

А.В.БЕСПРОЗВАННЫХ, канд. техн. наук, НТУ "ХПИ", Харьков

ТЕРМО-ТРИБО-ЭЛЕКТРИЧЕСКИЙ ПОТЕНЦИАЛ ДЛЯ ОЦЕНКИ СТАРЕНИЯ ПОЛИМЕРНОЙ ИЗОЛЯЦИИ КАБЕЛЕЙ

Після охолодження кабелів з полімерної ізоляцією, наприклад, при виводі енергоблоків на планово-профілактичні роботи, на жилах з'являється напруга. Вона обумовлена електризацією внаслідок тертя ізоляції жил одна об одну – термо-трибо-електричний ефект. Встановлено, що потенціал, який виникає при цьому, різний для нових та зістарених кабелів. Він пов'язаний зі старінням ізоляції і зростає з окисленням її поверхні.

После охлаждения кабелей с полимерной изоляцией (например, при выводе энергоблоков на планово профилактические работы) на жилах появляется напряжение. Она обусловлена электризацией в результате трения изоляции жил друг о друга – термо-трибо-электрический эффект. Установлено, что потенциал, которой возникает при этом, разный для новых и старых кабелей. Он связан со старением изоляции и растет с окислением их поверхности.

Введение. Трибоэлектричество (от греч. *tribos* — трение) - явление возникновения электрических зарядов при трении. Наблюдается при взаимном трении двух *диэлектриков, полупроводников* или *металлов* различного химического состава или одинакового состава, но разной плотности; при трении металлов о диэлектрики; при трении двух одинаковых диэлектриков; при трении жидких диэлектриков друг о друга или о поверхность твердых тел и др. При этом электризуются оба тела: их заряды одинаковы по величине и противоположны по знаку. Трибоэлектричество характеризуется рядом закономерностей. При трении двух химически одинаковых тел положительные заряды получает более плотное из них. Металлы при трении о диэлектрик электризуются как положительно, так и отрицательно. При трении двух диэлектриков положительно заряжается диэлектрик с большей диэлектрической проницаемостью ϵ .

Тела располагают в трибоэлектрические ряды, в которых предыдущее тело электризуется положительно, а последующее – отрицательно [ряд Фарадея: (+) мех, фланель, слоновая кость, перья, горный хрусталь, флинтглас, бумажная ткань, шелк, дерево, металлы, сера (-)]. Для диэлектриков, расположенных в трибоэлектрический ряд, наблюдается

убывание. Для металлов же характерно возрастание твердости.

При контакте металла с диэлектриком трибоэлектричество возникает за счет перехода электронов из металла в диэлектрик и перехода ионов того или иного знака из диэлектрика на поверхность металла. При трении двух диэлектриков этот эффект обусловлен диффузией электронов и ионов. *Существенную роль может играть также разное нагревание тел при трении, что вызывает переход носителей тока с локальных неоднородностей более нагретой поверхности ("истинное" трибоэлектричество).*

Трибоэлектричество приводит к нежелательному накоплению электрических зарядов в диэлектриках, например в синтетической ткани, в бумаге (при ксерокопировании, в полиграфии), при намотке конденсаторных секций с полимерными пленками, при экструдировании изоляции кабелей. Его устраняют заземлением металлических деталей, ионизацией воздуха, применением электрических разрядников, увеличением проводимости диэлектриков. Так, при ошланговании кабелей защитными полимерными оболочками на основе полиэтилена в последний добавляют сажу, поэтому возникающий трибозаряд в этом случае меньше.

Трибоэффект в кабелях обусловлен в основном контактной электризацией. Считается, что инжектированные в полимер электроны захватываются глубокими локальными состояниями (ловушками), лежащими вблизи уровня Ферми металла (~ 4 эВ). Такие ловушки обусловлены дефектами в структуре полимера, например примесями, а окисдование поверхности полимера существенно увеличивает трибозаряд. Чем выше разница работ выхода (табл. 1) – $W_{\text{вых}}$ или контактная разность потенциалов (КРП) материалов – $U_{\text{к}}$, тем больше поверхностная плотность заряда σ (при наличии воздушной прослойки между изолированными жилами):

$$W_{\text{рвых}} = e \cdot (\varphi_{\text{в-ва}} - \varphi_{\text{вакуум}}) - E_F, \text{ эВ} \quad (1)$$

$$U_{\text{к}} = W_1 - W_2, \quad (2)$$

$$\sigma = e \cdot N_F \cdot (\varphi_{\text{в-ва}} - \varphi_{\text{вакуум}}) = \epsilon_0 \cdot E, \quad (3)$$

где $e = 1,6 \cdot 10^{-19}$ Кл – заряд электрона, $\varphi_{\text{в-ва}}$, $\varphi_{\text{вакуум}}$ – электростатические потенциалы в толще вещества и вакууме соответственно, E_F – энергия Ферми; $\epsilon_0 = 8,85 \cdot 10^{-12}$ Ф/м – электрическая постоянная, E – напряженность электростатического поля.

Контактная разность потенциалов зависит от состояния (загрязненности) поверхности: в металле это окислы, сульфаты, на поверхности изоляции – различные масляные пленки, грязь, пыль, попавшие в

процессе изготовления кабеля, так и низкомолекулярные продукты (НМП), образовавшиеся в процессе старения изоляции кабеля под действием внешних факторов. Причем, *чем выше загрязненность поверхности, тем меньше трибозаряд. Присутствие воды, влажность резко снижают заряд, в том числе за счет его "иунтирования"* (для воды $\rho_v \sim 10^5 \dots 10^6 \text{ Ом}\cdot\text{м}$) [6].

Трибоэффект свойственен паре материалов, стоящих рядом в трибоэлектрическом ряду, например, алюминий – бумага (целлюлоза) (рис. 1). Высокими трибоэлектрическими свойствами по отношению к металлам обладает политетрафторэтилен (ПТФЭ). Полиэтилентерефталатная (лавсановая) пленка, которая используется в качестве скрепляющей обмотки в кабелях, имеет на порядок большую плотность поверхностных ловушек ($\sim 10^{15} \text{ эВ}^{-1}\text{м}^{-2}$) по сравнению с полиэтиленом.

Таблица 1 – Работа выхода некоторых поликристаллических металлов, полупроводников и диэлектриков

| Поликристаллические металлы, полупроводники и диэлектрики | Работа выхода $W_{\text{рвых.}}$, эВ |
|---|---------------------------------------|
| Литий | 2,38 |
| Калий | 2,22 |
| Цезий | 1,81 |
| Никель | 4,50 |
| Железо | 4,31 |
| Хром | 4,58 |
| Марганец | 3,83 |
| Медь | 4,40 |
| Алюминий | 4,3 |
| Оксисленный алюминий | 5,3 |
| Золото | 4,3 |
| Серебро | 4,3 |
| Германий | 4,76 |
| Кремний | 4,8 |
| Полиамид | 4,3 |
| Поливинилхлорид | 4,85 |
| Полиэтилентерефталат | 4,23 |
| Политетрафторэтилен | 4,22 |

Максимальная плотность поверхностного заряда, образующегося на поверхности контактирующих поверхностей изолированных жил

кабеля, ограничена величиной, достаточной для электрического поверхностного перекрытия: $E_{пр} \approx 3 \text{ кВ/мм}$:

$$\sigma_{пр} = \epsilon_0 \cdot E_{пр} = 27 \cdot 10^{-9} \text{ Кл/м}^2 = 2,7 \text{ нКл/м}^2,$$

т.е. на одном погонном метре длины контактирующих поверхностей линейная плотность составляет 2,7 нКл/м.

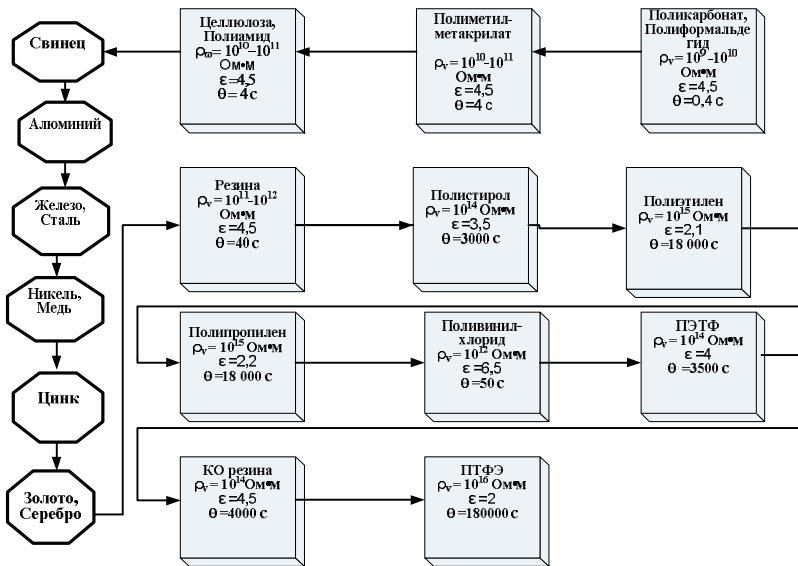


Рис. 1 – Трибоэлектрический ряд для изоляционных материалов и металлов.

Для диэлектриков приведены значения удельного объемного сопротивления, относительной диэлектрической проницаемости и постоянной времени:

$$\theta = \epsilon_0 \cdot \epsilon \cdot \rho_v$$

В кабелях трибоэффект присутствует всегда, т.к. есть возможность свободного перемещения конструктивных элементов кабеля друг относительно друга. Свойства материалов элементов – разные: медные и алюминиевые токопроводящие жилы, полиэтиленовая изоляция, полиэтилентерефталатная (лавсановая) и полиимидная скрепляющие ленты, медные и алюмополимерные экраны и т.д. Так, для телефонных кабелей связи наличие трибоэлектрического ряда приводит к дополни-

тельными шумам (помехам). Поэтому применение лавсановой скрепляющей ленты в них следует исключить. Для специальных же кабелей с выраженным трибоэффектом контакт полиэтиленовой изоляции и лавсановой пленки необходим для получения большего сигнала. Такие кабели используются в качестве чувствительного элемента технических средств охраны, устройств контроля и регистрации механических воздействий [7,8].

Старение изоляции кабелей начинается с изменения ее поверхностных свойств: она окисляется, на ней накапливаются НМП. Поэтому логично предположить о возможности изменения трибо-электрического потенциала в ходе окисления (старения) полимерной изоляции.

Цель статьи – выявление признаков старения изоляции кабелей по термо-трибо-электрическому потенциалу.

Термо-трибо-электрический потенциал новых и состаренных кабелей с полимерной изоляцией. Для возбуждения трибо-электрического потенциала в кабелях избран метод релаксации термомеханических напряжений. Жилы кабелей и полимерная изоляция имеют различные коэффициенты теплового линейного расширения (ТКЛР). Так, для меди ТКЛР составляет от 2 до 50, а для полиэтилена – от 60 до $120 \cdot 10^{-6}$ 1/град в зависимости от температуры. В результате при изменении температуры в кабелях возникают термомеханические напряжения. Их следствием являются проскальзывания изолированных жил друг относительно друга, из-за чего на жилах возникает термо-трибо-электрический потенциал.

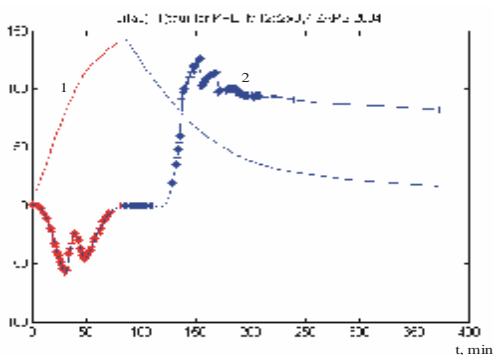


Рис. 2. Кривые трибоэлектрического потенциала напряжения при нагреве и охлаждении кабеля КПЭТИ.

нуля. При охлаждении до 50°С потенциал на жилах достигает 100 В.

На рис.2 приведены кривые трибо-электрического потенциала кабеля с полиэтиленовой изоляцией жил и полиэтиленовой защитной оболочкой. При нагревании кабеля до 80 °С (кривая нагрева 1) на жилах появился потенциал около -50 В (кривая 2). В нагретом кабеле трибо-электрические заряды рассеиваются и потенциал снижается до

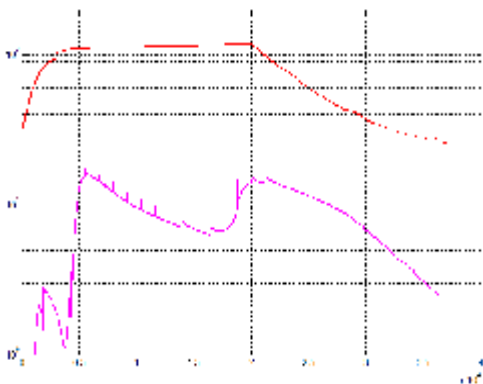


Рис.3. Кривая температуры (верхняя, в °С) и трибоэлектрического потенциала (нижняя линия, в В) для одной из пар" две жилы вместе – против экрана пары" нового кабеля КПЭТИ-12х2х0,7/ОП РАЭС-2007.

Измерение трибопотенциала выполнено вольтметром-электронметром В7-57/1, входное сопротивление которого свыше 1000 ГОм. Снижение трибопотенциала в ходе охлаждения образца связано не с влиянием вольтметра, а с токами утечки образца за счет поверхностной проводимости.

На рис. 4 приведены кривые температуры и трибопотенциала

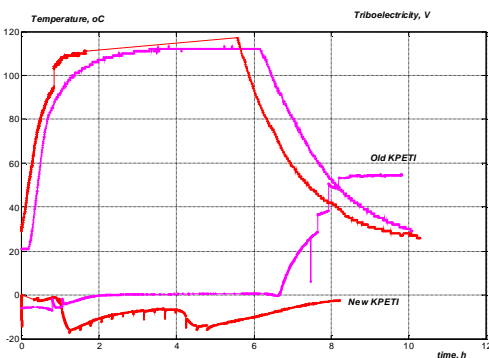


Рис.4. Сравнение кривых трибоэлектрического потенциала для нового (New) и старого (Old) кабелей КПЭТИ; кривые нагрева – в левой верхней части рисунка.

На рис. 3 приведены кривые температуры и трибо-электрического потенциала в образце нового кабеля с изоляцией жил из радиационно-сшитого полиэтилена. Каждые две жилы кабеля скручены вместе и обмотаны полиимидной лентой. Проскальзывание пары жил с полиэтиленовой изоляцией относительно полиимидной обмотки приводит к появлению трибопотенциала величиной до 100 В.

двух образцов кабеля: нового и состаренного. Величина потенциала состаренного кабеля оказалась выше, чем нового. Это может быть связано с окислением поверхности изоляции состаренного кабеля, из-за чего трибоэлектрический заряд увеличивается.

Сушка кабеля привела к тому, что трибозаряд перестал рассасываться после

остывания кабеля (рис. 5, 6) и продержался в неизменном виде почти пять суток (рис. 7).

Для исключения влияния паров воды, которые адсорбируются

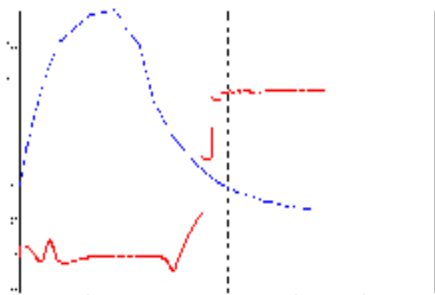


Рис.5. Кривая трибо-электрического потенциала промежутка "две жилы в паре вместе – против экрана пары" в процессе нагрева и охлаждения старого (Old) кабеля КПЭТИ-12х2х0,7 после дополнительного ускоренного теплового старения при 150 °С в течение 10 час.

поверхностью изоляции многожильных кабелей (в основном, в местах соприкосновения изолированных жил – в микрокапиллярах, образованных зоной контакта) образец состаренного кабеля подвергся длительному воздействию повышенной температуры – 150 °С в течение 10 час. После этого цикл нагрева до 140 °С и охлаждения вместе с термостатом до комнатной температуры.

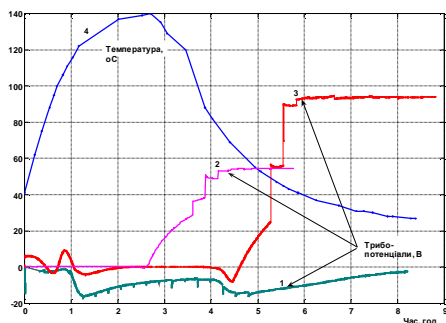


Рис.6. Кривые термо-трибо-электрического потенциала в новом (1), старом (2) и дополнительно состаренном (3) кабелях КПЭТИ. Кривая 4 – температура кабеля.

Снижение потенциала

началось только на шестые сутки со дня термоактивации. Вероятной причиной снижения трибоэлектрического потенциала на шестые сутки могло быть повышение влажности в комнате из-за изменившихся погодных условий.

Несмотря на очевидную связь трибоэлектрического потенциала с влажностью атмосферного воздуха, это явление представляется перспективным для наблюдением за изменением

состояния поверхности изоляции жил кабелей гермозоны АЭС. При работе энергоблока температура в гермозоне достигает 60 °С, а относительная влажность – почти 98%. При переходе в режим планово-профилактических работ (обычно один раз в течение года) энерго-

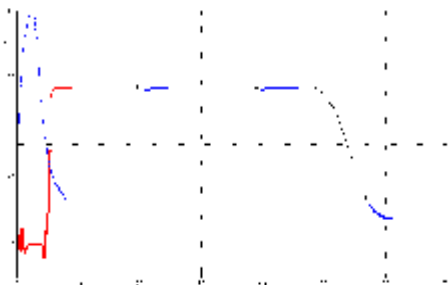


Рис.7. Длительное наблюдение за трибо-электрическим потенциалом витой пары кабеля КПЭТИ после нагрева до 150 °С.

блок расхолаживается. В течение суток температура в гермозоне уменьшается до 22 – 25 °С, что дает возможность обслуживающему персоналу начинать проводить регламентные работы в гермозоне. В этот период контролируемый кабель может быть отсоединен от нагрузки и переведен в режим холостого хода либо короткого замыкания (в зависимости от режима проверки – сопротивления изоляции или омические сопротивления жилы и экранов). В контрольных кабелях типа КПЭТИ есть возможность выполнить подогрев одной пары жил, пропуская по ним ток величиной всего 1-2 А. При диаметре жил кабеля 0,7 мм плотность тока составит 2,5 – 5 А/мм², что вполне достаточно для прогрева выделенной пары до температуры 60 – 90 °С в течение около 1 часа. В процессе нагрева и последующего охлаждения выполняют измерение потенциала соседней пары кабеля, которая находится в режиме холостого хода.

Выводы. Таким образом, термо-трибо-электрический потенциал выше для состаренных кабелей. Он может быть мерой состаренности поверхности изоляции из сшитого полиэтилена.

Необходимым условием наблюдения термо-трибо-электрического потенциала есть высокое сопротивление изоляции кабеля – не менее 10 – 100 ТОм на погонный метр длины. Такое сопротивление имеют контрольные кабели с изоляцией из сшитого полиэтилена – КПЭТИ, КПЭТИнг, СПоВР, КПоСГ. Другим условием является использование вольтметров-электрометров с входным сопротивлением не менее 1000 ТОм.

Свойство термо-трибо-электрического потенциала сохраняется сутками, без снижения уровня, что указывает на его возможную электретную природу. Заряды, образовавшиеся в результате электризации поверхности изоляции, задерживаются на ловушках в приповерхностных слоях, и могут там удерживаться долго, без заметного снижения плотности.

При электрической емкости пар кабеля порядка 100 пФ/м и термо-трибо-электрическом потенциале 100 В для состаренных кабелей

линейная плотность заряда составляет 10 нКл/м, т.е. в 3 раза выше максимальной линейной плотности $\sigma_{\text{пр}}=2,7$ нКл/м. Возникающие при этом разряды можно дополнительно регистрировать с помощью техники измерения частичных разрядов или электронной акустической эмиссии.

Список литературы: 1. Тареев Б.М. Физика диэлектрических материалов/ Тареев Б.М. – М: Энергия, 1973. – 328 с. 2. Казарновский Д.М. Испытание электроизоляционных материалов и изделий: учебн. (для техникумов) / Д.М. Казарновский, Б.М. Тареев. – Л.: Энергия. Ленингр. отд-ние, 1980. – 216 с. 3. Финкель Э.Э. Особенности эксплуатации электроизоляционных и кабельных изделий на атомных электростанциях и специфика определения их надежности / Э.Э. Финкель. – М.: Информэлектро, 1985. – 56 с. 4. Техніка і електрофізика високих напруг / Бржезицький В. О., Ісакова А. В., Рудаков В. В. та ін.; за ред. В. О. Бржезицького та В. М. Михайлова. – Харків: НТУ "ХПІ", Торнадо, 2005. – 930 с. 5. Борисова М.Э. Изучение процессов накопления и релаксации заряда в статических композициях полиимида / М.Э. Борисова, О.В. Галюков, П.В. Цацынкин и др. // Электричество. – 2007. – №6. – С. 57-62. 6. Луццейкин Г.А. Методы исследования электрических свойств полимеров / Луццейкин Г.А. – М.: Химия, 1988. – 160 с. 7. Wasem J.V. et al. Transient current generation during wear of high density polyethylene by a stainless steel stylus // Surface Dynamics Lab., Washington SU, Pullman, WA 99164-2814. 8. Оленин Ю.А. Исследование виброчувствительных элементов на основе трибоэлектрических кабелей / Ю.А. Оленин // Современные охранные технологии и средства обеспечения комплексной безопасности объектов. – Пенза, 2004. – С. 175-179.

Надійшла в редколегію 9.07.2009