

УДК 622.647.1

И.Б. Гуляева /к.т.н./, М.К. Маренич

ГОУ ВПО «Донецкий национальный технический университет» (Донецк)

Л.А. Муфель /к.т.н./

ГУ «Макеевский государственный научно-исследовательский институт по безопасности работ в горной промышленности» (Макеевка)

АДАПТАЦИЯ ПЕТЛЕВОГО МЕТОДА ОПРЕДЕЛЕНИЯ МЕСТА ПОВРЕЖДЕНИЯ КАБЕЛЯ К УСЛОВИЯМ ПРИМЕНЕНИЯ В СТРУКТУРЕ РУДНИЧНОГО ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКОГО КОМПЛЕКСА

В контексте развития исследований в области повышения безопасности эксплуатации электротехнических комплексов технологических участков шахт обоснована возможность выявления момента и места повреждения изоляции силовой жилы шахтного гибкого кабеля техническими средствами, адаптированными к использованию в составе силового рудничного электрооборудования при условии применения в структуре кабеля обособленного проводника. Представлены варианты схемных решений, реализующих концептуальные положения петлевого метода определения места повреждения кабеля.

Ключевые слова: рудничное электрооборудование, гибкий кабель, изоляция, повреждение, исследование, выявление, схема, петлевой метод, адаптация, применение, технические предложения

Постановка проблемы

Специфика ведения подземных горных работ по добыче полезных ископаемых предопределяет нестационарность применяемого технологического оборудования и необходимость использования в связи с этим разветвлённой системы гибких кабелей. Постоянно перемещаемое технологическое оборудование участка шахты, стеснённое пространство горной выработки и отсутствие средств механической защиты гибкого кабеля являются в совокупности факторами, предопределяющими его повреждения.

В этом случае практическую актуальность представляет минимизация времени простоя технологического оборудования, что в значительной степени определяется продолжительностью времени отыскания места повреждения кабеля. Этим обусловлена целесообразность применения специальных технических средств определения места повреждения изоляции в кабеле.

Анализ последних исследований и публикаций

Общий обзор методов и технических решений в области контроля технического состояния кабеля промышленной электросети и выявления места его повреждения представлен в работах [1,2]. Здесь, в частности, рассмотрены методы: колебательного разряда, индукционный, ёмкостной, акустический, импульсный, петлевой.

Однако все они требуют применения дополнительных сложных технических устройств, схемы которых, как правило, не согласуются с условиями использования в составе рудничного силового взрывозащищённого электрооборудования. В то же время, петлевой метод, предполагающий использование дополнительного проводника в структуре кабеля при построении схемы измеряемых электрических компонентов, включающей фазный провод от источника питания до места повреждения кабеля и дополнительный проводник, может служить прототипом при разработке технического средства определения места повреждения изоляции кабеля, адаптированного к условиям применения в структуре рудничных электротехнических комплексов.

Цель исследования

Целью настоящего исследования является обоснование способа определения места повреждения шахтного гибкого кабеля, соответствующего концепции петлевого метода и условиям применения в структуре рудничных электротехнических комплексов.

Основной материал исследования

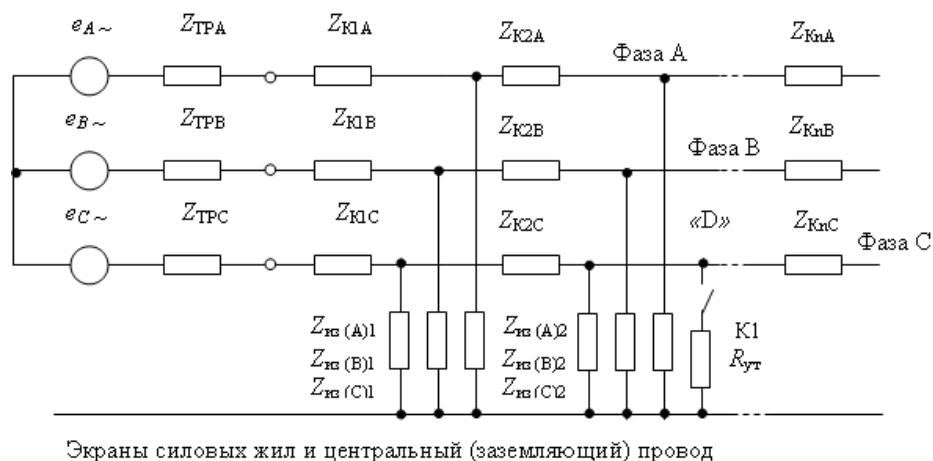
Механические повреждения шахтных гибких кабелей в полной мере могут быть отнесены к потенциально опасным состояниям. Как следует из [3], в качестве причины возгорания шахтных гибких экранированных кабелей более 40 % слу-

чаев составляют междуфазные короткие замыкания вследствие повреждения изоляции их силовых жил. Такие повреждения могут наступать как вследствие сдавливания кабелей, так и в результате разрушения их оболочек внешними острыми предметами. При этом, при сдавливании наступает эффект повреждения резиновой изоляции силовых жил их смещающимися проводочными компонентами. В дальнейшем это переходит в соприкосновение последних с экранами из полупроводящей резины, покрывающими резиновую изоляцию жил и, в конечном итоге, к электрическому контакту фаз с центральной медной жилой, выполняющей в данном случае функцию элемента заземления с вероятным последующим переходом в стадию междуфазного короткого замыкания. Аналогичный эффект имеет место и при внешнем механическом повреждении кабеля с той лишь разницей, что электрический контакт фазного проводника с экранами осуществляется внешним повреждающим предметом. Таким образом, процесс повреждения фазы шахтного гибкого экранированного кабеля может быть иллюстрирован схемой (рис. 1), где питающее напряжение на кабель подаётся со вторичной обмотки трансформатора участковой подстанции, фазы которой соединены по схеме «звезда», фазные проводники кабеля представлены продольными активными ($R_k = \sum R_{ki}$) и индуктивными ($X_k = \sum X_{ki} = 2\pi f \sum L_{ki}$) сопротивлениями (где R_{ki} , L_{ki} – соответственно, активные сопротивления и индуктивности элементарных отрезков погонной длины кабеля, $f=50$ Гц – частота напряжения сети). Активное

сопротивление экрана из полупроводящей резины, покрывающего резиновую изоляцию фазной жилы кабеля, в зависимости от сечения жилы находится в пределах $0,5 \div 1,5$ кОм/км длины и также может быть представлено суммой сопротивлений элементарных отрезков ($R_{эп} = \sum r_{эпi}$) [3,4]. Однако, в соответствии со структурой кабеля, эти отрезки, относящиеся к разным фазам, представляются параллельными соединениями при таком же параллельном подключении к элементарным отрезкам (сопротивления $r_{эпi}$) центрального медного заземляющего проводника (жилы кабеля, рис. 2).

Таким образом, в соответствии со схемой (рис. 1), место повреждения изоляции фазы кабеля отмечено точкой «D», а применение петлевого метода сопротивления (рис. 3), содержащего помимо резисторов R1, R2, сопротивления (представленные резисторами) участков повреждённой R4.1, R4.2 и неповреждённой R3 фазных жил кабеля.

Несмотря на то, что аппаратно-измерительная часть схемы реализации данного метода не пригодна к применению в условиях эксплуатации рудничных электротехнических комплексов, отдельные компоненты метода представляют практический интерес. В данном случае речь идёт об использовании сопротивлений участков проводника от источника до места повреждения и от места повреждения до конца кабеля, при этом проводник должен быть обособлен от контролируемой жилы кабеля подобно проводнику с сопротивлением R3 (рис. 3).



Экраны силовых жил и центральный (заземляющий) провод

Рис. 1. Схема имитации повреждения (замыкание контакта Кут) изоляции фазы «С» через сопротивление утечки ($R_{ут}$) в кабеле присоединения к трансформатору участковой подстанции: e_A, e_B, e_C – ЭДС фаз «А», «В», «С» трансформатора подстанции; $Z_{Тр}$ и $Z_{Кi}$ образованы последовательным подключением активных (r_i) и индуктивных (xLi) компонентов, соответственно, трансформатора и элементарных отрезков кабеля; $Z_{из i}$ образованы параллельным подключением активных ($R_{из i}$) и ёмкостных ($X_{Ci} = 1/2\pi f C_i$) составляющих сопротивлений изоляции элементарных отрезков кабеля, где C_i – ёмкость изоляции элементарного отрезка кабеля

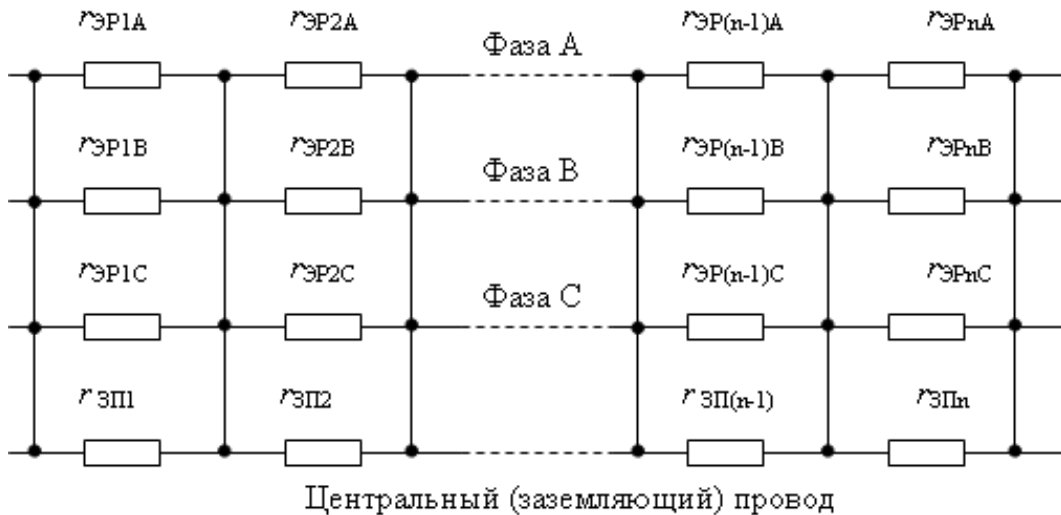


Рис. 2. Схемная интерпретация соединения элементарных отрезков экранов (из полупроводящей резины) силовых жил шахтного гибкого экранированного кабеля и центрального (заземляющего) провода



Рис. 3. Схема, иллюстрирующая концепцию петлевого метода определения места (точка «D») повреждения изоляции фазы кабеля

Предположим, что в качестве такого проводника служит обособленный провод, выполненный из высокоомного материала (например, сплав нихром с удельным сопротивлением $1,1 \text{ Ом} \cdot \text{мм}^2/\text{м}$ при температуре окружающей среды $20 \text{ }^\circ\text{C}$ [5]), проложенный по всей длине кабеля и имеющий электрический контакт с точкой «D» повреждения изоляции силовой жилы. Тогда могут быть созданы условия не только вычислить место повреждения изоляции кабеля, но и выявить момент такого повреждения, что иллюстрируется схемой (рис.4), где $Z_{\text{Ад}}$ – комплексные сопротивления фаз асинхронного двигателя потребителя.

Применение высокоомного обособленного провода (с сопротивлениями $R_{\text{оп1}}$ и $R_{\text{оп2}}$) позволяет ввести допущение о корректности неучёта комплексных сопротивлений обмоток трансформатора участковой подстанции и силовых жил кабеля. Также можно пренебречь сопротивлением дополнительного медного обособленно-

го проводника, связывающего точка «Н2» – «К2» (рис. 4). В качестве последнего может быть использована вспомогательная (сигнальная) жила кабеля.

Наличие полупроводниково-ёмкостных цепей, связывающих измерительные присоединения через точки «Н1» и «Н2» с точкой нулевого потенциала трёхфазной вторичной обмотки трансформатора участковой подстанции позволяет не нарушать режим изолированной нейтрали трансформатора и ограничить продолжительность измерительного процесса временем заряда конденсаторов $C1$ и $C2$, выпрямленными токами, проходящими по цепям $R_{\text{ут}} - R_{\text{оп1}} - R1$ и $R_{\text{ут}} - R_{\text{оп2}} - R2$, соответственно. Этим обеспечивается эффект формирования серии экспоненциально снижающихся по амплитуде импульсов напряжения на резисторах $R1$ и $R2$, начало которой определено моментом повреждения изоляции силовой жилы кабеля в точке «D» (рис. 1; рис. 3; рис. 4) [6].

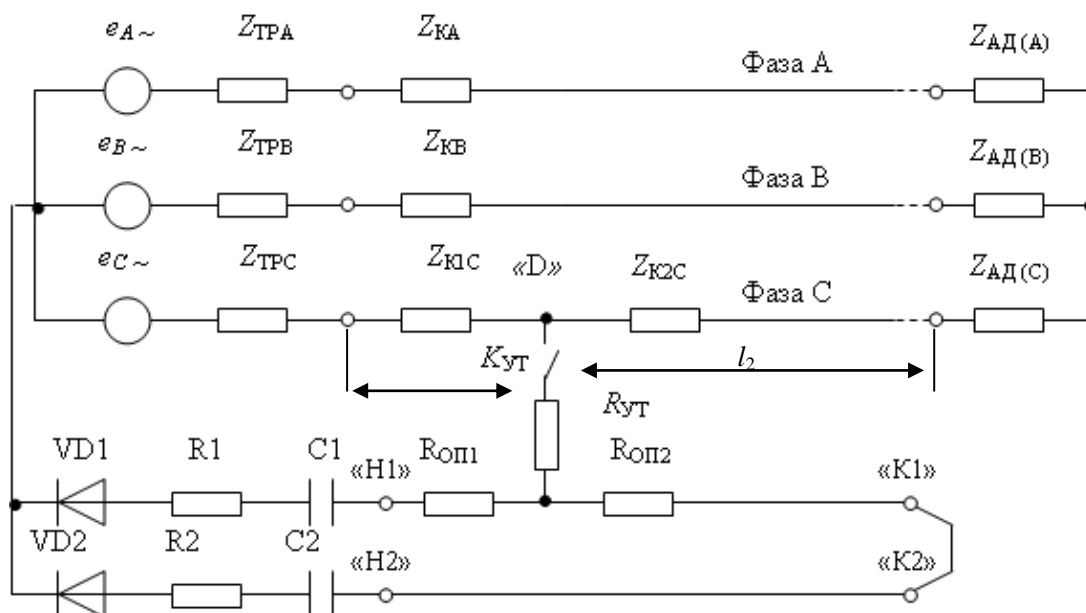


Рис. 4. Схема, иллюстрирующая способ выявления момента и места (точка «D») повреждения изоляции силовой жилы кабеля

Амплитуда тока в цепи сопротивления утечки ($R_{ут}$) будет составлять в соответствии с первым законом Кирхгофа:

$$I_{m_{ут}} = E_{m(C)} \cdot \left(R_{ут} + \frac{R_{\Sigma 1} \cdot R_{\Sigma 2}}{R_{\Sigma 1} + R_{\Sigma 2}} \right)^{-1}, \quad (1)$$

где $R_{\Sigma 1} = R_{on1} + R1$; $R_{\Sigma 2} = R_{on2} + R2$; $E_{m(C)}$ – амплитуда фазной ЭДС трансформатора участковой подстанции (фаза «C» по рис. 4).

Распределение амплитуд токов в ветвях $R_{\Sigma 1}$ и $R_{\Sigma 2}$ находится в обратной пропорции к соотношению сопротивлений этих ветвей:

$$\frac{I_{m1}}{I_{m2}} = \frac{I_{m1}}{I_{m_{ум}} - I_{m1}} = \frac{R_{\Sigma 2}}{R_{\Sigma 1}}, \quad (2)$$

откуда

$$I_{m1} = \frac{I_{m_{ум}} R_{\Sigma 2}}{R_{\Sigma 2} + R_{\Sigma 1}}. \quad (3)$$

Диоды VD1 и VD2 будут определять однополярность токов в ветвях $R_{\Sigma 1}$ и $R_{\Sigma 2}$, а конденсаторы C1 и C2 – экспоненциальное снижение амплитуд токов с постоянными времени $T1 = R_{\Sigma 1} \cdot C1$ и $T2 = R_{\Sigma 2} \cdot C2$, соответственно. При этом соотношение длин участка обособленного провода от его начала до точки «D» повреждения изоляции фазы кабеля и от этой точки до конца провода определяется соотношением сопротивлений:

$$\frac{l_1}{l_2} = \frac{R_{on1}}{R_{on2}} \approx \frac{R_{\Sigma 1}}{R_{\Sigma 2}} = \frac{I_{m2}}{I_{m1}}, \quad (4)$$

что позволяет выполнить соответствующие вычисления, основываясь на параметрах первых полуолн синусоид падений напряжения на резисторах R1 и R2. Так, например, равенство амплитуд этих полуолн указывает на место «D» повреждения изоляции кабеля в его средней точке.

Таким образом, концептуальное решение, представленное на рис. 4, позволяет решить задачу выявления точки повреждения изоляции фазы кабеля техническими средствами, адаптированными к промышленному применению. Однако проблемным остаётся вопрос применения в кабеле высокоомного обособленного провода, гарантированно воспринимающего контакт с силовой жилой кабеля в месте повреждения её изоляции.

Эта задача невыполнима в существующей конструкции шахтных гибких экранированных кабелей, где потенциал фазы в случае повреждения её изоляции будет мгновенно распространяться на экраны (полупроводящая резина) фазных проводников и центральный медный провод. Тем не менее, отдельные структурные компоненты концептуальной модели (рис. 4) могут быть адаптированы к условиям эксплуатации шахтного гибкого экранированного кабеля. Здесь речь может идти о:

- схеме выявления момента повреждения изоляции силовой жилы (силовых жил);
- выявлении точки (места) повреждения изо-

ляции силовой жилы по соотношению токов в её участках;

- применении обособленного проводника, воспринимающего контакт фазы кабеля вследствие повреждения её изоляции.

Этим допущениям соответствует схема (рис. 5). Момент повреждения изоляции фазы кабеля фиксируется началом формирования экспоненциально снижающихся по амплитуде импульсов напряжения $U_{вых}$ на резисторе R1, а после защитного отключения коммутационного аппарата SA1 контакторами K1; K2; K3 выходное напряжение трансформатора TV2 поочередно и кратковременно подаётся на фазы «А», «В»; «С» кабельного присоединения. При этом конечные точки фаз кабеля на время данной измерительной операции должны быть соединены между собой (контакты K5–K7), либо подсоединены к трёхфазной нагрузке (статор асинхронного двигателя потребителя).

В случае повреждения изоляции (фаза «С» по рис. 5) ток в цепи датчика тока ТА будет составлять:

- включен контакт K1

$$I_{TA(A)} = \frac{U_{TV2}}{sqr((r_{k(A)} + r_{k(C)2} + R_{yt})^2 + (x_{k(A)} + x_{k(C)2})^2)} = \frac{U_{TV2}}{Z_{A-C2}}; \quad (5)$$

- включен контакт K2

$$I_{TA(B)} = \frac{U_{TV2}}{sqr((r_{k(B)} + r_{k(C)2} + R_{yt})^2 + (x_{k(B)} + x_{k(C)2})^2)} = \frac{U_{TV2}}{Z_{B-C2}}; \quad (6)$$

- включен контакт K3

$$I_{TA(C)} = \frac{U_{TV2}}{sqr((r_{k(C)1} + R_{yt})^2 + x_{k(C)1}^2)} = \frac{U_{TV2}}{Z_{C1}}, \quad (7)$$

где – комплексные сопротивления фаз, соответственно, «А» и «В» и участка фазы «С» от точки «D» повреждения изоляции кабеля до конца кабеля (по рис. 5).

Как правило, при механическом повреждении проводником фазы резиновой изоляции силовой жилы кабеля сопротивление утечки $R_{yt} \approx 0$. С учётом этого, упрощаются выражения 5-7.

В дальнейшем, на основании данных о величине токов в цепи датчика тока ТА может быть определено место повреждения изоляции жилы кабеля, например, в виде отношения длины участка жилы от точка «D» повреждения до конца кабеля к общей длине кабеля:

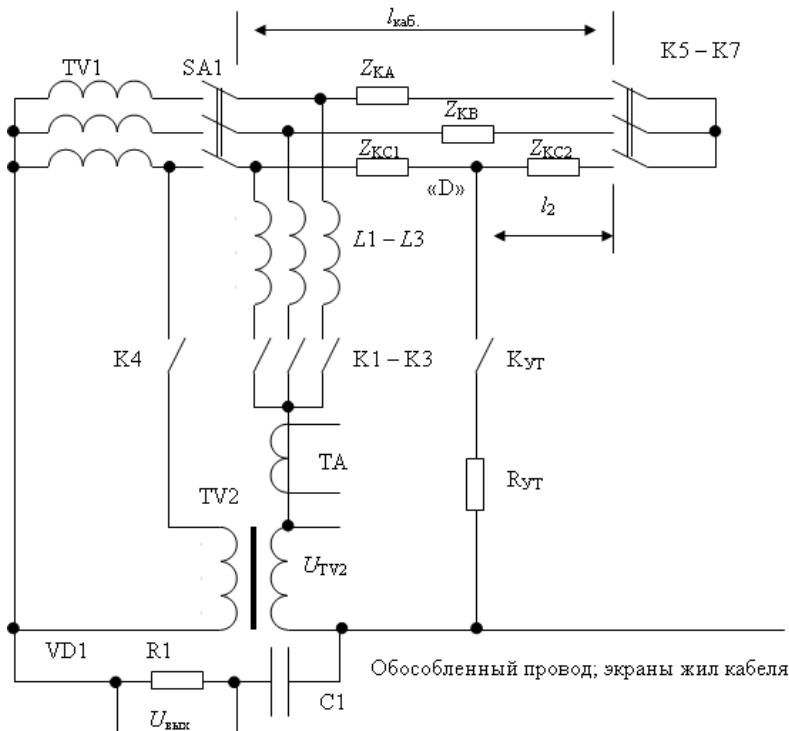


Рис. 5. Схема, иллюстрирующая процесс контроля момента и выявления места повреждения изоляции шахтного гибкого экранированного кабеля

$$\frac{I_2}{I_{\text{лаб}}} = \frac{Z_{kC2}}{Z_{kA}} = \frac{Z_{kC2}}{Z_{kB}}, \quad (8)$$

что поясняется следующими соотношениями:

$$\frac{I_{TA(A)}}{I_{TA(C)}} = \frac{Z_{kC1}}{Z_{kA} + Z_{kC2}} = \frac{Z_{kA} - Z_{kC2}}{Z_{kA} + Z_{kC2}}, \quad (9)$$

откуда

$$\begin{aligned} I_{TA(A)} \cdot (Z_{kA} + Z_{kC2}) &= I_{TA(C)} \cdot (Z_{kA} - Z_{kC2}); \\ Z_{kC2} \cdot (I_{TA(A)} + I_{TA(C)}) &= Z_{kA} \cdot (I_{TA(C)} - I_{TA(A)}); \\ \frac{Z_{kC2}}{Z_{kA}} &= \frac{I_{TA(C)} - I_{TA(A)}}{I_{TA(A)} + I_{TA(C)}}. \end{aligned} \quad (10)$$

Рассмотренный процесс выявления места повреждения изоляции фазы кабеля может быть осуществлён, если центральную медную жилу кабеля, имеющую контакт по всей длине с экранами (силовых жил), выполненными из полупроводящей резины, использовать в качестве обособленного проводника, не выполняющего функцию заземления (а в конструкцию кабеля ввести дополнительный заземляющий проводник, не связанный с указанными экранами). При этом функция выявления утечки тока (повреждения изоляции) в соответствии со схемой (рис. 5) осуществляется присоединением цепи VD1–R1–C1 к общей точке «звезды» вторичных обмоток трансформатора TV1 участковой подстанции и обособленному проводу кабеля.

Выводы

Исследованиями установлена принципиальная возможность схемной реализации функции выявления момента и места повреждения изоляции фазы шахтного гибкого экранированного кабеля при условии использования в его структуре обособленного проводника, соединённого через диод и активно-ёмкостную цепь с общей точкой вторичных трехфазных обмоток трансформатора питающей подстанции и адаптации

I.B. Guliaeva /Cand. Sci. (Eng.)/, M.K. Marenich

Donetsk National Technical University (Donetsk)

L.A. Mufel /Cand. Sci. (Eng.)/

State Makeevka Safety in Mines Research Institute (Makeevka)

концептуальных положений петлевого метода к применению в условиях эксплуатации силового рудничного электрооборудования.

Направлением дальнейших исследований является проблематика распространения разработанных технических решений на схемы силовых присоединений функциональных узлов многомашиных рудничных электротехнических комплексов.

Список литературы

1. Методы определения места повреждения кабеля [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://extxe.com/22726/metody-opredelenija-mesta-povrezhdenija-kabelja/>. – Загл с экрана.
2. Определение мест повреждений кабельных линий. Петлевой метод [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://elektromontagnik.ru/?address=labs/lab13/&page=page43>. – Загл с экрана.
3. Демченко О.А. Обоснование мер предотвращения взрывов при эксплуатации гибких силовых кабелей на угольных шахтах: дис. ... канд. техн. наук: 05.26.01 / Демченко Олег Александрович. – Макеевка, 2011. – 194 с.
4. Шахтные кабели. Кабели силовые гибкие теплостойкие экранированные шахтные на напряжение 1,14 кВ КГРЭТШ, КГРЭОТШ. ТУ 16.K180-023-2010 [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://www.kamkabel.ru/landing/>. – Загл с экрана.
5. Краткий справочник по проводам [Электронный ресурс]. – Режим доступа: https://inmanus.3dn.ru/publ/spravochniki/ehl_spravochniki/kratkij_spravochnik_po_provodam/8-1-0-155. – Загл с экрана.
6. Патент на изобретение 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.: ил.

ADAPTATION OF THE LOOP METHOD FOR DETERMINING THE LOCATION OF CABLE DAMAGE TO THE CONDITIONS OF APPLICATION IN THE STRUCTURE OF A MINING ELECTRICAL COMPLEX

Background. The use of flexible cables in mines is due to the need for power supply of non-stationary power electromechanical sheathing. Under these conditions, there is a high probability of mechanical

damage to the cable insulation, which is unacceptable. In this regard, research and development, which relate to the identification of the fact and place of damage to the insulation of a flexible mine cable are relevant.

Materials and/or methods. Based on the specifics of the layout and operation of a mine flexible cable, the possibility of using the general concept of the loop method for determining the location of phase insulation damage has been investigated, provided that the appropriate technical means are adapted to the operating conditions of the power mine electrical equipment and the use of a separate wire in the structure of the protected cable.

Results. Studies have established the fundamental possibility of the circuit implementation of the function of detecting the moment and place of damage to the insulation of the phase of a flexible shielded cable, provided that a separate conductor is used in its structure, connected through a diode and an active-capacitive circuit with a common point of the secondary three-phase windings of the supply substation transformer and adaptation of the conceptual provisions of the loop method for use in operating conditions of power mine electrical equipment.

Conclusion. In the context of the development of research in the field of improving the safety of operation of electrical complexes of technological sections of mines, the possibility of identifying the moment and place of damage to the insulation of the power core of a mine flexible cable by technical means adapted for use as part of power mine electrical equipment is substantiated, provided that a separate conductor is used in the cable structure. Variants of circuit solutions that implement the conceptual provisions of the loop method for determining the location of cable damage are presented.

Keywords: mine electrical equipment, flexible cable, insulation, damage, research, detection, diagram, loop method, adaptation, application, technical proposals.

Сведения об авторах

И.Б. Гуляева

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

Л.А. Муфель

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

М.К. Маренич

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

Статья поступила 18.02.2021 г.

© И.Б. Гуляева, М.К. Маренич, Л.А. Муфель, 2021
Рецензент д.т.н., проф. И.А. Бершадский

Архив номеров
международных научно-технических
и производственных журналов

LIBRARY.RU

Вибрация машин:
измерение, снижение, защита

Металлургические
процессы и оборудование