного провода, и изолированной от жилы заземления.*

**Ключевые слова:** электро - и взрывобезопасность, стратегия, токи утечек, заземление, емкость, изоляция, электрооборудование, электроснабжение, уставка, отключение, кабель, экранная жила, изолированная нейтраль, аварийный режим, искра, воспламенение.

В настоящее время для обеспечения электро- и взрывобезопасности в подземной высоковольтной сети напряжением 6000 В предусматривают электрические защиты: от токов короткого замыкания, от опасных токов утечки на землю, от замыканий фазы на землю.

Высоковольтная кабельная сеть проложена от главной поверхностной подстанции до центральной подземной подстанции, от которой получают питание конкретные потребители (передвижные трансформаторные подстанции, высоковольтные электродвигатели водоотливных установок). В структуре данной сети применены комплектные распределительные устройства, которые расположены в центральной подземной подстанции и подземных распределительных пунктах [1].

Шахтная высоковольтная сеть содержит протяженные кабельные линии, которые формируют цепи с распределенными параметрами (емкостным, активным и индуктивным сопротивлениями). Данные сопротивления

определяют активную, индуктивную и емкостную проводимости, которые обуславливают токи утечки из трехфазной сети на землю в случае отклонения параметров сети от нормируемых.

Наиболее существенное влияние оказывают активная и емкостная проводимости. Активное сопротивление срабатывания нормировано и составляет 120 кОм на фазу. При емкости сети более 1 мкФ на фазу негативное действие емкостной проводимости сказывается непрерывно, несмотря на то, что сеть не имеет повреждения и в ней нормированное сопротивление изоляции.

Емкостная проводимость и, следовательно, емкостные токи утечки на землю формируются емкостью, которая образована каждой основной жилой, жилой заземления и изоляцией.

Снижение активного сопротивления изоляции силовых жил и появление тока утечки на землю через активную проводимость происходит в результате ее старения, механических и электрических воздействий, которым подвергаются электрооборудование и кабели со стороны обрушающейся породы, движущихся машин, вагонеток, а также под воздействием пыли, влаги и обводненности выработок.

Здесь уместно показать, что действующая в настоящее время стратегия безопасности основана на контроле устройствами защит параметров электрического взаимодействия силовой цепи и цепи заземления в аварийном режиме и перехода в этом случае тока утечки на землю. Электрическое соединение названных цепей обусловлено структурой трехфазной сети и конструкцией силового кабеля, где каждая фаза (основная жила в кабеле) содержит индивидуально наложенный поверх изоляции токопроводящий экран, контактирующий с неизолированной токопроводящей жилой заземления. Аварийное состояние сети вызывает протекание тока утечки между основной жилой и жилой заземления (корпусом) [2].

Токи утечки, протекая между сетью и землей, по металлическим оболочкам электрооборудования и кабелей, проводникам защитного заземления и другим открытым токопроводящим частям, могут быть причиной появления незащищенного электрического искрения в выработках, что может привести к воспламенению метановоздушной смеси и поражению людей электрическим током.

Зарегистрированы случаи, когда при ремонте защитного заземления электроустановок, находящихся под напряжением, из-за ослабления контактов возникала искра от соприкосновения присоединяемого заземляющего провода с металлической оболочкой. Отмечены также случаи появления искры при ненадежном присоединении заземляющего провода к оболочке электрооборудования или разрыве этого проводника.

Усиление опасности искр вызывает емкостная проводимость вследствие того, что кабельные линии и, в частности – «основная жила – жила заземления», представляют, как показано выше, электрический конденсатор. Емкость такого конденсатора в высоковольтных сетях может составлять до 5 мкФ на фазу и выше. Емкостная составляющая тока утечки и, тем более, однофазный ток металлического замыкания на землю может иметь значения, соизмеримые с активной составляющей и, следовательно, оказывают существенное влияние на искроопасность полного тока утечки.

На искроопасность токов утечки также оказывает влияние переходное сопротивление в цепи утечки, несколько превышающее сопротивление уставки срабатывания устройства защиты, так как в этом случае сеть не будет отключена защитой и опасные токи утечки могут существовать длительное время.

В работе [2] показано, что электропоражение в случае прикосновения человека к одной фазе зависит от емкости сети и ток через него составляет 5,8 А, что значительно выше безопасного тока, равного 25 мА. Для достижения безопасного тока необходимо, чтобы емкость сети не превышала 0,006 мкФ/фазу в сети напряжением 6000 В. Как было показано выше, емкость высоковольтных сетей современных угольных предприятий значительно выше. При этом применение устройств, компенсирующих эту емкость, не снижает опасного тока утечки за время переходного режима [2], что сопряжено с опасностями поражения человека электрическим током и воспламенения метановоздушной смеси.

В работе [3] рассмотрено влияние утечек тока (однофазной, двухфазной и трехфазной сети), возникающих в электрической сети по причине снижения сопротивления изоляции токоведущих частей электрооборудования и кабельных линий.

При однофазном замыкании опасность воспламенения метановоздушной среды снижается вследствие шунтирующего действия заземляющего провода. При этом опасность воспламенения возникает в момент обрыва фазы. Воспламеняющая способность искр, возникающих при разрыве заземляющего провода, характеризуется значением неустановившегося тока и зависит от состояния емкостной и активной проводимостей изоляции, а также от проводимости цепи, образованной местными заземлителями.

Во всех возможных случаях двухфазной утечки наиболее опасные условия возникают в том случае, если одна из утечек возникла в начале кабельной линии, а вторая – в конце ее. При этом ток утечки, протекающий по заземляющему проводу, может достиг значений больших, чем при появлении утечек на близком расстоянии. Здесь опасность воспламенения усиливается при обрыве заземляющего провода.

Трехфазная утечка тока возникает в различных частях кабельной сети, однако опасное ее проявление происходит лишь тогда, когда двухфазная неотключаемая утечка произошла в начале кабельной сети, а утечка в третьей фазе – в конце ее.

Для обеспечения безопасности шахтную кабельную сеть оснащают защитой от утечек, производящей в аварийных ситуациях автоматическое отключение ее от сети. Вместе с тем, условия для воспламенения метановоздушной смеси согласно рассмотренным видам повреждений имеются.

Оценивая изложенные положения, становится очевидным, что по действующей стратегии электро- и взрывобезопасности подземных высоковольтных электрических сетей, ток утечки из силовой цепи поступает в общешахтную систему заземления. Это не отвечает требованиям безопасности, поскольку создается потенциальная опасность поражения людей электрическим током и воспламенения газовой среды искрами, возникающими при токах утечки и замыканиях на землю.

Следует также отметить, что ввиду непрерывности шахтной высоковольтной сети и сети заземления в случае снижения сопротивления изоляции практически невозможно осуществить селективное отключение поврежденного участка. Поэтому для решения такой задачи применяют разделительный трансформатор, что экономически невыгодно.

Чтобы кардинально решить вопросы безопасности при применении электрической энергии в шахтах необходимо отказаться от действующей в отрасли стратегии безопасности и традиционных решений при построении шахтной высоковольтной сети.

Целью статьи является разработка новой стратегии электро- и взрывобезопасности подземной высоковольтной сети, исключающей условия для поражения людей электрическим током и опасных искрений, которые могут вызвать воспламенение метановоздушной смеси.

Авторами предложена новая стратегия безопасности, которая основана на гальваническом разделении трехфазной цепи и сети заземления на таком уровне, когда их взаимное электрическое влияние в процессе нормальной работы и в аварийных режимах полностью устранено (рис. 1).

Для реализации предложенной стратегии шахтную сеть и сеть заземления выполняют так, чтобы возникающие токи утечки из силовой цепи не замыкались с цепью заземления, т.е. не создавали опасностей в отношении взрывов, пожаров и поражения людей электрическим током.

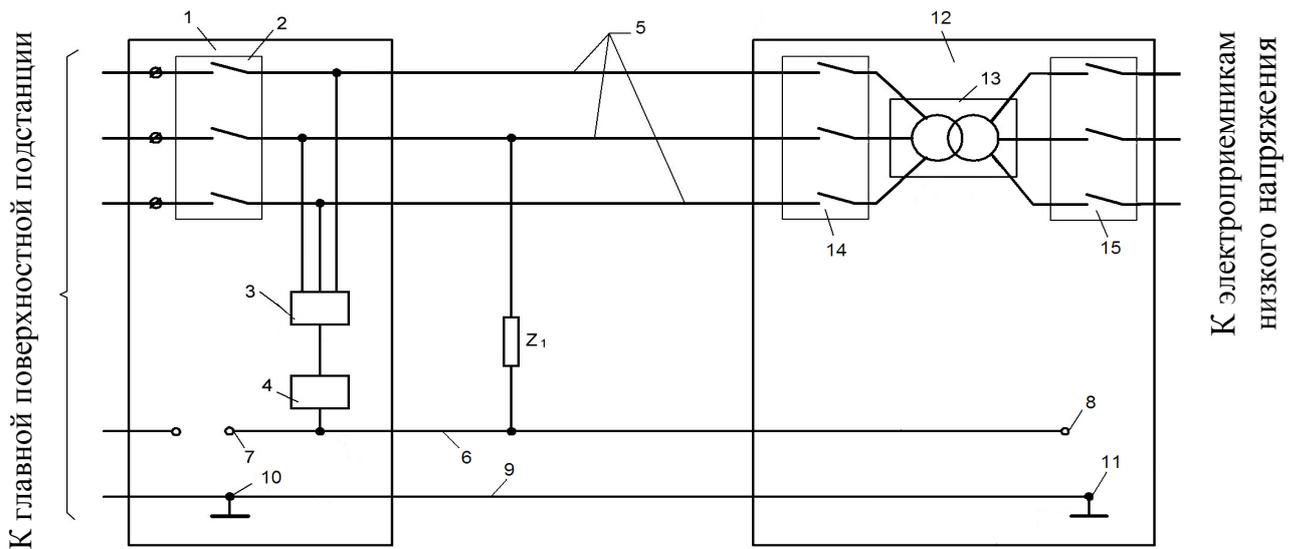


Рис. 1. Система электроснабжения новой стратегии:

1 – комплектное распределительное устройство; 2 – высоковольтный разъединитель; 3 – узел присоединения; 4 – устройство контроля сопротивления изоляции основных жил; 5 – трехфазная сеть; 6 – экранная жила; 7, 8 – изолированные зажимы экранной жилы; 9 – жила заземления; 10, 11 – зажимы подключения заземляющей жилы; 12 – передвижная трансформаторная подстанция; 13 – понижающий трансформатор; 14 – высоковольтный разъединитель; 15 – низковольтный выключатель.

Согласно стратегии в структуре системы электроснабжения применен питающий кабель, имеющий неизолированную экранную жилу 6, которая контактирует с изоляцией основных жил 5 в кабеле и является обратным проводом для токов утечки из силовой цепи. Экранная жила 6 в кабеле электрически не соединена с жилой заземления 9, а при подключении кабеля к электрооборудованию ее зажимы 7 и 8 изолируют от корпуса и жилы заземления 9. Данная стратегия позволяет:

- исключить переход тока утечек на землю и, тем самым, устранить условия для воспламенения метановоздушной смеси искрами от токов утечки и поражения людей электрическим током;

- уменьшить емкость, образованную силовой жилой и жилой заземления, и таким образом снизить емкостной ток на землю до безопасного значения как с точки зрения воспламенения метана, так и поражения человека электрическим током;

- выполнить полностью изолированную шахтную сеть как со стороны питающего трансформатора (сеть с изолированной нейтралью трансформатора согласно требованиям п. 4, главы 1, раздела VIII Правил безо-

пасности (ПБ) [4], так и по цепи трехфазной сети электроснабжения электроприемников вследствие того, что она не создает в нормальном и аварийном режимах цепь для тока утечки в землю;

- разделить шахтную сеть на отдельные электрически обособленные участки, используемые для контроля утечки тока из силовой цепи, вследствие чего можно выполнить селективное отключение поврежденного участка сети без применения силового разделительного трансформатора.

Предложенная стратегия предусматривает новую структуру системы контроля сопротивления изоляции основных жил в шахтной сети (см. рис. 1) путем соединения трехфазной сети с экранной жилой через узел присоединения, устройство контроля сопротивления изоляции и суммарное сопротивление ( $Z_1$ ) утечки, устраняя при этом условия перехода тока утечки в землю.

Естественно, что для такой системы электроснабжения нужно предусматривать силовую кабель новой конструкции (рис. 2).

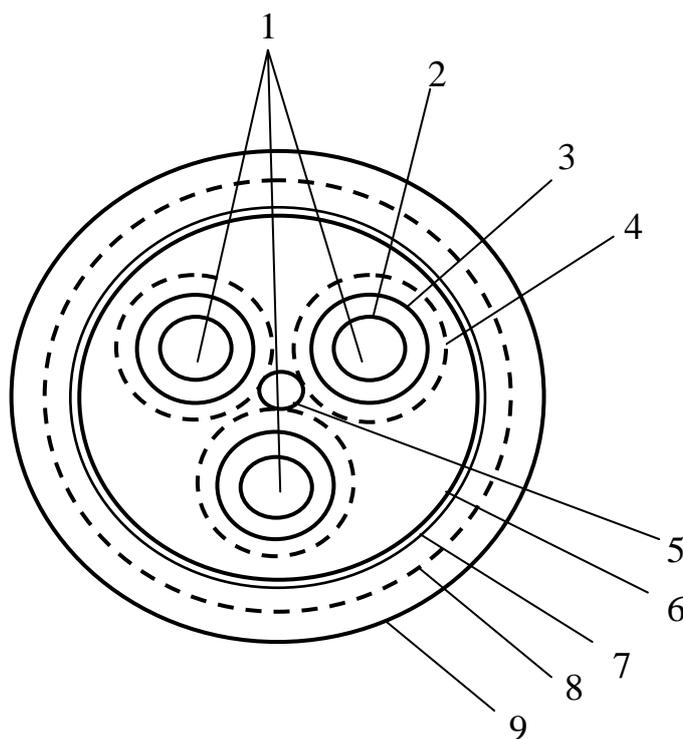


Рис. 2. Кабель силовой экранированный бронированный:

1 – основные (силовые) жилы; 2 – медный провод; 3 – изоляция основных жил; 4 – экранный слой; 5 – экранная жила; 6 – внутренняя оболочка; 7 – общий экран; 8 – бронированная оболочка; 9 – наружная защитная оболочка.

Особенность конструкции такого кабеля состоит в том, что в него введена экранная неизолированная жила 5, которая проложена между основными жилами 1 (аналогично тому, как ранее прокладывалась жила заземления) и контактирует с экранами 4 этих жил, а в качестве жилы заземления используют бронированную оболочку 8 (броню). В такой конструкции кабеля основные жилы 1 и жила заземления 8 удалены друг от друга и гальванически разделены внутренней оболочкой 6, изготовленной из изоляционного материала, и общим экраном 7.

Кабель, как электрическое изделие обладает распределенными параметрами, которые обусловлены материалом изоляции жил, длиной и особенностями конструкции кабеля. На электробезопасность и взрывобезопасность в шахтах негативное влияние оказывает емкость, образованная каждой основной жилой и жилой заземления. Определяют такую емкость жилы по формуле:

$$C = 0,09\varepsilon \frac{S \ell}{d}, \text{ мкФ} . \quad (1)$$

Из формулы (1) следует, что для уменьшения емкости ( $C$ ) следует увеличивать расстояние ( $d$ ) между основной жилой и жилой заземления. Площадь сечения ( $S$ ) жилы определяется токовой нагрузкой системы электроснабжения и эту величину изменять нельзя, равно как и длину ( $\ell$ ) кабеля.

Зная емкость, можно определить емкостное сопротивление из выражения:

$$X_c = \frac{10^6}{2\pi f C} = \frac{3180}{C}, \text{ Ом} . \quad (2)$$

Таким образом, при  $C = 1$  мкФ и частоте сети  $f = 50$  Гц емкостное сопротивление составляет 3180 Ом, а при емкости 3 мкФ – 1060 Ом. Как видно, с увеличением емкости резко снижается емкостное сопротивление и происходит увеличение тока утечки из сети даже при исправном состоянии изоляции. Учитывая, что каждый километр длины кабеля образует в среднем емкость, равную 1 мкФ/фазу, а высоковольтная сеть является протяженной и составляет 3...5 км, поэтому она представляет опасность в части возникновения взрывов, пожаров и поражений электрическим током.

В некоторых случаях, ввиду протяженной кабельной линии, сопротивление утечки, обусловленное емкостью сети, соизмеримо и даже меньше нормируемого значения, что не позволяет такую сеть включить в работу.

Если в существующей структуре электроснабжения требование об ограничении емкости сети относительно жилы заземления было практически невыполнимо, то в предложенной стратегии уменьшение такой емкости достигается за счет того, что жила заземления в конструкции кабеля значительно удалена от основных жил и поэтому ее значение согласно формуле (1) снижается.

Емкость, образованная между основными жилами и экранной жилой, которая расположена в общей скрутке с основными жилами, уменьшена ввиду того, что длина экранной жилы сокращена путем разделения сети на отдельные обособленные участки.

Определенного снижения емкости сети можно также добиться, если в конструкции бронированного кабеля вместо металлического экрана на силовых жилах применить полупроводящие экраны на пластмассовой основе с сопротивлением между экранной жилой и любой точкой на экране основных жил не более 500 Ом. Вызвано это тем, что металлический экран увеличивает емкость между основными жилами и каждой такой жилой относительно корпуса и экранной жилы.

Применение полупроводникового экрана, кроме того, улучшает прочность и надежность изоляции, защищая ее от негативных воздействий внешней среды, а также минимизирует вероятность образования электрических разрядов на изоляции жил в сравнении с металлическим экраном.

Из анализа изложенных положений следует, что основные жилы и жила заземления в кабеле, а также система общешахтной сети заземления формируют условия для поражения людей электрическим током и воспламенения метановоздушной смеси в результате действия емкостной проводимости.

Исходя из новой стратегии электро- и взрывобезопасности сети подземного высоковольтного электроснабжения следует в дальнейшем рассмотреть вопрос о нецелесообразности применения жилы заземления в структуре кабеля и обустройства общешахтной сети заземления. С точки зрения безопасности такой подход является оправданным, поскольку в аварийном режиме будет устранено опасное действие токов утечки на землю, обусловленных как активной, так и емкостной проводимостями, что кардинально повышает безопасные свойства системы высоковольтного электроснабжения.

## ВЫВОДЫ

Впервые разработана и обоснована новая стратегия построения системы подземной высоковольтной сети, согласно которой ток утечки, как опасный источник искрения, протекает в изолированной от цепи заземления сис-

теме. Она состоит из трехфазной сети с питающим кабелем, имеющим неизолированную экранную жилу, которая контактирует с изоляцией основных жил в кабеле и является обратным проводом для токов утечки из силовой цепи. Экранная жила в кабеле электрически не соединена с жилой заземления, а при подключении кабеля к электрооборудованию ее изолируют от корпуса и жилы заземления. При этом емкостные токи утечки «силовая жила – жила заземления» снижены в несколько раз за счет уменьшения емкости «конденсатора», образованного на основе названных жил, в результате увеличения расстояния между ними и выполнения индивидуального экрана основных жил, изготовленного из полупроводящих пластмасс вместо металла.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Светличный П. Л. Электропривод и электроснабжение горных машин / П. Л. Светличный. – М: Недра, 1968. – 316 с.
2. Гринь К. А. Средства защиты от поражения электротоком в сетях высокого напряжения / К. А. Гринь // Техника безопасности в угольной промышленности. – М.: Гос. науч.- техн. изд-во лит. по горн. делу, 1959. – С.138-147.
3. Антонов Ю. П. Анализ условий обеспечения максимальной безопасности при наличии утечек в шахтных кабельных сетях / Ю. П. Антонов // Вопросы горной электромеханики – Т. 11. – Вып. 3. – М.: Гос. науч.- техн. изд-во лит. по горн. делу, 1990. – С. 22-39.
4. Правила безопасности в угольных шахтах: НПАОП 10.0-1.01-10.– Офиц. изд-во – К.: Редакция журнала «Охрана труда», 2010. – 431 с. – (Нормативно-правовой документ Госгортехнадзора Украины).

Получено: 03.02.14

*Вперше запропоновано та обґрунтовано нову стратегію електро- та вибухобезпеки, що її реалізують під час побудування трифазної системи електропостачання високовольтної мережі, коли струм витоку, як небезпечне джерело іскріння, протікає в ізолюванні від кола заземлення системів що її створено силовими жилами кабелю та екранною жилою, яку використовують у якості зворотного дроту, та ізолюванні від жили заземлення.*

**Ключові слова:** електро- та вибухобезпека, стратегія, струми витоку, заземлення, ємність, ізоляція, електроустаткування, електропостачання, уставка, відключення, кабель, екранна жила, ізольована нейтраль, аварійний режим, іскра, займання.

*The new strategy of electrical and explosion safety has been suggested and validated for the first time, which is realized by construction of three-phase power supply system of a high-voltage power network when the leakage current as a hazardous sparking source flows in a system isolated from earthed circuit which is formed by cable power conductors and screen conductor which is used as return conductor and isolated from earth conductor.*

**Keywords:** electrical and explosion safety, strategy, leakage current, earthing, capacity, insulation, electrical equipment, power supply, setting, shutdown, cable, screen conductor, insulated neutral, emergency mode, spark, ignition.