

УДК 621.316.9

Е. А. ВАРЕНИК (канд.техн.наук), Р. М. ЛАЗЕБНИК (канд.техн.наук)

Український науково-дослідницький, проектно-конструкторський і технологічний інститут взривозахищеного і рудничного електрооборудування з експериментальним виробництвом  
ukrniive@ukrniive.com.ua

## ПОВЫШЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ ФУНКЦИОНИРОВАНИЯ АППАРАТОВ ЗАЩИТЫ ОТ ТОКОВ УТЕЧКИ В ШАХТНЫХ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ СЕТЯХ

*Для повышения эффективности функционирования аппаратов защиты от токов утечек необходимо при выборе параметров срабатывания учитывать меняющиеся во времени в зависимости от состояния окружающей среды величины сопротивления и емкости шахтных электрических сетей.*

*Шахтные сети, защита от токов утечек, выбор уставок, учет изменяющихся сопротивлений и емкостей.*

**Постановка проблемы.** Обеспечение высокого уровня безопасности эксплуатации электрических сетей и электрооборудования угольных шахт требует применения в системах подземного электроснабжения аппаратов защиты от токов утечки. Аппараты (реле) защиты от утечки контролируют сопротивление изоляции шахтных электрических сетей, компенсируют емкостные токи утечки в них и инициируют достаточно быстрое отключение сетей при повреждении изоляции электрооборудования или прикосновения человека к находящимся под напряжением токоведущим частям.

С увеличением сопротивления изоляции токи утечки и опасность поражения людей электрическим током уменьшаются. Однако следует учесть, что емкости шахтных участков электрических сетей достигают значений, при которых токи утечки, и в том числе через человека, прикоснувшегося к фазе сети, определяются именно емкостным, а не активным сопротивлением изоляции, так как емкость большинства шахтных участков электрических сетей изменяется в пределах 0,3–3 мкФ [1, с.5]. В условиях эксплуатации шахтного электрооборудования эффективная (без ложных срабатываний) и стабильная работа аппаратов защиты от утечки определяется правильным учетом величин активного сопротивления изоляции и емкости всех элементов электрической сети. Сложность решения этой проблемы заключается в том, что величины сопротивления и емкости меняются в течение эксплуатации в зависимости от состояния окружающей среды, прежде всего ее температуры и влажности. Поэтому проблема повышения эффективности функционирования аппаратов защиты от утечек путем учета влияния меняющихся параметров сопротивления и емкости на своевременное срабатывание является достаточно актуальной.

**Анализ последних исследований и публикаций.** Вопросы создания и совершенствования аппаратов защиты от токов утечки в шахтных электрических сетях достаточно широко отражены в отечественных научных публикациях, среди которых следует отметить две монографии, вышедшие соответственно в 2003 г. [2] и 2004 г. [3] с участием одного из авторов настоящей статьи. В то же время вопросы динамики изменения таких параметров сети как активное сопротивление и емкость освещены недостаточно, что не позволяет своевременно корректировать уставку аппарата защиты для повышения надежности и эффективности защиты людей от поражения электрическим током.

**Цель статьи.** Обоснование необходимости учета при разработке и эксплуатации аппаратов защиты меняющихся во времени активного сопротивления и емкости сети.

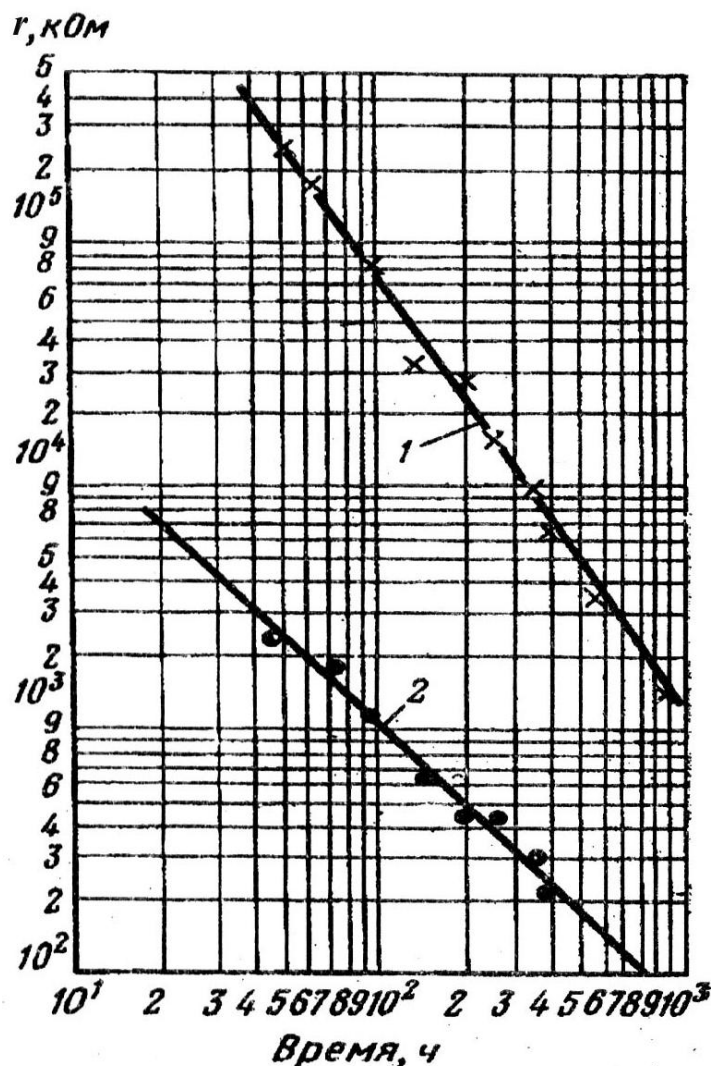
**Результаты исследований.** В условиях эксплуатации на изоляцию электрооборудования из многочисленных факторов наибольшее воздействие оказывают относительная влажность среды  $W$  и температура  $T$  нагрева токоведущих частей. Эти факторы значительно влияют на емкость  $C$ , тангенс угла диэлектрических потерь  $tg \delta$  и особенно на активное сопротивление изоляции  $r$ . Так как температура изоляции и влажность среды являются величинами переменными, то и диэлектрические параметры также изменяются во времени. Колебания величин  $r$  и  $C$  достигают значительных пределов, что может вызвать ложные срабатывания защиты от утечек или же выход параметров аппаратуры защиты от утечек за пределы, не обеспечивающие безопасность. Чтобы избежать этих нежелательных явлений, необходимо прогнозировать пределы изменения величин  $r$ ,  $C$  и  $tg \delta$  в условиях эксплуатации и выбирать параметры защитных средств с учетом этих колебаний.

Основными элементами электрической сети являются трансформаторы, коммутационная аппаратура, кабели и электродвигатели. В этих изделиях применяются разные марки электроизоляционных материалов, параметры которых в зависимости от  $W$  и  $T$  имеют различные абсолютные значения, поэтому их оценку целесообразно производить относительно единицы длины кабелей с учетом видов электрооборудования, определяемых из построения конкретной электрической сети.

© Вареник Е.А., Лазебник Р.М., 2011

При расчете емкости сети кроме кабелей следует учитывать емкость пусковой аппаратуры и электродвигателей. Измерения показывают, что емкость шахтных пускателей в зависимости от влажности и температуры среды изменяются от 500 до 2500 пФ, а электродвигателей серии ВАО – от 800 до 10 000 пФ. Если от одной трансформаторной подстанции будет питаться 10 и более потребителей, то емкость пускателей и двигателей вместе составит 0,1–0,125 мкФ и более, т.е. будет соизмерима с емкостью кабелей, приходящейся на 1 км длины [2, с.23].

Установлено, что сорбированная влага оказывает значительное влияние на изменение активного сопротивления  $r$  и диэлектрической проницаемости  $\varepsilon$  электроизоляционных материалов. Проведенные испытания на готовых изделиях показали, что диэлектрические параметры электрооборудования и его отдельных элементов сильно ухудшаются с увеличением продолжительности увлажнения (рис. 1).



$NN=98\%$  и  $20\text{ }^\circ\text{C}$ :

1 – электродвигатели ВАО; 2 – пускатели

изоляция зависит от геометрических размеров конструкции и поэтому трудно установить общую норму сопротивления для различных изделий. Метод «коэффициент состояния изоляции» является чувствительным к увлажнению изоляции, но для его реализации необходимо сложное устройство, которое бы позволило измерять ток через диэлектрик в период малого времени (0,1 с). Наибольший интерес представляет метод оценки по изменению «постоянной времени». Постоянная времени не зависит от геометрических параметров, и этот метод может характеризовать состояние изоляции. Действительно, сопротивление изоляции  $r$  (Ом) и емкость  $C$  (Ф) изделия пропорциональны соответственно удельному объемному сопротивлению  $\rho_v$  (Ом·м) и относительной диэлектрической проницаемости  $\varepsilon$ , а произведения этих величин не зависят от геометрических размеров:

$$r = \rho_v \frac{l}{\Lambda}; \quad C = \varepsilon_0 \varepsilon \Lambda; \quad \tau = rC = \varepsilon_0 \varepsilon \rho_v l, \quad (2)$$

где  $\Lambda$  – величина, характеризующая геометрические параметры изоляции, м;

$\varepsilon_0 = 8,85 \cdot 10^{-12}$  – электрическая постоянная, Ф/м.

При длительном хранении электрооборудования во влажной среде (на складе или в подземных выработках шахты) может оказаться, что сопротивление изоляции снизилось ниже допустимой по норме величины и включение такого электрооборудования в сеть приведет к пробое изоляции или отключению сети защитой от утечек. Поэтому при длительном хранении электрооборудования необходимо оценивать состояние изоляции расчетным путем или производить измерения диэлектрических параметров, характеризующих надежность.

Проведенный анализ показал, что зависимость сопротивления изоляции  $r$  готовых изделий (пускателей, электродвигателей и др.) от времени увлажнения  $\tau$  описывается степенным законом

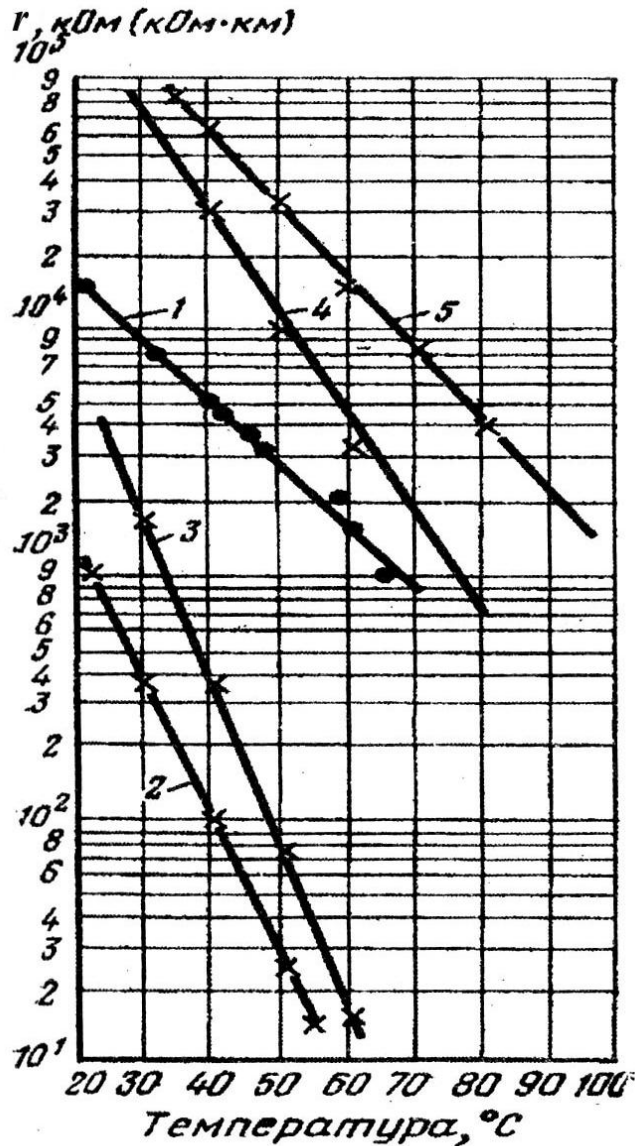
$$r = r_0 (1 + \tau)^{-n}. \quad (1)$$

Значения постоянных коэффициентов  $r_0$  и  $n$  зависят от вида электрооборудования и приведены в [4] для значения  $W = 98\%$  и температуры  $20\text{ }^\circ\text{C}$ .

Для оценки влагопоглощения и влагостойкости изоляции электрооборудования существуют различные методы. Их анализ показывает, что каждому из них присущи те или иные недостатки. Так, для методов «коэффициент абсорбции», «емкость – частота», «емкость – температура» по изменению  $\text{tg } \delta$  и диэлектрической проницаемости характерна низкая чувствительность оценки влагостойкости. Метод констант влажности и метод по изменению величины активного сопротивления является весьма чувствительным, но измеренная величина сопротивления

Произведение  $rC$  дает размерность времени и имеет вполне определенный физический смысл: если схему замещения диэлектрика представить в виде двух параллельных цепей с  $r$  и  $C$ , то разряд конденсатора с таким диэлектриком будет протекать по экспоненциальному закону с постоянной времени  $\tau = rC$ .

Постоянная времени  $\tau$  катушек и изоляторов с сухой изоляцией имеет высокие значения (0,42 и 6,15 с). При увлажнении величина  $\tau$  резко уменьшается и при насыщении изоляции влагой имеет значения соответственно 1,24 и 7,5 мс, т.е. по сравнению с первоначальным значением  $\tau$  уменьшилась почти на три порядка. Значение  $\tau$  пускателей и электродвигателей колеблется в широком диапазоне. У пускателей величина  $\tau$  сильно зависит от сопротивления изоляции и колеблется в пределах от 0,12 до  $2 \cdot 10^{-5}$  с. У электродвигателей сопротивление изоляции имеет высокое значение и  $\tau$  поэтому колеблется незначительно – от 16 до 0,13 с [2, с.24].



требования от температуры: 1 – пускатель;  
2 – кабель ГВШЭ; 3 – кабель ЭВТ; 4 – кабель  
ГРШЭП; 5 – кабель СБ

является влагостойким материалом, при равновесном увлажнении отношение  $\rho_v / \rho_\alpha$  равно 1,1·10<sup>3</sup>, а для гигроскопического материала К-78-51 при тех же условиях  $\rho_v / \rho_\alpha = 1$ . Поскольку большинство электроизоляционных материалов, применяемых в рудничном электрооборудовании, являются неоднородными и полярными диэлектриками, и поэтому удельное сопротивление постоянному току  $\rho_v$  на несколько порядков превышает удельное сопротивление переменному току  $\rho_\alpha$ , то метод оценки влагостойкости изоляции по отношению  $\rho_v / \rho_\alpha$  является более точным по сравнению с методом оценки «по изменению постоянной времени  $\tau = rC$ », который может давать высокую точность лишь для однородной изоляции.

Таким образом, независимо от геометрических размеров изделий просматривается общая закономерность – постоянная времени резко снижается с уменьшением сопротивления изоляции. По абсолютному значению величины трудно судить о критическом снижении сопротивления изоляции, при котором возможен пробой изоляции или начнут проявляться необратимые электрохимические процессы, так как еще мало накоплено экспериментального материала, и поэтому не представляется возможности установить корреляционную связь между  $\tau$  и электрической прочностью изоляции. В связи с этим наибольший интерес представляет способ определения удельного объемного сопротивления изоляции изделия по измеренным  $r$  и  $C$ .

Определив  $\rho_v$  из (2) и сравнив с исходными данными  $\rho_{v0}$  по справочной литературе [4], можно установить из соотношения  $\rho^0 = \rho_v / \rho_{v0}$  насколько изменилась эта величина при увлажнении. В качестве критерия следует принимать минимально допустимую величину  $\rho_v$  или допустимую кратность отношения  $\rho^0 = \rho_v / \rho_{v0}$ .

Для обоснования минимально допустимой величины  $\rho_v$  необходимо установить корреляционную зависимость между электрической прочностью  $E$  и  $\rho_v$  для влажных материалов. В электроизоляционных конструкциях влажность изоляции по условиям сохранения электрической прочности не должна превышать 2%. Тогда для исследуемых материалов отношение величин  $\rho_v / \rho_{v0}$  не должно превышать  $1 \cdot 10^{-2} - 5 \cdot 10^{-3}$ .

С повышением влажности изоляции отношение величин  $\rho_v / \rho_\alpha$  резко снижается и может характеризовать влагостойкость изоляции. Действительно, для эпоксидной смолы, которая

Температура, как известно, также сильно влияет на диэлектрические свойства изоляции. Сопротивление изоляции кабелей и пускателя при повышении температуры от 20 до 60–80 °С снижается на 2–3 порядка и изменяется по экспоненциальному закону  $r = ae^{-bt}$  (рис.2). Емкость кабелей с полихлорвиниловой изоляцией, как показывают расчеты (табл.1), возрастает в среднем на 48 % при повышении температуры от 20 °С до длительно допустимой температуры (65 °С).

Если же изоляция увлажнена и электрооборудование ставится под нагрузку, то в этом случае сопротивление изоляции изменяется по достаточно сложному закону и дополнительно может снизиться на 1–2 порядка при быстром возрастании температуры (10–30 мин) до длительно допустимого значения. При продолжительном нагревании током нагрузки изоляция сушится и сопротивление изоляции начинает возрастать.

Таблица 1 – Возрастание емкости фазы при увеличении температуры

Сечение основных жил, мм	Емкость фазы (мкФ/км) при температуре, °С	
	20	65
3 x 16	0,626	0,93
3 x 25	0,705	1,05
3 x 50	0,82	1,22
3 x 70	0,93	1,38

#### Выводы.

1. Величины активного сопротивления и емкости элементов шахтных систем электроснабжения меняются в течение эксплуатации в зависимости от температуры и влажности.

2. Оценку изменений параметров изоляции и емкости кабелей целесообразно проводить в удельных показателях на единицу длины кабеля.

3. Получены зависимости сопротивления изоляции от продолжительности увлажнения и изменения температуры, а также зависимости удельной емкости от температуры.

4. Расчеты показывают, что при нормальных условиях работы электрооборудования сопротивление и емкость сетей могут колебаться в значительных пределах в зависимости от температуры и влажности среды. Колебания  $r$  и  $C$  следует учитывать при выборе параметров срабатывания аппаратуры защиты от утечек, что позволит повысить стабильность ее работы и в полной мере обеспечить электробезопасность при эксплуатации сетей.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Дзюбан В.С. Аппараты защиты от токов утечки в шахтных электрических сетях / Виталий Серафимович Дзюбан. – М.: Недра, 1982. – 152 с.

2. Шкрабец Ф.П. Анализ параметров и процессов в шахтных электрических сетях / [Ф.П. Шкрабец, Н.А. Шидловская, В.С. Дзюбан, Е.А. Вареник] – Днепропетровск: Национальный горный университет, 2003. – 151 с.

3. Вареник С.О. Забезпечення безпеки та ефективності шахтних електроустановок / [С.О. Вареник, С.І. Випанасенко, Н.А. Шидловська, Ф.П. Шкрабець] – Дніпропетровськ: Національний гірничий університет, 2004. – 334 с.

4. Соболев В.Г. Электрическая изоляция рудничного электрооборудования / Василий Георгиевич Соболев. – М.: Недра, 1982. – 125 с.

Надійшла до редколегії 11.03.2011

Рецензент: О.П. Ковальов

С.О. ВАРЕНИК, Р.М. ЛАЗЕБНИК

Український науково-дослідний, проектно-конструкторський і технологічний інститут вибухозахисного і рудникового електрообладнання з дослідно-експериментальним виробництвом

E. VARENIK, R. LAZEBNIK

Ukrainian Scientific-Research Designing and Technological Institute of Explosion-Proof and Mining Electrical Equipment with Experimental Production

**Підвищення ефективності функціонування апаратів захисту від струмів витоку у шахтних електричних мережах.** Для підвищення ефективності функціонування апаратів захисту від струмів витоку необхідно при виборі параметрів спрацьовування враховувати змінні за часом в залежності від становища зовнішнього середовища величини опору та ємності шахтних електричних мереж.

**Шахтні мережі, захист від струмів витоків, вибір уставок, врахування опорів і ємностей, що змінюються.**

**Improving the Efficiency of the Protection Devices Against Leakage Currents in the Mine Electric Networks.** To increase efficiency of functioning of the protection devices against leakage currents is necessary, choosing the parameters of their operation, to take into account resistances and capacities of mine electric networks, which change over time depending on the state of environment.

**Mine network, protection from leakage currents, the choice of settings, take into account changing resistance and capacitance.**