

## I. АКТУАЛЬНЫЕ ПРОБЛЕМЫ БЕЗОПАСНОСТИ

УДК 621.315.231:622.33.012

**О.А. ДЕМЧЕНКО**, канд. техн. наук, и. о. директора, МакНИИ, г. Макеевка;  
**А.П. КОВАЛЕВ**, д-р техн. наук, проф., ДонНТУ, г. Донецк,  
**Л.А. МУФЕЛЬ**, канд. техн. наук, ст. науч. сотрудник, МакНИИ, г. Макеевка

### СПОСОБЫ ЛОКАЛИЗАЦИИ ТОКОВ УТЕЧКИ В ПОДЗЕМНОЙ ВЫСОКОВОЛЬТНОЙ КАБЕЛЬНОЙ СЕТИ

*Приведены способы локализации утечек на землю в подземной высоковольтной кабельной сети, которые охватывают все возможные решения по устранению их негативного действия. Локализация активной составляющей тока утечки основана на образовании новой электрической цепи “основные жилы – жила экранирующая”, с помощью которой утечка вновь возвращается в трехфазную сеть, а не в общешахтную сеть заземления, как это было ранее. Достаточное снижение емкостной составляющей тока утечки достигается с помощью технических мер, устраняющих условия для формирования емкости в кабеле и, следовательно, в распределительной сети.*

**Ключевые слова:** высоковольтная сеть, активная и емкостная составляющие тока утечки, сопротивление изоляции, жила заземления, трёхфазная сеть, экранирующая жила

Согласно требованию п. 8.1.4 Правил безопасности [1] подземные высоковольтные и низковольтные сети построены с изолированной нейтралью, что является одной из мер обеспечения электробезопасности и взрывобезопасности в шахтах. В структуре названных схем также предусмотрена жила заземления, проложенная в кабельных проводках и соединенная с корпусами электрооборудования, что позволяет образовать общешахтную сеть заземления с присоединением ее к главным и местным заземлителям. Эта жила плотно соприкасается с основными жилами в кабелях и, тем самым, формирует в аварийных режимах электрические связи с фазами сети посредством активной и емкостной проводимостей (рис.1). Из приведенного рисунка следует, что образованные вне рабочей сети электрические цепи на основе названных проводимостей и жилы заземления способствуют переходу тока утечки из силовой цепи в общешахтную сеть заземления, создавая условия для нарушения взрывозащищенности выработок и электропоражения людей в шахтах. Особенно это проявляется при однофазном замыкании на корпус и в случае прикосновения человека к

одной из фаз. Поэтому переход токов утечки в землю является основным недостатком применяемых схем электроснабжения.

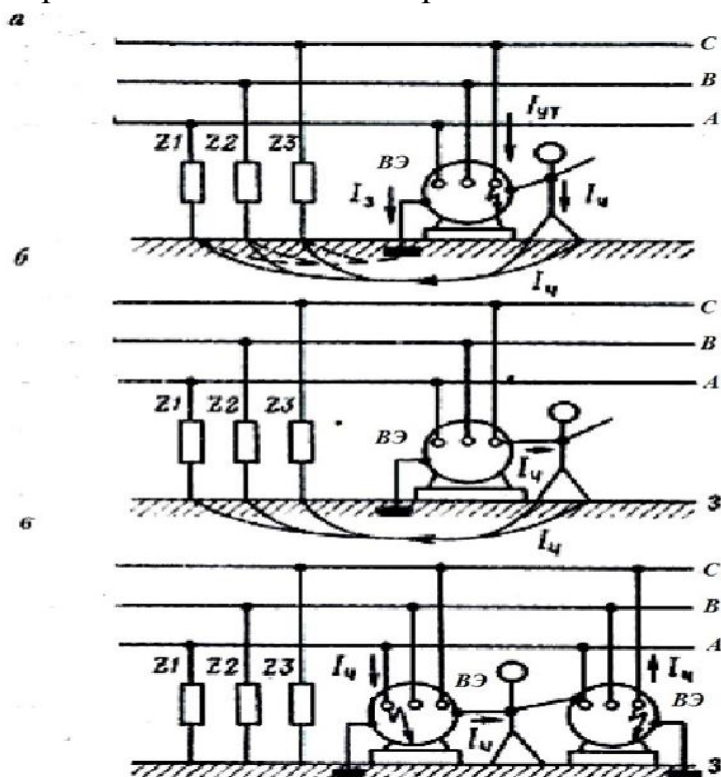


Рис. 1. Условия поражения человека электрическим током в высоковольтной сети переменного тока:

*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.

*ВЭ* – высоковольтный электродвигатель; *ЦПП* – центральная подземная подстанция;  $Z_1, Z_2, Z_3$  – суммарное (активное и емкостное) сопротивление фаз;  $I_{ут}, I_з, I_ч$  – токи утечки, протекающие через заземление и тело человека.

В настоящее время борьба с токами утечки осуществляется с помощью защитного отключения сети при снижении сопротивления изоляции фаз ниже нормируемого значения и компенсации емкостной составляющей тока утечки. Другие способы локализации утечек в схемах электроснабжения для устранения их влияния, кроме упомянутых, не изучались.

Таким образом, разработка принципиально новых способов локализации утечек, которые не соответствуют сложившимся традициям и представлениям, весьма актуальна для повышения безопасности применения электрической энергии в шахтах.

Целью статьи является разработка способов локализации утечек из высоковольтной кабельной сети, предотвращающих взрывы, пожары и электропоражения в шахтах.

В [2] показано, что борьба с утечками является важной мерой обеспечения безопасности схем электроснабжения. На рис. 2 приведены способы локализации утечек, вызванных активной и емкостной проводимостями в распределительной сети, выполненной на основе кабельной сети.

Способ локализации активной составляющей утечки тока (рис.2) основан на гальваническом разделении трехфазной сети электроснабжения и общешахтной сети заземления, т. е., полностью устраняется их взаимное электрическое влияние в процессе нормальной работы и в аварийных режимах. В данном случае жила заземления впервые выполнена в изоляции, изолирована от фаз сети, удалена от них и расположена в месте прокладки бронированной оболочки.

Впервые по оси скрутки основных жил проложена неизолированная экранная жила, которая при монтаже кабеля не соединена с корпусами электрооборудования и жилой заземления. При подключении устройства защиты между фазами сети и экранной жилой для тока утечки образуется электрическая цепь “основные жилы – жила экранная”. В такой цепи ток утечки вновь возвращается в поврежденную силовую цепь, а не в цепь заземления, как это было ранее [3], что исключает его переход в землю.

Рассмотренная схема локализации активной составляющей тока утечки не имеет аналогов в странах СНГ и других ведущих странах [4].

Поддержание заданного уровня изоляции кабелей связано с оптимальными решениями при их проектировании и выполнением определенных мер безопасности в процессе эксплуатации.

При проектировании силовых кабелей необходимо разрабатывать технические решения для обеспечения их механической защиты от внешнего воздействия.

Некоторые решения, например, применяемая в настоящее время в высоковольтных кабелях бронированная оболочка из двух стальных лент, как показывает опыт эксплуатации, приводит к повреждению основных жил. Для стабильной работы кабеля существенно, чтобы все элементы кабеля (бронированная оболочка, основные жилы) были выполнены с повышенной механической и электрической прочностью (рис. 2). Они должны быть устойчивы к ударным нагрузкам и знакопеременному изгибу. Оболочка кабеля также должна обеспечивать влагозащищенность, а изоляция жил выдерживать тепловые нагрузки при кратковременном действии тока до 2500 А. Конструкция основных жил в высоковольтных кабелях не должна допускать электрические разряды на поверхности изоляции для недопущения ее повреждения.

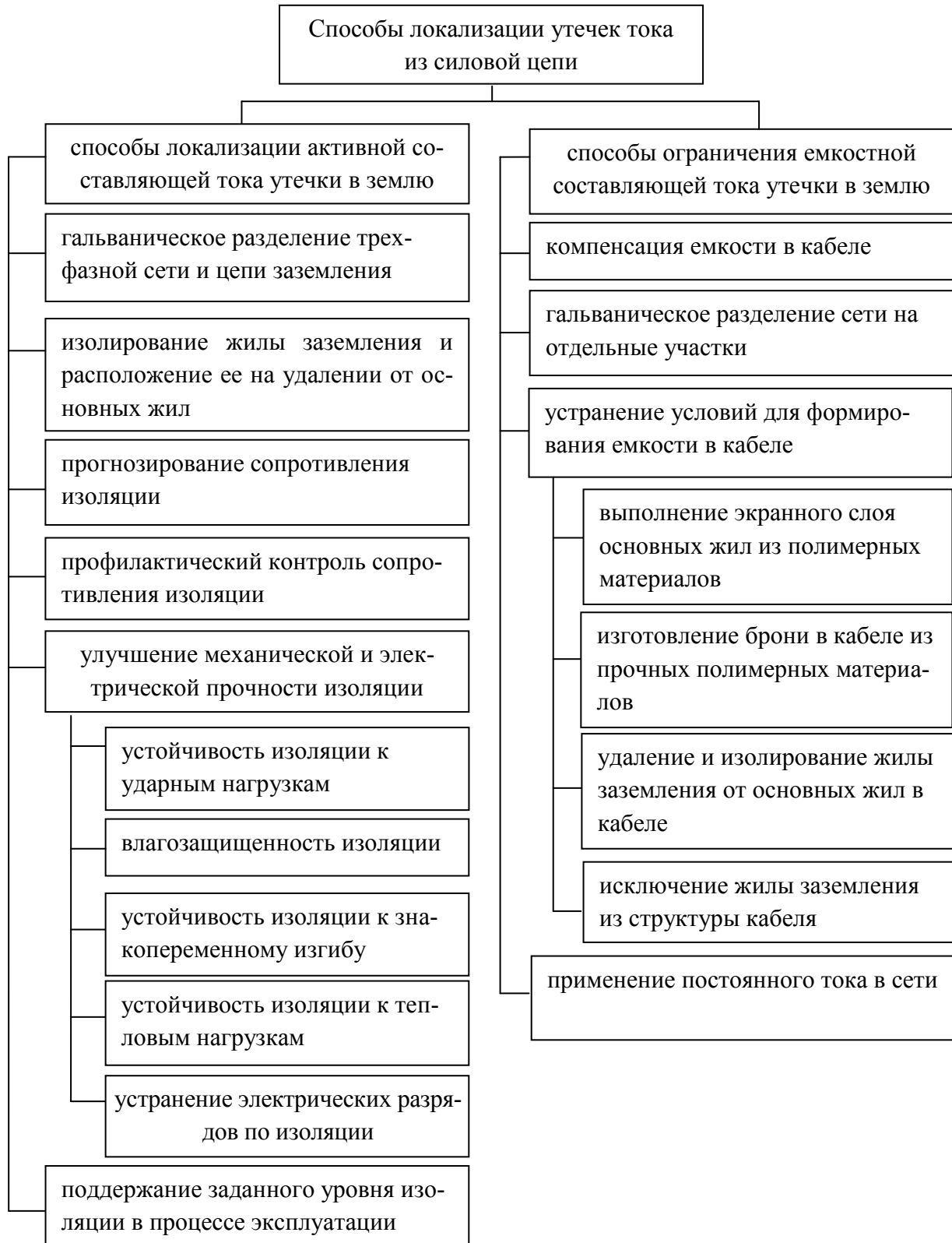


Рис. 2 . Способы локализации утечек тока из силовой цепи

Для поддержания заданного уровня изоляции фаз сети в процессе эксплуатации необходимо периодически осуществлять профилактический контроль сопротивления изоляции и прогнозирование технического состояния изоляции. Это новые меры контроля и оценки уровня изоляции, направленные на недопущение снижения сопротивления изоляции основных жил в кабеле.

Способы снижения емкостной составляющей тока утечки основаны на разработке технических мер для недопущения формирования емкости в кабеле.

Традиционно сложилось представление, что в сетях переменного тока емкость сети невозможно ограничить, а ее действие можно только компенсировать. Такой подход определил направление по разработке способа локализации емкостной составляющей тока утечки ее компенсацией, который используется в настоящее время. Другие решения для предотвращения негативного действия емкости сети не разрабатывались. Нами впервые предложены технические решения по ограничению емкости, которые приведены на рис. 2

Негативное действие емкости происходит в результате создания цепи для емкостного тока утечки из трехфазной распределительной сети посредством жилы заземления и емкостной проводимости (см. рис.1). Названные цепи являются опасными как с точки зрения воспламенения метановоздушной смеси, так и поражения людей электрическим током.

Снизить токи утечки в протяженных сетях, обладающих большой емкостью, можно, как показано, путем компенсации емкостной составляющей тока утечки, осуществляемой индуктивностью компенсатора, включенного между нейтралью сети и землей. Согласно законам электротехники, способ компенсации вполне эффективен, однако с точки зрения безопасности в шахтах – его применение нецелесообразно вследствие протекания большого индуктивного тока по незащищенной цепи заземления.

В распределительных сетях напряжением 6, 10 кВ преобладающим видом повреждений являются однофазные замыкания на землю, которые в сетях с изолированной нейтралью могут быть причиной более сложных и тяжелых аварий систем электроснабжения (например, двойные замыкания на землю, междуфазные к. з. и т.п.) Поэтому для повышения уровня электробезопасности распределительных кабельных сетей необходимо стремиться к поддержанию предельно допустимых уровней емкости, а также к предотвращению аварийных последствий при замыканиях фазы на землю.

В этом отношении компенсированные сети обладают следующими преимуществами перед сетями с изолированной нейтралью:

– улучшение условий электробезопасности вследствие уменьшения

напряжения прикосновения и шагового напряжения;

– уменьшение термического воздействия и развития однофазных замыканий в многофазные, вследствие резкого снижения токов, протекающих в месте к. з.;

– снижение значения и время действия перенапряжений в неповрежденных фазах значительно уменьшает вероятность перехода повреждения в двойные и междуфазные замыкания, а также создаются благоприятные условия для гашения дуги.

Необходимо отметить, что указанные преимущества компенсированных сетей практически сводятся к нулю при разбалансировке более чем на 20% индуктивного компенсирующего устройства и емкостного сопротивления сети. Поэтому, учитывая динамику шахтных распределительных сетей, компенсирующие устройства следует применять совместно с автоматическими регуляторами настройки индуктивности.

Согласно ПУЭ компенсация емкостных токов замыкания на землю в сетях напряжением 6, 10 и 35 кВ должна применяться при емкостных токах замыкания, превышающих соответственно 30, 20 и 10А. Многие исследователи считают целесообразным применять компенсационный режим нейтрали в сетях напряжением 6 кВ при токах замыканий на землю свыше 5-10А.

Особо следует отметить, что поддержание заданной индуктивности, соответствующей емкости сети даже при наличии автоматических регуляторов задача довольно сложная и вряд ли достижимая. Кроме того, при резонансе токов, по цепи заземления, как уже отмечалось, протекает достаточно большой индуктивный ток, который является искроопасным, что противоречит требованиям п. 8.8.10 Правил безопасности [1], а также опасным с точки зрения поражения людей электрическим током. При этом устройство компенсации имеет большие габариты и высокую стоимость.

Наиболее эффективным способом ограничения емкости сети является устранение емкостной проводимости на землю путем исключения жилы заземления в кабелях [5]. Емкость системы “кабель-земля” незначительна и не превышает 80 пФ на 1 км кабеля. Применение этого способа возможно по мере изменения требований действующих нормативных документов и, прежде всего, Правил безопасности.

Частным решением названного способа является размещение жилы заземления на удалении от основных жил и их гальваническое разделение. Такое решение снижает емкость “основная жила – жила заземления”, при этом она не является коллектором для токов утечки из трехфазной сети и ограничивает условия для перехода их на землю (корпус).

Предлагаемый авторами способ уменьшения емкости в кабеле, осно-

ван на устранении отдельных металлических элементов в его конструкции, позволяющий снизить суммарную формируемую емкость в кабеле. До настоящего времени такой способ не изучался и не рассматривался. Практическая реализация этого способа возможна, если в качестве индивидуальных экранов основных жил и бронированной оболочки в конструкции кабеля предусматривать их изготовление из высокопрочных полимерных материалов вместо соответственно меди и стальных лент.

Кардинальное решение по устранению емкости в кабеле основано на изменении рода тока в сети высоковольтного электроснабжения, т.е. замены переменного тока на постоянный. Как известно, постоянному току не свойственно формирование емкости и индуктивности в распределительной сети, что позволяет полностью исключить емкость сети и устранить при этом индуктивно-емкостные потери энергии.

Так как в настоящее время создана мощная выпрямительная и преобразовательная техника и имеется опыт её эксплуатации, такой способ локализации емкости может быть применен.

Считаем, что способ применения постоянного тока является наиболее перспективным и реальным, поскольку наряду с отмеченными достоинствами одновременно решаются вопросы регулирования электропривода и оптимизации отдельных электрических параметров, направленных на снижение пусковых токов, уменьшение механических, вибрационных и тепловых нагрузок на оборудование и электродвигатели.

Ограничение емкости в кабельной сети переменного тока можно достичь, если данную сеть гальванически разделить на отдельные участки, как это выполнено в новой схеме высоковольтного электроснабжения с помощью экранной жилы, изолированной от жилы заземления и корпусов электрооборудования [3, 5]. Этот способ ограничения емкости можно реализовать путем применения высоковольтных разделительных трансформаторов, что адекватно уменьшению длины кабеля. Данный способ ограничения емкости основан на использовании прямой пропорциональной зависимости емкости от длины и сечения жил кабеля. Несмотря на то, что реализация способа связана с определенными затратами, его применение в шахтах с протяженной кабельной линией может быть оправданным. Особенно это очевидно при сравнении со способом компенсации, который требует значительных затрат для его реализации и, кроме того, создаёт опасности, возникающие в процессе его эксплуатации.

Изложенные технические меры ограничения токов утечки на землю в высоковольтных кабельных сетях позволяют существенно повысить их безопасные характеристики.

## **ВЫВОДЫ**

1. Впервые обоснованы технические решения, направленные на ограничение емкостной составляющей тока утечки в распределительной сети переменного тока. Они требуют изменения конструкции высоковольтного кабеля, в котором индивидуальные экраны и бронированная оболочка выполняются из высокопрочных полимерных материалов вместо соответственно меди и стальных лент. Такие решения устраняют формирование емкости в кабеле.

2. Локализация активной составляющей тока утечки основана на гальваническом разделении трехфазной сети и общешахтной сети заземления, при котором их взаимное электрическое влияние в процессе нормальной работы и в аварийных режимах полностью устранено. Такое построение высоковольтной сети позволяет активной составляющей тока утечки вновь возвращаться в трехфазную сеть, а не в общешахтную сеть заземления, как это было раньше.

## **СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ**

1. Правила безопасности в угольных шахтах: НПАОП 10.0-1.01-16. – Донецк: Полипресс, 2016. – 218 с. – (Нормативный правовой документ Гортехнадзора ДНР).

2. Лейбов Р.М. Утечки в шахтных электрических сетях / Лейбов Р.М. – М.: Углетехиздат, 1952. – 362 с.

3. 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. 5-13.

4. Пат. № 168089 Российская Федерация, МПК H02J 3/00. Система подземного высоковольтного электроснабжения с изолированной нейтралью / Демченко О.А., Муфель Л.А., Гладков А.Ю., Стоян В.Н., Огийчук Ю.И.; заявитель и патентообладатель Муфель Л.А. – № 2016100453; заявл. 11.01.16; опубл. 18.01.17, Бюл. № 2.

5. Безопасная схема высоковольтного электроснабжения / О.А. Демченко, Л.А. Муфель, В.Н. Стоян [и др.] // Способы и средства создания безопасных и здоровых условий труда в угольных шахтах: сб. науч. тр. / МакНИИ. – Макеевка: МакНИИ. – 2015. – № 1(35). – С.5-13.



Получено: 20.10.17

## **WAYS FOR LEAKAGE CURRENT LOCALIZATION IN AN UNDERGROUND HIGH-VOLTAGE CABLE-BASED NETWORK**

*The classification of ways for leakage current localization in an underground high-voltage network which include all possible solutions for their negative impact elimination has been set out. The localization of the active component of leakage current is based on forming of a new circuit “main conductor – screen conductor”, which helps to return the leakage current into the three-phase network and not into the common mine network as before. The sufficient reduction of capacitive component of leakage current is achieved by engineering controls which ensure the elimination of conditions for forming of capacity in the cable and thus in distribution circuit.*

**Keywords: high-voltage network, active and capacitive component of leakage current, insulating resistance, earth connection, three-phase network, screen conductor.**