

И.Б. Гуляева /к.т.н./, Е.С. Дубинка /к.т.н./, М.К. Маренич
 ГОУ ВПО «Донецкий национальный технический университет» (Донецк)
Л.А. Муфель /к.т.н./, О.А. Демченко /к.т.н./
 ГУ «Макеевский государственный научно-исследовательский институт
 по безопасности работ в горной промышленности» (Макеевка)

ПРОВОДИМОСТЬ ИЗОЛЯЦИИ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ СЕТИ УЧАСТКА ШАХТЫ КАК ФАКТОР РИСКА ЭЛЕКТРОТРАВМАТИЗМА. ПРОБЛЕМНЫЕ ВОПРОСЫ И ПУТИ ИХ РЕШЕНИЯ

Приведены аргументированные доказательства формирования электропоражающего фактора при эксплуатации шахтной участковой электрической сети вследствие заземления нестационарного электрооборудования через центральные провода (заземляющие жилы) гибких кабелей. 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.

Постановка проблемы

Необходимость заземления металлических оболочек (корпусов) силового электрического и электромеханического оборудования участка шахты предопределила общую концепцию компоновки системы его электроснабжения. Согласно ей и учитывая нестационарность перемещаемых, переносных электромеханических объектов (комбайны, скребковые конвейеры, ручные электросвёрла и т.п.), заземление их электродвигателей осуществляется присоединением центрального провода кабеля электропитания к корпусу двигателя и заземлённому корпусу пускавателя. При этом центральный провод кабеля выполняет функцию заземляющего проводника и, в соответствии с конструкцией кабеля (ГРШЭ; КГЭШ и т.п.) охватывается по всей своей длине экранами (из полупроводящей резины) силовых фазных проводов. Помимо реализации заземляющей функции, такая компоновка позволяет осуществить выявление повреждения изоляции кабеля как возникновение повышенной проводимости в цепи оперативного тока аппарата защитного отключения шахтной участковой трансформаторной подстанции по цепи: «фазный провод кабеля – полупроводящий экран – центральный (неизолированный) провод кабеля – земля». Однако, непосредственный контакт центрального провода кабеля с экранами изоляции фазных проводов по всей длине кабеля приводит к возникновению активных и ёмкостных

проводимостей изоляции между фазами и землёй. И если активное сопротивление изоляции кабеля определяется её техническим состоянием, то ёмкость изоляции относится уже к паспортным характеристикам кабеля и определяется его сечением и длиной [1]. Применение на участке шахты совокупности гибких кабелей электропотребителей означает параллельное подключение (между собой) их активных сопротивлений и ёмкостей, т.е., существенное увеличение как активной, так и ёмкостной проводимости фаз на землю. Тенденция к применению кабелей большой протяжённости и сечения предопределяет ещё большее увеличение этих проводимостей. Таким образом, именно изоляция кабельной сети участка шахты вследствие специфики размещения и применения центральных проводов гибких кабелей является фактором риска электропоражения человека (при касании к фазе сети, находящейся под напряжением).

Режим изолированной нейтрали трансформатора обеспечивает возможность применения в участковой электрической сети аппарата защиты от утечек тока на землю. Однако сама структура электрической сети предопределяет функционирование такого аппарата в условиях наличия факторов электропоражения и назначение функциональных узлов этого аппарата на «купирование» в той или иной степени факторов электропоражения, создаваемых и действующих в шахтной участковой электрической сети.

Анализ последних исследований и публикаций

Анализ состояния вопроса, выполненный в исследовании [2], позволяет сделать вывод, что многолетний опыт разработки, эксплуатации и совершенствования аппаратов защиты от утечек тока на землю свидетельствует о неизменности практики реализации одних и тех же функций [3,4,5,6]:

- сравнение постоянного оперативного тока, подаваемого в контур «аппарат защиты - сеть - цепь утечки тока - земля - аппарат защиты» с т.н. «эталонным» током аппарата защиты и формирование команды на отключение автоматического выключателя трансформаторной подстанции участка при превышении оперативным током «эталонного»;

- статическая, либо автоматическая компенсация ёмкостного тока утечки с фазы сети на землю (применяется не во всех типах аппаратов защиты);

- выявление (в аппаратах защиты, предназначенных для работы в сетях линейного напряжения 1140 В) повреждённой фазы и её шунтирование через малое активное сопротивление на землю с одновременным блокированием такого шунтирования других фаз.

Эти функции реализовывались вне зависимости от схемных решений аппаратов защиты:

- схемы на дискретных электрических и электронных компонентах (АЗПБ; АЗУР-1; РУ-1140) [6];

- схемы на основе применения интегральных микросхем, аналоговой схемотехники (АЗУР-4) [7];

- схемы на основе применения микроконтроллеров (АЗУР-1М; АЗУР-4МК) [8].

Однако все технические решения, реализуемые в данных аппаратах защиты, строились и строятся применительно к общей концепции обустройства системы электроснабжения технологического участка шахты, где обязательным является заземление центральных проводов гибких экранированных кабелей, т.е., априори создаются проводимости между фазами сети и землёй, что представляет потенциальную угрозу электропоражения человека. В указанных аппаратах защиты их функции сводятся к воздействию (в сторону снижения) на эти проводимости, а также на ускорение «отделения» человека от воздействия электрического тока, проходящего по контуру: «трансформатор подстанции – человек – земля – проводимости изоляции – трансформатор подстанции».

Немаловажно, что вне зависимости от типов электрических и электронных устройств (эле-

ментов) в схемах аппаратов защиты их параметры быстродействия остаются на одном уровне. Так, собственное время срабатывания аппарата защиты любого из вышеперечисленных типов в сети линейного напряжения 660 В при сопротивлении утечки на землю 1 кОм и ёмкости изоляции в диапазоне 0÷1,0 мкФ/фазу составляет порядка 0,1 с (т.е. применение микропроцессора в схеме аппарата не приводит к повышению быстродействия формирования команды на защитное отключение). В сети линейного напряжения 1140 В это время составляет 0,07 с, а время шунтирования повреждённой фазы достигает 0,17 с. [8]. Кроме этого, выполнение защитной функции будет идти с дополнительной задержкой минимум 0,08 с, обусловленной временем собственного срабатывания автоматического выключателя АЗ7ХХ трансформаторной подстанции. В течение этих интервалов времени аппарат защиты совместно с исполнительным силовым коммутационным устройством (автоматическим выключателем трансформаторной подстанции) не будут препятствовать действию электропоражающих факторов в участковой электрической сети.

С повышением мощностных показателей применяемого на участке шахты технологического оборудования увеличиваются электропоражающие параметры участковой электросети. Это, в свою очередь, предопределяет усложнение аппаратной части защиты от утечек тока на землю. Фактором, снижающим эффективность эксплуатации технологического оборудования участка шахты, следует также считать воздействие (защитное отключение) защиты от утечек тока на землю на всю электрическую сеть участка вне зависимости от конкретного силового присоединения, где возникла утечка тока на землю. Принципиальным положением здесь является то, что защита от утечек тока на землю не устраняет причину формирования электропоражающего фактора, а функционирует в условиях воздействия тока на человека, т.е. в условиях изначального существования и действия электропоражающего фактора, обусловленного компоновочными и техническими решениями, принятыми при формировании типовой структуры системы электроснабжения технологического участка шахты.

В то же время, исследования [9,10] дают основания полагать о возможности существенного ограничения электропоражающего фактора в шахтной участковой электрической сети в случае реализации альтернативных подходов к её компоновке, структуре применяемых кабелей и функциям их компонентов, что позволит суще-

ственно изменить и упростить аппаратную часть защиты от утечек тока на землю, создать условия селективного действия такой защиты на участке шахты и этим, помимо улучшения условий эксплуатации по фактору электробезопасности, повысить эффективность эксплуатации самого технологического оборудования участка.

Цель (задачи) исследования

Целью исследования является обоснование структуры системы электроснабжения участка шахты и её функциональных компонентов в контексте снижения параметров электропоражающего фактора и достижения избирательности действия защиты от утечек тока через проводимости изоляции фаз.

Основной материал исследования

Одними из основных компонентов системы электроснабжения технологического участка шахты является разветвлённая, радиальная сеть шахтных гибких экранированных кабелей (ГК1 – ГКn), осуществляющих передачу электрической энергии напряжения 660 В или 1140 В от трансформатора ТВ комплектной подстанции (КТП) участка через групповой автоматический выключатель (АВ2) и магнитные пускатели (МП1 – МПn) – на асинхронные двигатели (М1 – Mn) потребителей (рис. 1). Централизованную функцию контроля величины сопротивления изоляции электрической сети участка шахты и её защитного отключения выполняет аппарат за-

щиты (АЗ) от утечек тока на землю, воздействующий на автоматический выключатель (АВ1) КТП. При этом, в соответствии со схемой, сопротивления изоляции фаз (относительно земли) каждого присоединения подключаются параллельно друг другу включением соответствующих магнитных пускателей, что предопределяет снижение общего сопротивления изоляции по мере включения в работу всё большего числа силовых присоединений (электропотребителей). В свою очередь, это предопределяет увеличение параметров электропоражающего фактора – тока через тело человека ($R_{чел}=R_{YT}=1$ кОм) при касании последним фазы сети.

Следует отметить, что сопротивления изоляции шахтных кабелей определяются особенностями взаимного расположения их силовых жил и центрального (заземляющего) провода (рис. 2), в результате чего создаются активные и ёмкостные проводимости изоляции как между фазными и центральным проводами, так и между смежными фазными проводами. При заземлении центральных проводов n кабелей электросети участка шахты фактор электропоражения человека (с сопротивлением тела $R_{YT}=1$ кОм) при его касании к фазе сети будет формироваться в соответствии со схемой (рис. 3), где $R_{\phi-\phi}$; $X_{\phi-\phi}$ – соответственно, активные и ёмкостные сопротивления изоляции между фазами кабелей; $R_{\phi-3}$; $X_{\phi-3}$ – соответственно, активные и ёмкостные сопротивления изоляции между фазами и землёй при заземлении центральных проводов кабелей.

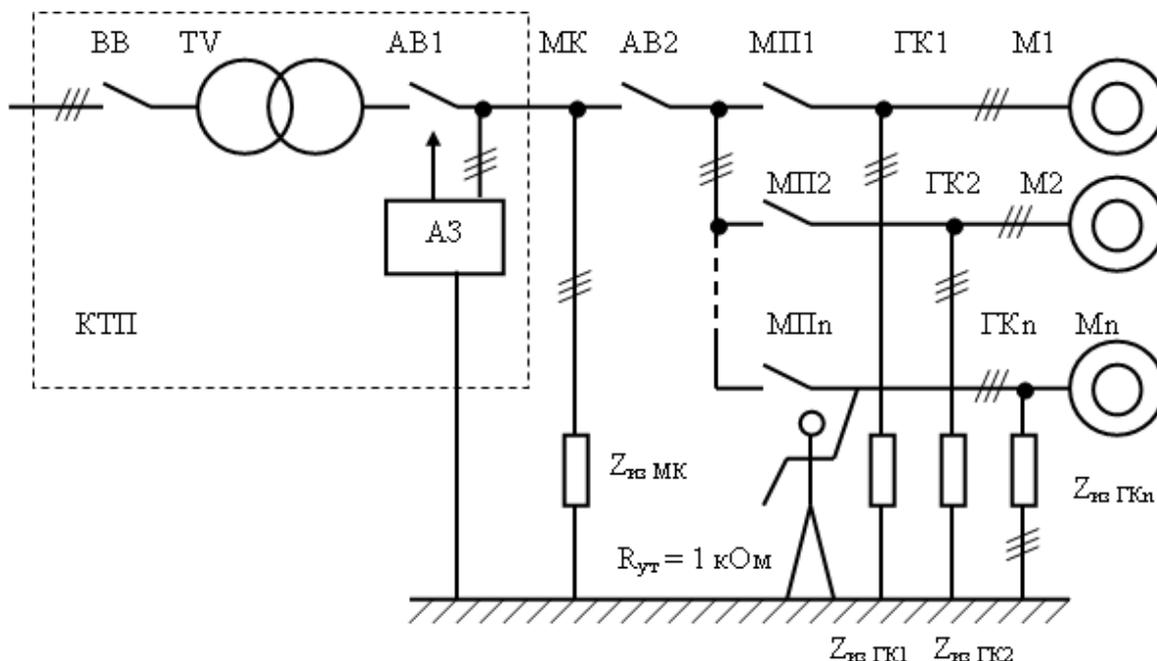


Рис. 1. Схема распределения комплексных проводимостей ($Y=1/Z$) изоляции в системе электроснабжения технологического участка шахты и формирования электропоражающего фактора

С учётом n кабелей, подключенных к выходу ($u_A; u_B; u_C$) трансформатора участковой подстанции, общие активное и ёмкостное сопротивление изоляции между k -й комбинацией фаз ($k=1; k=2; k=3$) вследствие параллельности соединений будут описываться выражениями:

$$R_{\phi-\phi\Sigma k} = \frac{\prod_{i=1}^n R_{\phi-\phi ki}}{\sum_{i=1}^n R_{\phi-\phi ki}}, \quad (1)$$

$$X_{\phi-\phi\Sigma k} = \frac{1}{2\pi f \sum_{i=1}^n C_{\phi-\phi ki}}. \quad (2)$$

Общие активное и ёмкостное сопротивления изоляции между k -й фазой ($k=1; k=2; k=3$) и землёй вследствие параллельности соединений будут описываться выражениями:

$$R_{\phi-3\Sigma k} = \frac{\prod_{i=1}^n R_{\phi-3ki}}{\sum_{i=1}^n R_{\phi-3ki}}, \quad (3)$$

$$X_{\phi-3\Sigma k} = \frac{1}{2\pi f \sum_{i=1}^n C_{\phi-3ki}}. \quad (4)$$

где $C_{\phi-\phi ki}$ – 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).

В свете исследования степени влияния проводимости изоляции кабелей на формирование электропоражающего фактора это даёт основание представить шахтную участковую электрическую сеть комбинацией активно-ёмкостной нагрузки трансформатора питающей подстанции, первая составляющая которой является междуфазными соединениями (присоединения к фазам по схеме «треугольник») $R_{\phi-\phi k\Sigma}; C_{\phi-\phi k\Sigma}$, а вторая – соединением в «звезду» цепей $R_{\phi-3k\Sigma}; C_{\phi-3k\Sigma}$ (рис. 4). Общая точка «0» схемы «звезда» представляет собой контур заземления центральных жил кабелей сети участка. При этом прикосновение человека к фазе сети интерпретируется присоединением активного сопротивления $R_{VT}=1$ кОм между фазой (точка «1») и точкой «0».

Таким образом, свойство трёхфазной электросети участка шахты состоит в том, что она образует параллельное подключение к фазам двух цепей активно-ёмкостных проводимостей, одна из которых представляет структуру «треугольник», а вторая – «звезду». При этом импеданс каждого линейного присоединения в схеме «треугольник» и каждого фазного присоединения в схеме «звезда» будет составлять, соответственно:

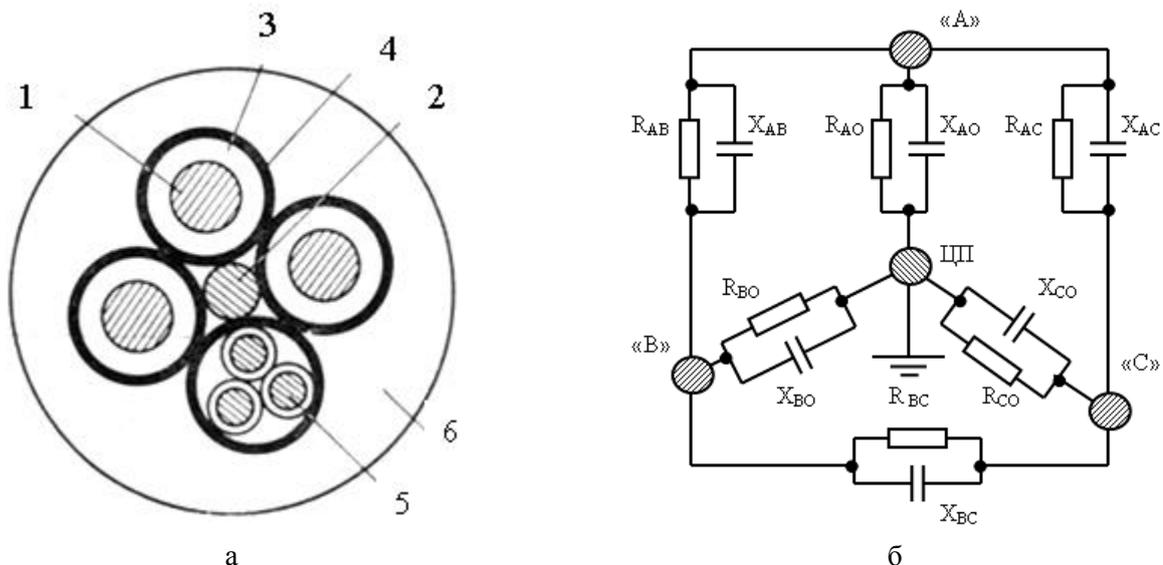


Рис. 2. Схема взаиморасположения:

- a* – силовых жил 1 и центрального провода (ЦП) 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

$$Z_{\phi-\phi\Sigma k} = \frac{R_{\phi-\phi\Sigma k}}{\sqrt{1 + (2\pi f C_{\phi-\phi\Sigma k} R_{\phi-\phi\Sigma k})^2}}, \quad (5)$$

$$Z_{\phi-\Sigma k} = \frac{R_{\phi-\Sigma k}}{\sqrt{1 + (2\pi f C_{\phi-\Sigma k} R_{\phi-\Sigma k})^2}}, \quad (6)$$

$$Z_{\phi-\Sigma 1} = \frac{R_{yT} R_{\phi-\Sigma 1}}{R_{yT} + R_{\phi-\Sigma 1}} \times \left(\sqrt{1 + \left(\frac{2\pi f R_{yT} R_{\phi-\Sigma 1} C_{\phi-\Sigma 1}}{(R_{yT} + R_{\phi-\Sigma 1})} \right)^2} \right). \quad (7)$$

где $k=1; k=2; k=3$.

В случае появления цепи утечки ($R_{yT}=1$ кОм) тока с фазы на общую точку схемы «звезда» (что соответствует прикосновению человека к фазе сети при заземлённых центральных проводах кабелей), импеданс соответствующего фазного присоединения (по рис. 4) преобразуется к виду:

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 РУТ, а также на величину тока в точке соединения в «звезду» активно-ёмкостных проводимостей, определяемых импедансами $Z_{\phi-\Sigma k}$ (при $k=1; k=2; k=3$).

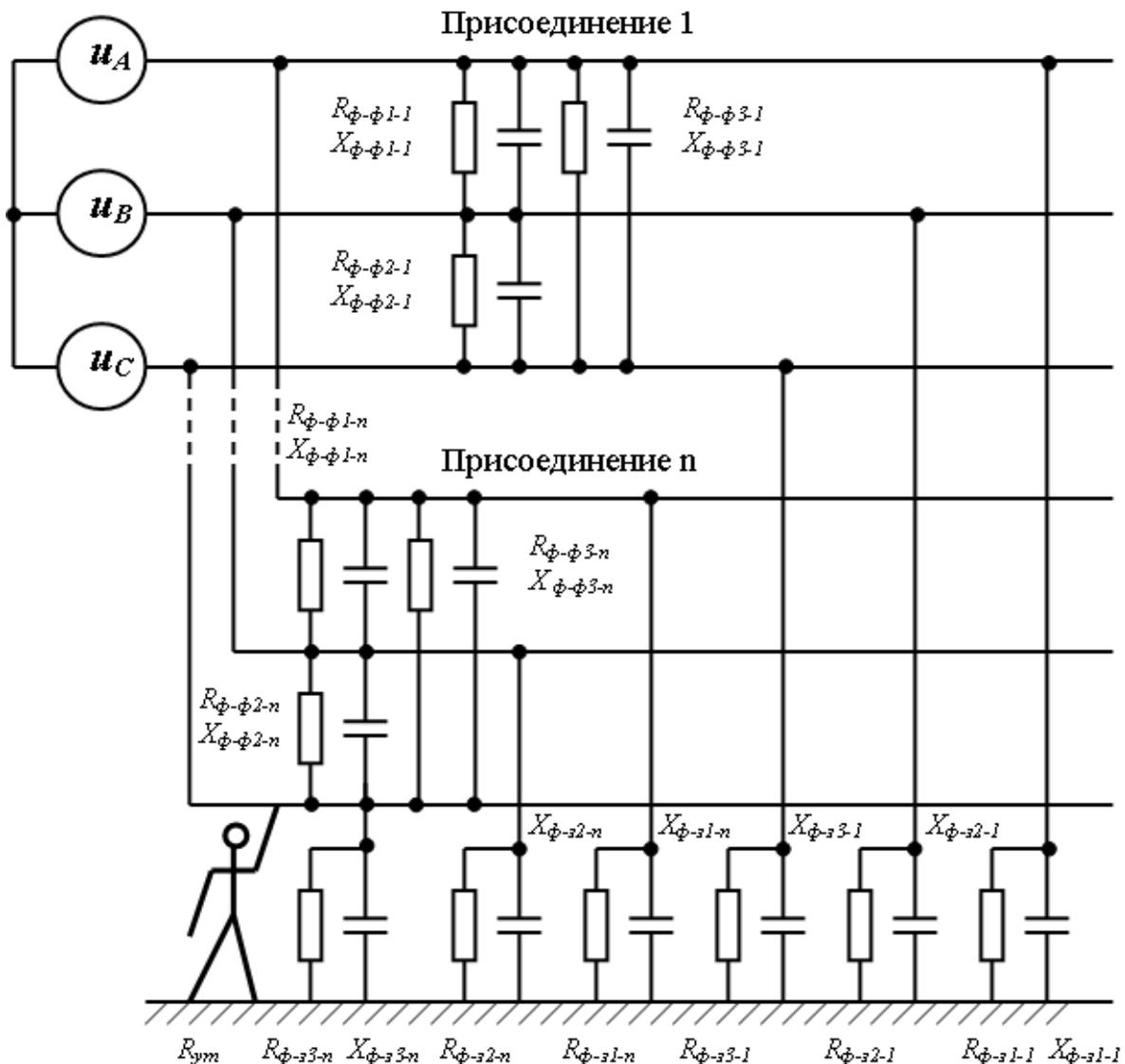


Рис. 3. Уточнённая схема формирования электропоражающего фактора в шахтной участковой электрической сети

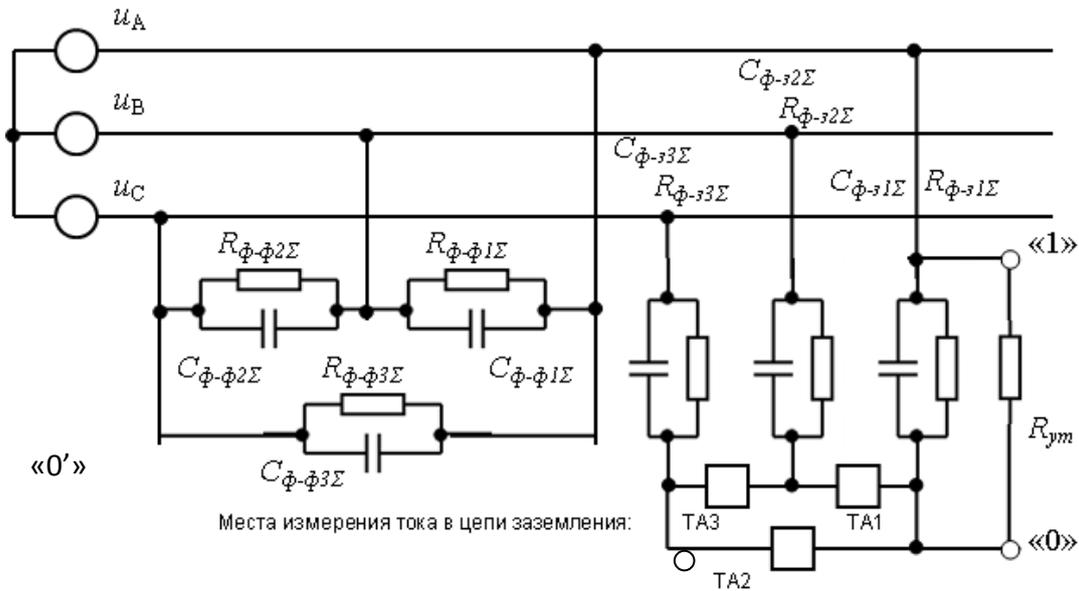


Рис. 4. Обобщённая схема распределения активных ($g=1/R$) и ёмкостных ($b=1/X=2\pi fC$) составляющих проводимости изоляции кабельной электрической сети участка шахты при условии заземления центральных проводов гибких кабелей

Специфика процесса состоит в том, что ток в цепи заземления протекает как между фазами цепи проводимостей изоляции в структуре гибкого кабеля (что на модели (рис. 4) выявляется датчиками тока ТА1; ТА2; ТА3 и представляется как ток в сосредоточенном участке схемы), 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. 5).

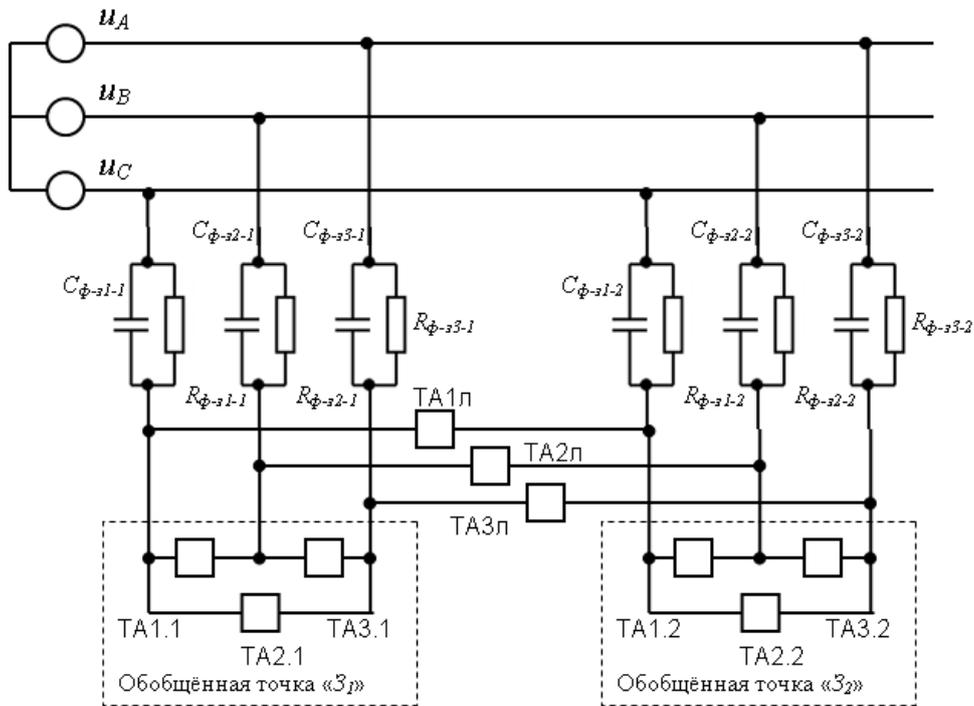


Рис. 5. Схема распределения тока, обусловленного активной и ёмкостной проводимостями изоляции кабелей в сети заземления технологического участка между обобщёнными точками заземления «З₁» и «З₂»

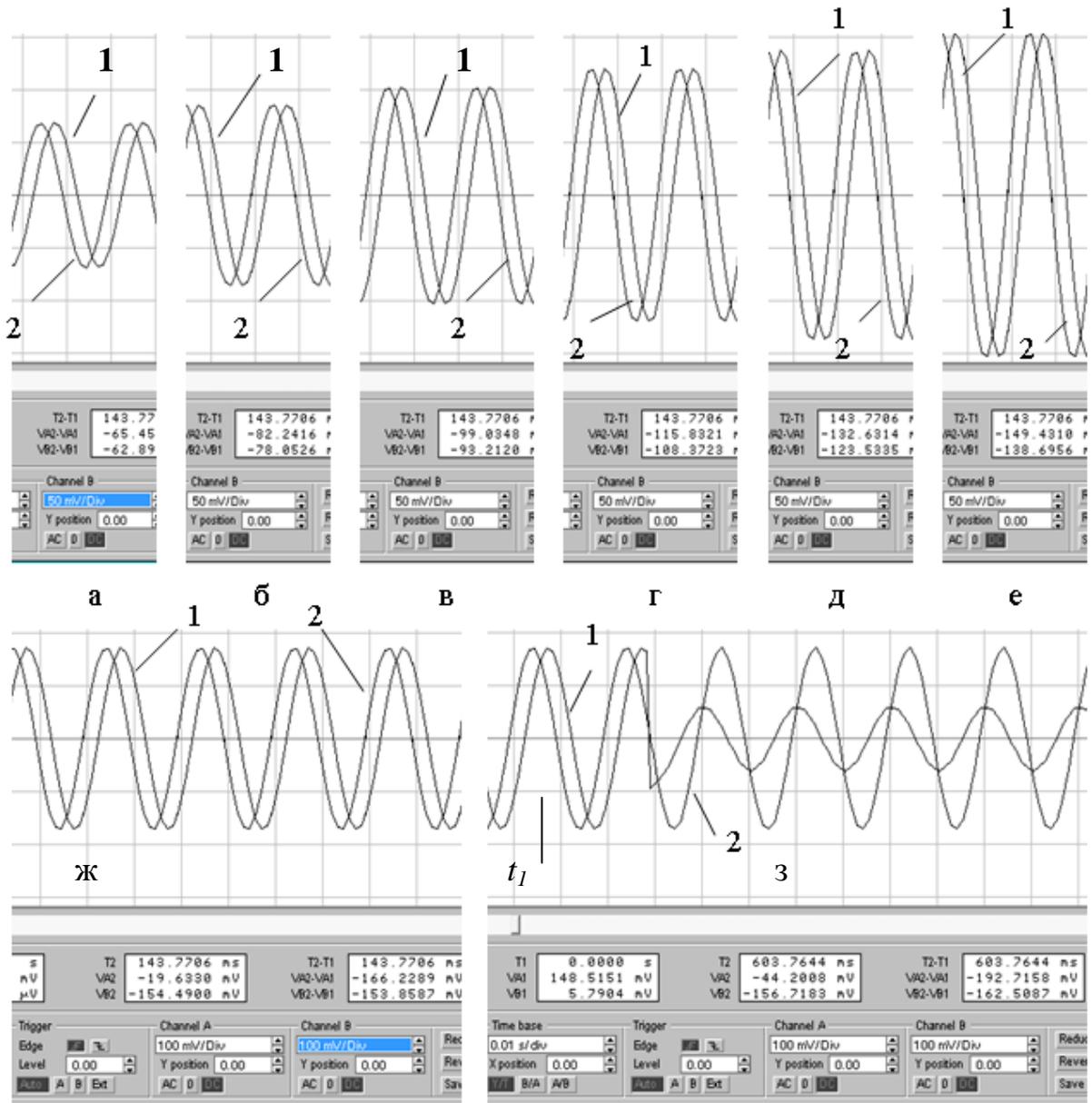


Рис. 6. Осциллограммы напряжений на датчиках с активным сопротивлением 1 Ом в цепях соединений в «звезду» проводимостей изоляции $R_{\phi-\Sigma}$; $C_{\phi-\Sigma}$ по рис. 4: 1 – напряжение на датчика ТА2 (перевёрнуто на 180°); 2 – напряжение на датчике ТА3; $R_{\phi-\Sigma}=150$ кОм/фазу;

- $a - C_{\phi-\Sigma} = 0,4$ мкФ/фазу; $б - C_{\phi-\Sigma} = 0,5$ мкФ/фазу; $в - C_{\phi-\Sigma} = 0,64$ мкФ/фазу; $г - C_{\phi-\Sigma} = 0,7$ мкФ/фазу;
- $д - C_{\phi-\Sigma} = 0,8$ мкФ/фазу; $e - C_{\phi-\Sigma} = 0,9$ мкФ/фазу (масштаб напряжений 50 мВ/деление);
- $ж, з - C_{\phi-\Sigma} = 0,9$ мкФ/фазу (масштаб напряжений 100 мВ/деление);
- $ж -$ в момент t_1 к точкам «0'» – «1» (рис. 4) присоединено активное сопротивление утечки $R_{yT}=1$ кОм. Линейное напряжение сети 1140 В

Осциллограммы токов в цепи заземления (рис. 6) – между фазными проводимостями изоляции (цепи датчиков ТА3; ТА2 по рис. 4) и токов в цепях импедансов изоляции (фаза – заземлённый центральный провод кабеля по рис.7), а также токов в цепи утечки ($R_{yT}=1$ кОм) раскрывают:

– зависимость токов в цепях изоляции кабеля и в сети заземления от ёмкости изоляции кабеля;

– зависимость тока и величины количества электричества в цепи однофазной утечки на землю ($R_{yT}=1$ кОм) от величины ёмкости изоляции кабелей, что позволяет сделать вывод о существенном влиянии ёмкости изоляции кабелей как на величину тока в цепи R_{yT} , так и на величину тока в сети заземления.

В частности, на диаграммах рис. 7в и рис. 7д моментом времени t_1 отмечен интервал времени

в 0,17 с. протекания тока утечки через человека, что соответствует продолжительности отработки отделения от сети энергетического потока питающей трансформаторной подстанции методом шунтирования повреждённой фазы на землю через сопротивление малой величины [8] 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 $C_{из} \geq 0,8$ мкФ/фазу параметр $q > 37$ мА·с, что сопоставимо с предельно допустимым [9] $q = 50$ мА·с. В сети линейного напряжения 1140 В параметр $q > 50$ мА·с при $C_{из} > 0,6$ мкФ/фазу. При этом не учитывается последующее увеличение параметра q вследствие действия обратных ЭДС асинхронных двигателей потребителей, переходящих в режим выбега.

В этом случае представляется уместной хотя бы частичная компенсация ёмкостных токов

утечки индуктивностями. Однако указанная функция входит в «техническое противоречие» с функцией выявления повреждённой фазы с целью последующего её шунтирования на землю, реализуемой в аппаратах защиты от утечек тока на землю последних разработок, предназначенных для работы в сетях линейного напряжения 1140 В.

Так, согласно [10] способ быстрого выявления утечки тока на землю реализован на основе контроля смещения фазовых параметров сети, что возможно при отсутствии компенсации ёмкостных токов и призвано компенсировать эффект компенсации ёмкостных токов утечки повышенным быстрым действием отделения от сети энергетического потока трансформаторной подстанции. В исследовании [10] утверждается, что именно отсутствие компенсации ёмкостных токов позволяет без искажений и с достаточной точностью анализировать естественное протекание процессов в сети.

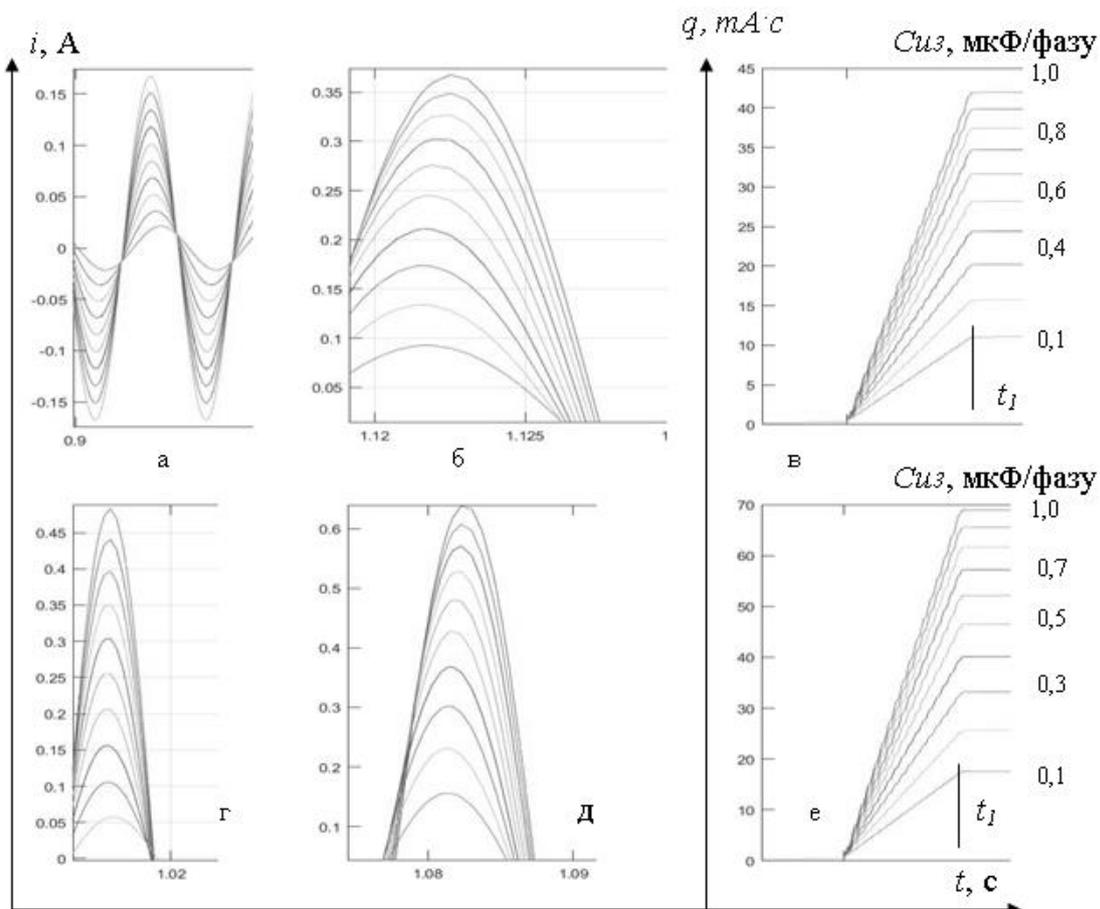


Рис. 7. Осциллограммы токов (а, б, г, д) и количества электричества (в, е) в цепи утечки тока на землю ($R_{ym}=1$ кОм) в зависимости от емкости изоляции сети в диапазоне от $C_{из}=0,1$ мкФ/фазу (нижние кривые) до 1,0 мкФ/фазу (верхние кривые) с шагом в 0,1 мкФ/фазу: а, б, в – линейное напряжение сети – 660 В; г, д, е – линейное напряжением сети – 1140 В; а, г – синусоиды тока в цепи изоляции между фазой и землёй; б, д – синусоиды тока в цепи утечки тока на землю

При этом полезная информация извлекается относительно нулевых переходов электрических параметров сети, что даёт основание полагать о возможности предотвращения ошибок распознавания малых изменений амплитудных параметров за ограниченное время. Будучи реализованным в серии аппаратов АЗУР-МК, этот принцип предполагает создание искусственной нулевой точки сети, измерение напряжения между этой точкой и землёй, программный опрос входных сигналов и контроль начальных углов смещения напряжения нейтрали сети относительно фаз путём определения интервалов между переходами сигналов через нуль. При этом в случае последовательного совпадения двух и более событий, вырабатываются соответствующие выходные логические сигналы, относящиеся к фазам сети, высокий логический уровень одного из которых будет указывать на повреждение изоляции (наличие утечки тока на землю) соответствующей фазы.

Объективно, сложность этого алгоритма и ограниченное (исходя из критериев электробезопасности) время его выполнения предопределяют ряд негативных моментов:

- сложность схемного решения обуславливает снижение надёжности реализующего устройства;

- возможность ошибочного выявления «повреждённой фазы» (смещение фазовых параметров токов и напряжений в трёхфазной промышленной сети, оснащённой активно-индуктивной нагрузкой возможно не только вследствие возникновения повышенной проводимости фазы на землю) предопределяет шунтирование на землю неповреждённой фазы и создание, в связи с этим, предельно опасного условия электропоражения человека при его касании к фазе сети.

Кроме этого, быстрое действие данной защитной функции не может считаться достаточным в контексте ограничения количества электричества q через человека (вывод основан на результатах исследования, приведенных на рис. 7в, рис. 7д).

Из приведенного анализа следует:

- 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 [11, 12];

- режим изолированной нейтрали трансформатора не обеспечивает достаточный уровень безопасности шахтной участковой электрической сети по критерию электропоражения в условиях подключения центральных проводов шахтных гибких кабелей к заземлениям, что

фактически делает шахтную участковую электрическую сеть, функционирующую в режиме изолированной от земли нейтрали трансформатора, гальванически связанной пофазно с сетью заземления;

- 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 обесточивания человека 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 с- обязательное [9], 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 истемы электроснабжения участка шахты, где за основу должен быть взят принцип изначального исключения электропоражающего фактора. В связи с этим, рассмотрению подлежит вопрос реализации технического решения в области выявления касания фазным проводником сети корпуса асинхронного двигателя электропотребителя без заземления последнего и исключения, в связи с этим, необходимости заземлять центральный провод подводящего гибкого кабеля.

За основу здесь может быть взят способ выявления замыкания на землю фазы сети, основанный на подключении между землёй и «звездой» обмоток статора асинхронного двигателя VD-R-VD – цепи, т.е., соединённых последовательно диода (элемента, создающего цепь постоянного тока), резистора (элемента формирования информационного сигнала) и стабилитрона (включенного в обратном направлении по-

следовательно с диодом и создающего совместно с ним эффект поддержания режима изолированной нейтрали сети [13]. При этом, стабилитрон отпирается в обратном направлении в случае появления контакта по цепи «фаза-земля». Аналогичный эффект будет иметь место, если VD-R-VD – цепь соединить не с заземлением, а с корпусом электродвигателя и при этом производить контроль появления электрического контакта фазы сети на корпус двигателя.

Развитием этого технического решения является использование R-C-VD – цепи для выявления контакта фазы с землёй в соответствии с [14]. 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 асинхронного двигателя и его корпусом (рис. 8). При этом, последовательно в цепь может быть введено исполнительное реле K1, замыкающий контакт K1.1 которого может быть задействован в цепи управления контактором магнитного пускателя.

В этом случае переходное сопротивление R_n между корпусом двигателя и землёй может быть не регламентировано, т.к. контролироваться будет эффект появления электрического контакта между фазой сети и корпусом двигателя. Представляется важным отметить, что 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 центрадные провода кабелей).

На рис. 9 представлены осциллограммы (результаты компьютерного моделирования) напряжений на резисторе R1 (рис. 8) сопротивления 1 кОм (ёмкость конденсатора C1 – 500 мкФ). Их анализ позволяет сделать следующие выводы:

- при одинаковых импедансах изоляции между фазами сети и корпусом двигателя и отсутствии контакта в цепи «фаза – корпус» ток в измерительной R-C-VD – цепи отсутствует, что соответствует нормальному режиму работы электрооборудования;

- при появлении контакта (нулевого сопротивления) между фазой и корпусом двигателя, либо между фазой и землёй (в предположении, что $R_n=0$) амплитуда информационного сигнала составляет: в сети линейного напряжения 660 В – 607 В (рис. 9а), в сети линейного напряжения 1140 В – 1000 В (рис. 9б), что достаточно для формирования команды на отключение контактора магнитного пускателя (срабатывание реле K1) и существенно выше параметров напряжения на резисторе R1 (78 В), зафиксированных при существенной разности импедансов изоляции между фазами сети и землёй (в предположении, что $R_n=0$), в соответствии с рис. 9г.

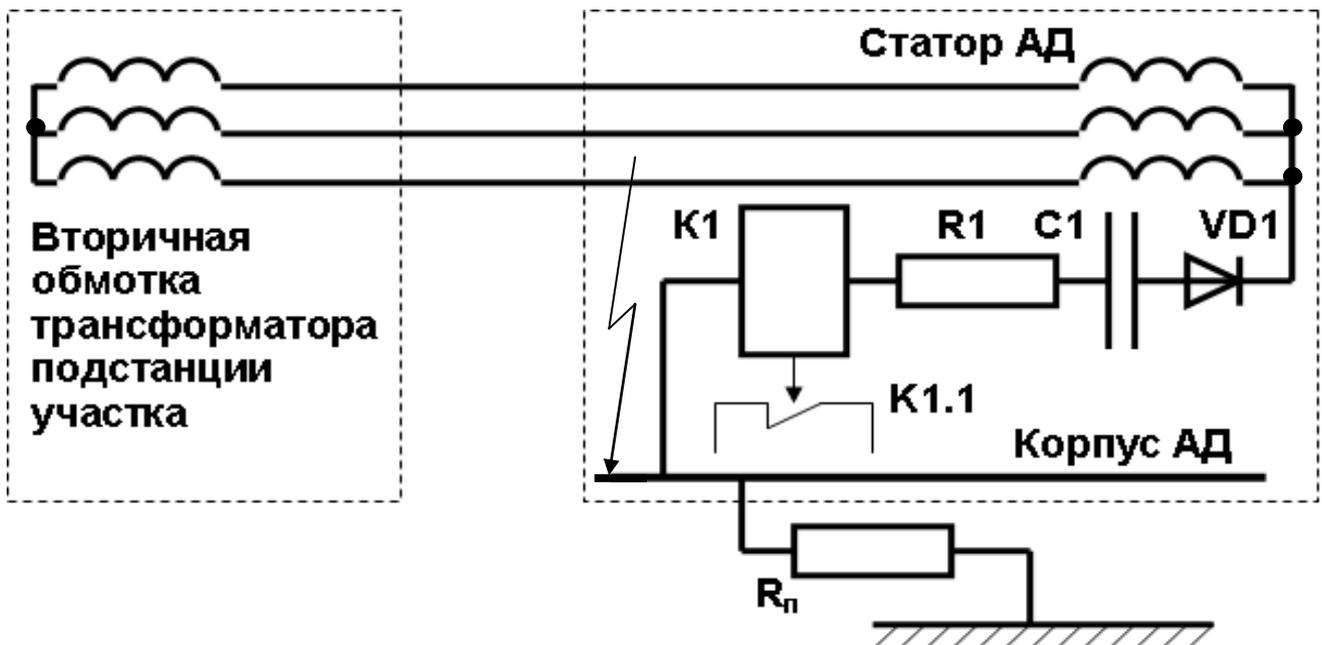


Рис. 8. Схема, иллюстрирующая концепцию выявления пробоя изоляции фазы на корпус электродвигателя (потенциально – снижения сопротивления между фазой и землёй) в структуре электротехнического комплекса участка шахты

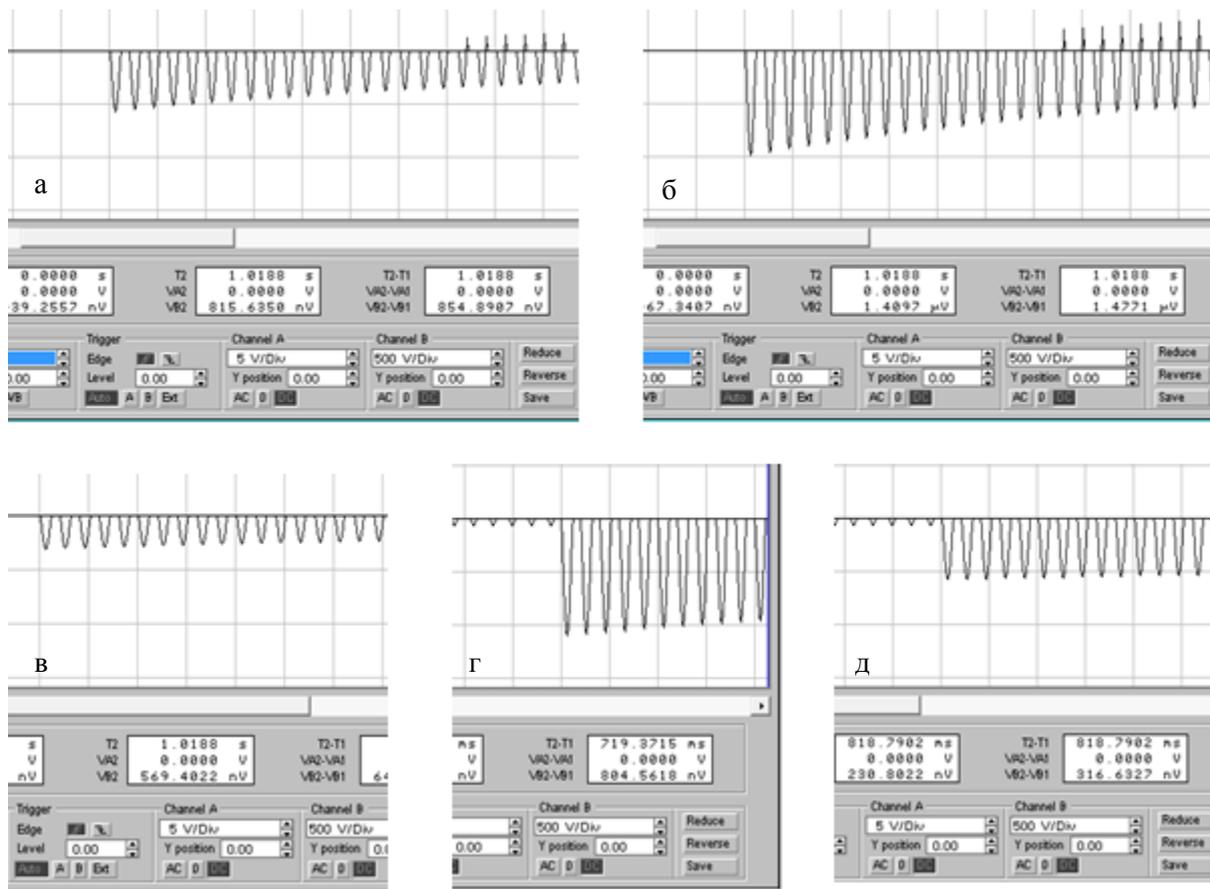


Рис. 9. Осциллограммы напряжений на резисторе R1 устройства выявления соединения фазы на корпус асинхронного двигателя (по рис. 8):

- 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 $R_{ym}=1$ кОм;
- г, д – параметры импедансов изоляции цепей «фаза – корпус двигателя»:
- 1-я фаза: $R_{\phi-3}=100$ кОм; $C_{\phi-3}=0,2$ мкФ; 2-я фаза: $R_{\phi-3}=120$ кОм; $C_{\phi-3}=0,5$ мкФ;
- 3-я фаза: $R_{\phi-3}=60$ кОм; $C_{\phi-3}=0,3$ мкФ; масштаб напряжения 500 В/деление

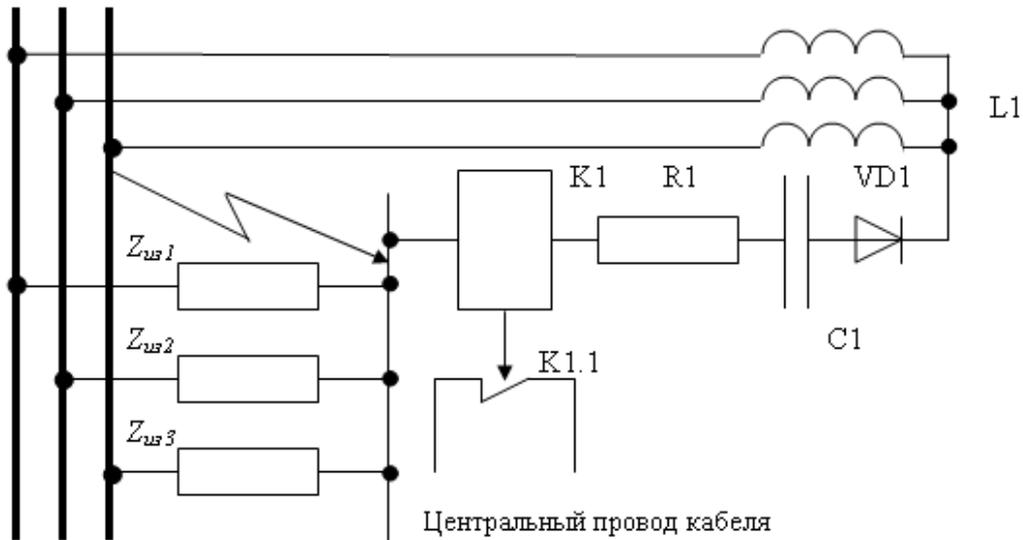
При условии $R_n > 0$ влияние этих импедансов изоляции на формирование информационного сигнала (напряжения) на резисторе R1 измерительной R-C-VD – цепи будет ещё более низким;

– схема (рис. 8) позволяет выявить касание человеком ($R_{чел}=R_{VT}=1$ кОм) одновременно фазы сети и корпуса электродвигателя, либо земли при условии $R_n \approx 0$, что иллюстрируется рис. 9д, в том числе, в случае неодинаковости импедансов изоляции кабеля относительно земли. При этом схема может быть настроена таким образом, чтобы реагировать на контакт человека к фазе и земле при $R_n > 0$. В случае если $R_n \gg 0$, эффект прикосновения человека к фазе сети и одновременно к земле не будет сопровождаться электропоражающим фактором ввиду снижения тока через тело человека до безопасной величины.

Данное техническое решение позволяет от-

казаться 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 схема может быть применена и в структуре силового коммутационного аппарата (например, магнитного пускателя), что позволит выявить контакт фазы на его корпус. При этом, представляется рациональным применить дополнительное защитное изолирование внутренних поверхностей отсеков корпусов рудничного силового электрооборудования (покрытием поверхностей защитной изоляцией), прежде всего, в местах потенциально возможного контакта фазы с корпусом вследствие повреждения имзоляции.



1-й, 2-й, 3-й фазные проводники кабеля на выходе пускателя

Рис. 10. Схема, иллюстрирующая процесс выявления повреждение изоляции кабеля, находящегося под напряжением, техническими средствами, вводимыми в структуру магнитного пускателя

Аналогично техническому решению [2], процесс формирования информационного сигнала может быть осуществлён путём подключения R-C-VD – цепи между центральным проводом кабеля и нулевой точкой трёхфазной L-цепи присоединения к фазам сети на выходе магнитного пускателя (рис. 10). Аналогично схеме (рис. 8) контакт фазы с обособленным (центральным) проводом будет выявлен формированием напряжения на резисторе R1, что при последовательном подключении к нему реле K1 приведёт к его срабатыванию и обесточиванию контактом K1.1 цепи дистанционного управления контактором магнитного пускателя.

Таким образом, совместное применение схем по рис.8 и рис.10 позволяет;

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

- предотвратить появление электропоражающего фактора в системе электроснабжения участка шахты; обусловленного заземлением центральных проводов гибких кабелей;

- обеспечить защитное отключение магнитного пускателя при возникновении электрического контакта между фазой и корпусом присоединённого асинхронного двигателя и при снижении сопротивления изоляции силовой жилы в кабеле присоединения магнитного пускателя;

- обеспечить селективность контроля (на основе применения локальных технических средств) состояния изоляции кабелей включен-

ных 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 жилами гибких кабелей и их центральными проводами 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 проводов шахтных гибких кабелей к заземлениям режим изолированной нейтрали трансформатора не является достаточным в контексте обеспечения электробезопасности эксплуатации шахтной участковой электрической сети.

Обособление центральных проводов гибких 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 при существенном снижении импеданса изоляции силовых фазных проводов кабеля относительно

земли. Неиспользование центральных проводов гибких кабелей в качестве заземляющих позволит предотвратить появление электропоражающего фактора (либо существенно ограничить его уровень) в системе электроснабжения участка шахты; обусловленного импедансами изоляции между фазами сети и землей

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 через подключение к заземлению центрального провода подводящего кабеля.

Список литературы

1. Справочник энергетика угольной шахты: в 2 т. / [Дзюбан В.С., Ширнин И.Г., Ванев Б.Н., Гостищев В.М.]; под ред. Б.Н. Ванеева. – [2-е изд., перераб. и доп.]. – Донецк: ООО «Юго-Восток, Лтд», 2001. – Т.1.: (Гл.1-21). – 477 с.; Т.2.: (Гл.22-44). – 440 с.
2. Управление коммутацией цепи нейтрали вторичной обмотки трансформатора подстанции как способ повышения эффективности защитного отключения сети / И.Б. Гуляева, М.К. Маренич // Вестник Донецкого национального технического университета. – Донецк, ГОУВПО «ДОННТУ», 2021. – Вып. 2(24). – С. 9-16.
3. Дзюбан В.С. Аппараты защиты от токов утечки в шахтных электрических сетях / В.С. Дзюбан. – М.: Недра, 1982. – 152 с.
4. Ягудаев Б.М. Защита от электропоражения в горной промышленности / Б.М. Ягудаев, Н.Ф. Шишкин, В.В. Назаров. – М.: Недра, 1982. – 152 с.
5. 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. – 91 с.
6. Белошистов А.И. Модернизация аппаратов защиты от токов утечки АЗУР-1 / А.И. Белошистов, А.В. Савицкий, В.Н. Савицкий // Взрывозащищенное электрооборудование №1(52) ГУ НИИВЭ, Донецк, 2017. – С. 45-57.
7. Устройство и принцип работы АЗУР-4 [Электронный ресурс]. – Режим доступа: https://sinref.ru/000_uchebniki/01791shahtnoe_oborudov/084_apparat_zashiti_tokov_utechki_a_zur_4/004.htm. – Загл с экрана.
8. Апарат защиты от токов утечки унифицированный рудничный АЗУР-4МК. Руководство по эксплуатации / ИТЭП 28648513.004.РЭ.- Донецк, 2013.- 28 с. [Электронный ресурс]. – Режим доступа: url: <https://itep.com.ua>. – Загл. с экрана.
9. 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).
10. Савицкий А.В. Новая серия микроконтроллерных аппаратов защиты от токов утечки на землю в шахтных распределительных сетях напряжением до 1200 В / А.В. Савицкий Наукові праці ДонНТУ. Серія «Електротехніка та електроенергетика» № 2(15)'2013. – Донецк. ДонНТУ. – С. 211-216.
11. Электрооборудование взрывозащищенное. 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.
12. 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.
13. Патент на винахід 95757 (UA), МПК (2006.01) H02H 3/10; H02H 7/08 Пристрій захисту від впливу зворотного асинхронного двигуна на точку короткого замикання в кабелі живлення / К.М. Маренич, І.В. Ковальова, І.О. Лагута, С.В. Василець. – а 2010 13816. Заявл. 22.11.2010. Опубл. 25.08.2011. Бюл. №16. – 4 с.
14. Патент на винахід 103934 (UA), МПК (2006.01) H02H 3/02; H02H 3/10 Пристрій захисту від впливу зворотного енергетичного потоку асинхронного двигуна на точку короткого замикання в кабелі живлення / К.М. Маренич, І.В. Ковальова, І.О. Лагута. – а 2012 01369. Заявл. 09.02.2012. Опубл. 10.12.2013. Бюл. №23. – 5 с.

I.B. Guliaeva /Cand. Sci. (Eng.)/, Ye.S. Dubinka / Cand. Sci. (Eng.)/, M.K. Marenich
Donetsk National Technical University (Donetsk)
L.A. Mufel /Cand. Sci. (Eng.)/, O.A. Demchenko /Cand. Sci. (Eng.)/
State Makeevka Safety in Mines Research Institute (Makeevka)

CONDUCTIVITY OF INSULATION OF THE ELECTRIC NETWORK OF THE MINES AS A RISK FACTOR OF ELECTRIC INJURY. PROBLEM ISSUES AND WAYS OF THEIR SOLUTION

Background. *Grounding of non-stationary electrical equipment of mine sections by connecting flexible cables to the grounding circuit of the central wires leads to the appearance of high levels of capacitive currents, which predetermines the risk of electrocution of a person when he touches the network phase. Scientific and practical relevance is represented by research that allows you to preserve the protective functions of electrical equipment, provided that the central wires of mine flexible cables are used separately, including their non-connection to the ground circuit*

Materials and/or methods. *Based on the specifics of the layout and operation of the mine flexible cable in the structure of the electric network of the mine site, the effect of creating an electro-damaging factor due to the connection of the central wires of the cables to the grounding circuit is investigated. An alternative technical solution has been proposed that makes it possible to control the phase contact on the motor housing and the insulation resistance of the phase conductors of the cables, eliminating the need for grounding of the electric motor casings.*

Results. *It has been established that the insulation capacity formed between the phase conductors of flexible cables and their central wires when the latter is connected to the grounding circuit has a significant effect on the level of the electro-striking factor in the mine local electrical network. The isolation of the central wires of flexible cables and their use in conjunction with R-C-VD - control circuits in the structure of magnetic starters makes it possible to detect damage to the cable insulation, to realize the selectivity of protective shutdown of electrical consumers with a significant decrease in the insulation impedance of the power phase wires relative to the ground. Failure to use the central wires of flexible cables as grounding ones will prevent the appearance of an electrostatic factor in the power supply system of the mine site; due to the impedances of insulation between the phases of the network and earth Connections RC-VD - control circuits between the "star" of the stator windings of an asynchronous motor of an electrical consumer and its case allows you to effectively identify the electrical connection of the mains phase with the case of this motor, as well as a person's touch to the mains phase and the motor case (generate a command for a protective mains disconnection), which eliminates the need for grounding the motor through the connection to the grounding of the central wire of the supply cable.*

Conclusion. *Provided substantiated evidence of the formation of an electro-striking factor during the operation of a mine local electrical network due to grounding of non-stationary electrical equipment through the central wires of flexible cables. An alternative concept for the construction of a power supply system for a mine sectional electrical network has been substantiated, in accordance with which grounding of the central cores of flexible cables is excluded and the principle of selectivity of protective shutdown of electric consumers of a mine section is implemented on the basis of the use of local means of monitoring the state of insulation of power connections.*

Keywords: *mine electrical equipment, flexible cable, insulation, conductivity, shock factor, detection, research, control, safety shutdown, selectivity, local means, power supply system, alternative concept.*

Сведения об авторах

И.Б. Гуляева

Телефон: +380 (71) 332-75-75
 Эл. почта: iraguliaeva@gmail.com

М.К. Маренич

Телефон: +380 (71) 328-05-79
 Эл. почта: marenichmk@gmail.com

О.А. Демченко

Телефон: +380 (71) 373-92-58
 Эл. почта: maknii.ra@gmail.com

Е.С. Дубинка

Телефон: +380 (71) 302-74-94
 Эл. почта: ekaterina_sd@bk.ru

Л.А. Муфель

Телефон: +380 (71) 475-08-99
 Эл. почта: maknii.ra@gmail.com

Статья поступила 16.09.2021 г.

*© И.Б. Гуляева, Е.С. Дубинка, М.К. Маренич, Л.А. Муфель, О.А. Демченко, 2021
 Рецензент д.т.н., проф. А.П. Ковалёв*