

## КОНТАКТНАЯ РАЗНОСТЬ ПОТЕНЦИАЛОВ – КАК ПОКАЗАТЕЛЬ СТЕПЕНИ СТАРЕНИЯ ПОЛИМЕРНОЙ ИЗОЛЯЦИИ СИЛОВЫХ КАБЕЛЕЙ

*Показана динаміка зміни контактної різниці потенціалів силових кабелів зі зшитю поліетиленовою ізоляцією в початковому стані та після додаткового терморадіаційного старіння. Запропоновано проводити заземлення металевих елементів кабелю перед початком вимірювань для зменшення ступеню впливу поверхневих зарядів. Експериментально встановлено, що контактна різниця потенціалів є чутливим показником до процесів старіння (окислення) полімерної ізоляції.*

*Показана динамика изменения контактной разности потенциалов силовых кабелей со сшитой полиэтиленовой изоляцией в исходном состоянии и после дополнительного терморадикационного старения. Предложено проводить заземление металлических элементов кабеля перед измерениями для уменьшения степени влияния поверхностных зарядов. Экспериментально установлено, что контактная разность потенциалов является чувствительным показателем к процессам старения (окисления) полимерной изоляции.*

### ВВЕДЕНИЕ

В полимерной изоляции наблюдаются медленные процессы, связанные, в частности, с трибоэлектризацией и генерацией трибопотенциала.

Трибоэлектрические эффекты влияют на диффузию продуктов деструкции полимеров, структурно-фазовые превращения.

Трение с молекулярной точки зрения – это процесс, заключающийся в преодолении адгезионных связей, возникающих при фактическом контакте двух поверхностей, и объемном деформировании неровностями истирающей поверхности тонкого поверхностного слоя истираемой, например, полимерной поверхности [1].

Взаимодействие твердых тел при физических и электрических процессах, развивающихся в зоне трения, можно оценить только с учетом микрогеометрии контактирующих поверхностей. Вследствие шероховатости и волнистости поверхностей твердых тел трение возникает лишь на отдельных участках касания (фрикционных контактах). Фактическая площадь контакта – это площадь, на которой осуществляется контакт микронеровностей, образующих шероховатость поверхностей. Ее величина составляет 0,01-0,1 % от номинальной площади. Размеры неровностей обычно не превышают 3-50 мкм. Фактическое давление на контактах весьма велико, а это приводит к пластической деформации выступов и к "пропахиванию" неровностями поверхностного слоя контактирующих материалов.

Конструктивной и технологической особенностью силовых, радиочастотных коаксиальных кабелей на основе витых пар является плотное наложение полимерной изоляции на токопроводящую жилу. Такое исполнение обеспечивает отсутствие воздушных включений между жилой и изоляцией, что особенно важно для силовых кабелей; более жесткую конструкцию, а значит и стабильность электрических параметров передачи информационных кабелей. Наличие постоянного контакта (трения) токопроводящих жил относительно полимерной изоляции по всей длине кабеля приводит к накоплению и переносу (стеканию) свободных трибозарядов, т.е. наблюдается процесс статической электризации.

### ПОСТАНОВКА ПРОБЛЕМЫ

Любая трибосистема в неподвижном состоянии практически равновесна, т.е. материал трибопары сохраняет своё состояние без значительных изменений продолжительное время. Обмен трибозарядами и их переходы происходят в динамическом равновесии, поэтому процессы деструкции протекают весьма медленно. При электрических, тепловых и механических воздействиях в поверхностном слое процесс выхода зарядов протекает интенсивно, так как постоянно разрушается точечное электрическое контактное взаимодействие и равновесие, исключающее равновесный обмен зарядами между контактирующими материалами. Заряды из объёма материала с меньшей работой выхода переходят на поверхность материала с большей работой выхода [2]. На границах раздела контактирующих поверхностей возникает скачок потенциала – контактная разность потенциала, образование двойного электрического слоя и, как результат, появление дополнительной емкости  $\Delta C$  и диэлектрических потерь [2-5]. Величина контактной разности потенциалов и дополнительной емкости зависят от трибологических свойств контактирующих материалов. Так, полиэтиленовая изоляция обладает высокими трибоэлектрическими свойствами (неполярный высококачественный диэлектрик), поливинилхлоридная изоляция (полярный диэлектрик, электрические свойства которого хуже по сравнению с полиэтиленом) – менее выраженными.

Процесс старения полимерной изоляции начинается, прежде всего, с изменения состояния ее поверхности в силу окисления, т.е. наблюдается изменение шероховатости. Размеры неровностей увеличиваются. Очевидно, что контактная разность потенциалов должна изменяться в процессе старения изоляции. Вместе с тем, и диэлектрические параметры (емкость и тангенс угла диэлектрических потерь) также должны изменяться [6, 7].

*Цель статьи – на основе динамики изменений в процессе ускоренного терморадикационного старения образцов силовых кабелей показать возможности контактной разности потенциалов в качестве показателя степени старения полимерной изоляции.*

## ФАКТОРЫ, ВЛИЯЮЩИЕ НА СКОРОСТЬ СТЕКАНИЯ ПОВЕРХНОСТНЫХ ЗАРЯДОВ

Стекание поверхностных зарядов – процесс непрерывный и определяется электропроводностью диэлектрика и эмиссией заряда с поверхности в свободное пространство кабеля. Считается, что значения  $\rho_V = 10^{10}$  Ом·м и  $\rho_S = 10^{12}$  Ом являются граничными, выше которых материал статически электризуется, а ниже – не электризуется. Это соответствует значениям постоянной времени  $\tau$  около 1 с, т.е. заряд, возникший на поверхности полимера, за одну секунду снижается в 2,7 раза, а за 2 секунды – примерно в 10 раз. Если  $\rho_V \leq 10^4$  Ом·м – вещество практически не электризуется [для полиэтиленовой изоляции  $\rho_V = 10^{15}$  Ом·м, для поливинилхлоридной (ПВХ) изоляции –  $\rho_V = (10^{11} - 10^{12})$  Ом·м]. Так как полимерная изоляция имеет дефекты, связанные как с наличием примесей, так и с неоднородностью структуры, то это обуславливает возможность стекания статического заряда за счёт объемной проводимости.

Скорость стекания зарядов, таким образом, определяется удельным объёмным  $\rho_V$  и удельным поверхностным  $\rho_S$  сопротивлением полимерной изоляции. Поверхностная проводимость (обратная поверхностному сопротивлению) зависит от химического состава, содержания примесей, низкомолекулярных продуктов, в том числе и влаги, характера и состояния поверхности: гладкой в исходном состоянии и шероховатой (окисленной) после старения. Поверхностные свободные заряды полимерной изоляции в значительной степени определяют способность к нейтрализации трибозарядов.

Изменение во времени  $t$  поверхностной плотности заряда  $\sigma(t)$  и скорость стекания – постоянная времени ( $\tau$ ), характеризующая время уменьшения заряда в 2,7 раз, определяются как

$$\sigma(t) = \sigma_0 \exp\left(-\frac{t}{RC}\right),$$

$$\tau = RC,$$

$$R = \frac{R_V R_S}{R_V + R_S}; \quad C = \frac{C_1 + \Delta C}{C_1 \cdot \Delta C},$$

где  $\sigma_0$  – максимальное значение поверхностной плотности заряда (для полимерных диэлектриков поверхностная плотность заряда находится в диапазоне от 500 пКл/м<sup>2</sup> до 300 нКл/м<sup>2</sup>;  $R$  – сопротивление изоляции, Ом·м, определяемое полным объёмным  $R_V$  и полным поверхностным сопротивлением  $R_S$ ;  $C$  – погонная ёмкость кабеля – между жилой и металлическим экраном, Ф/м;  $C_1$  – геометрическая и  $\Delta C$  – дополнительная ёмкость, обусловленная процессом трибоэлектризации.

Таким образом, постоянная времени зависит от диэлектрических свойств самой изоляции ( $\rho_V$ ,  $\rho_S$ , относительной диэлектрической проницаемости материала изоляции  $\epsilon$ ), трибологических свойств и состояния ее поверхности, а также свойств контактирующего с изоляцией элемента.

Значения поверхностного электростатического заряда быстро снижаются, если  $t > \tau$ , и медленно изменяются во времени, если  $t < \tau$ .

На рис. 1 приведены результаты измерения сопротивления изоляции в зависимости от приложенного постоянного напряжения образца одножильного силового кабеля с вулканизированной полиэтиленовой изоляцией в исходном состоянии (до старения). Кривая 1 соответствует измерениям, выполненным без предварительного стекания заряда, кривые 2, 3 и 4 – со стеканием при разных временах выдержки образца: кривые 2 и 3 – с интервалом в 80 мин каждая, кривая 4 – в течение 10 дней при заземленной жиле и металлического экрана.

В первом случае (кривая 1) наблюдается "кажущееся" увеличение сопротивления изоляции с ростом приложенного напряжения, что связано с влиянием поверхностного заряда. При продолжительном стекании заряда (кривая 4) влияние поверхностных свободных зарядов уменьшено: зависимость сопротивления изоляции с ростом приложенного напряжения имеет падающий характер. Это подтверждается также результатами измерений контактной разности потенциалов (рис. 2) до стекания (кривая 1) и после стекания (кривая 2) зарядов в образце кабеля.

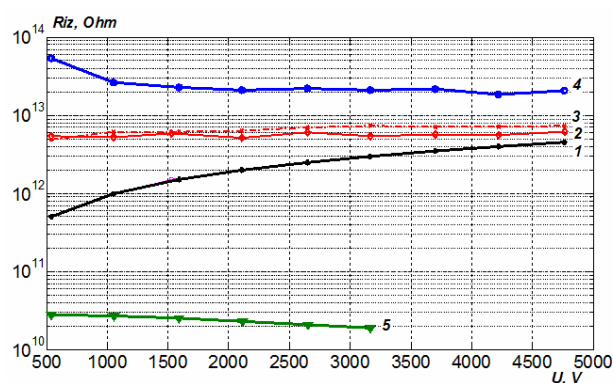


Рис. 1

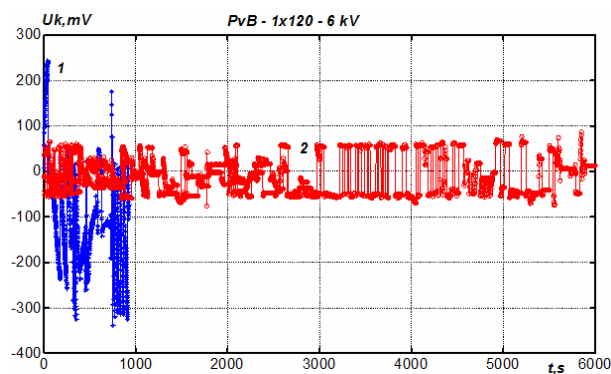


Рис. 2

Для поливинилхлоридной изоляции без предварительного стекания зарядов зависимость сопротивления изоляции от величины приложенного напряжения носит падающий характер (рис. 1, кривая 3).

Таким образом, влияние поверхностных зарядов, обусловленных электропроводностью полимерной изоляции, на результаты измерений контактной разности потенциалов можно уменьшить. Для этого перед измерением необходимо провести разрядку кабеля (заземлить жилы и металлическую оболочку) на время  $t$  большее, чем постоянная времени  $\tau$ .

## ДИНАМИКА ИЗМЕНЕНИЙ КОНТАКТНОЙ РАЗНОСТИ ПОТЕНЦИАЛОВ В ПРОЦЕССЕ СТАРЕНИЯ

На рис. 3 показано изменение контактной разности потенциалов в исходном состоянии (кривая 1) и после ускоренного терморрадиационного старения (кривая 2) образца одножильного силового кабеля сечением  $240 \text{ мм}^2$  с полупроводящими экранами по жиле и изоляции со сшитой полиэтиленовой изоляцией на напряжение 6 кВ.

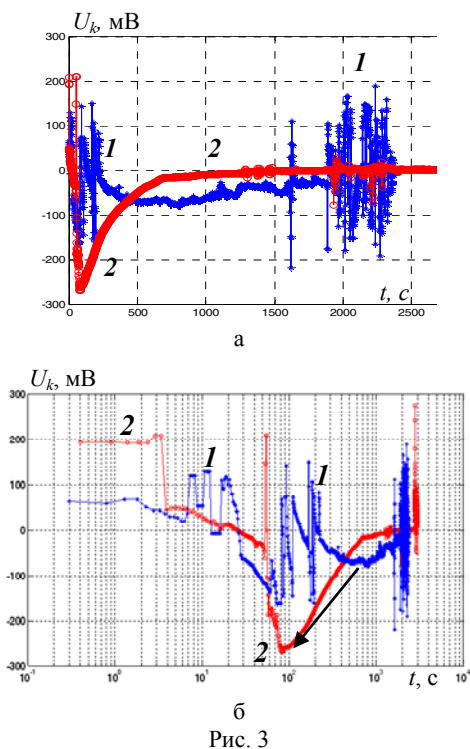


Рис. 3

Сравнение кривых 1 и 2 (рис. 3,а и рис. 3,б) показывает, что после старения наблюдается значимое увеличение (в три раза) максимального значения  $U_k$  и смещение момента достижения максимума в сторону меньших времен (направление изменения показано стрелкой на рис. 3,б). Причем, в области больших времен наблюдения (рис. 3,а) кривая 2 приближается к нулевым значениям [8]. Для кривой 1 такая тенденция не наблюдается. Это является косвенным подтверждением, что после старения концентрация "ловушек" на поверхности шероховатой окисленной поверхности полиэтиленовой изоляции возрастает и трибозаряды захватываются такими "ловушками". С данными результатами согласуются временные ряды измеренных значений емкости (рис. 4, кривая 1 и кривая 2) и тангенса угла диэлектрических потерь (рис. 5, кривые 1 и 2 соответственно): после старения (кривые 2) наблюдается больший размах результатов измерений.

Характер временных зависимостей контактной разности потенциалов силовых кабелей определяется конструктивными особенностями и применяемыми материалами. Так, для 4-х жильного кабеля с вулканизированной изоляцией без полупроводящих экранов по жиле и изоляции на напряжение 1 кВ для рядом расположенных жил динамика изменения контактной разности потенциалов в исходном состоянии

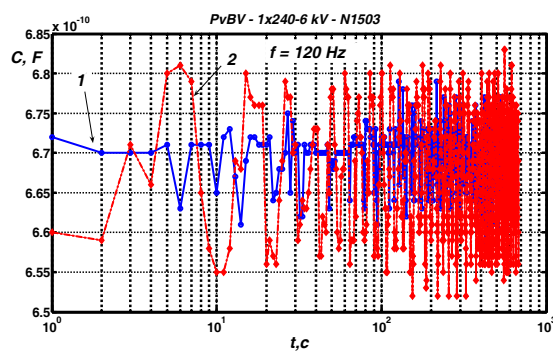


Рис. 4

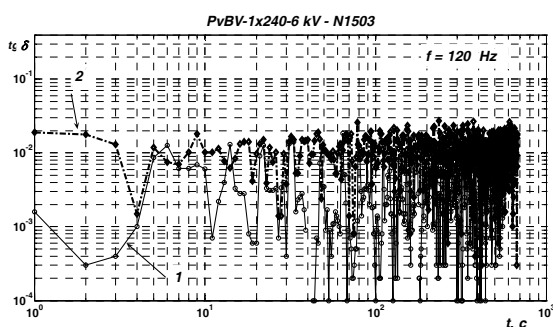


Рис. 5

(кривая 1) и после старения (кривая 2) представлена на рис. 6. Сравнение характера зависимости контактной разности потенциалов в образцах кабелей с полупроводящими экранами (рис. 3) и без (рис. 6) показывает, что полупроводящие экраны в конструкции кабелей изменяют трибологические свойства сшитой полиэтиленовой изоляции. После старения в одинаковых условиях и при одних и тех же режимах (температуре и дозе радиации) более окисленной является полиэтиленовая изоляция без защитного полупроводящего экрана: шероховатости окисленной поверхности отчетливо наблюдаются с помощью микроскопа. Это подтверждается и результатами измерений емкости (рис. 7,а) и тангенса угла диэлектрических потерь на частоте 120 Гц (рис. 7,б) и 1 кГц (рис. 7,в). На частоте 1 кГц разброс значений потерь уменьшился, что косвенно подтверждает факт осаждения поверхностных зарядов на окисленной поверхности полиэтиленовой изоляции.

Для промежуточной защитной оболочки на основе поливинилхлоридного пластика одножильного силового кабеля также наблюдается значимое увеличение контактной разности потенциалов в ходе ускоренного терморрадиационного старения (рис. 8: кривая 1 – исходное состояние, кривая 2 – после старения).

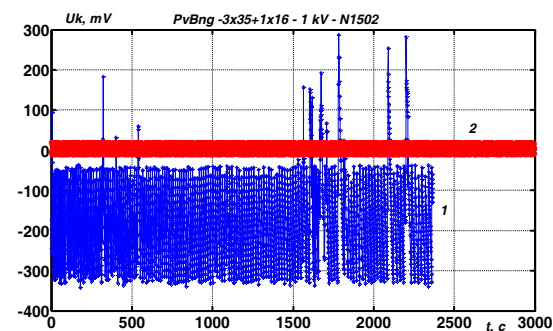
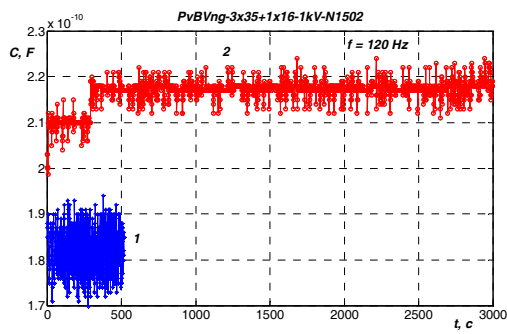
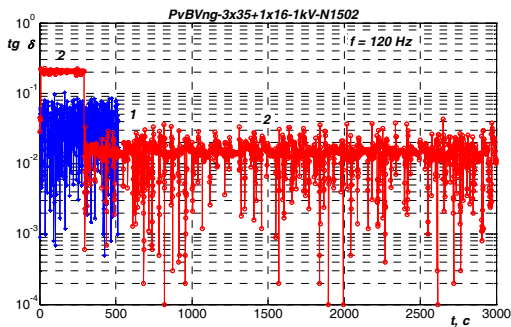


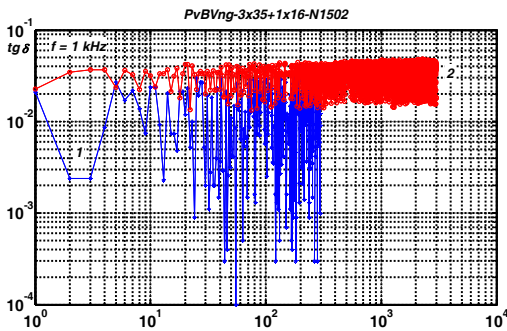
Рис. 6



а



б



в  
Рис. 7

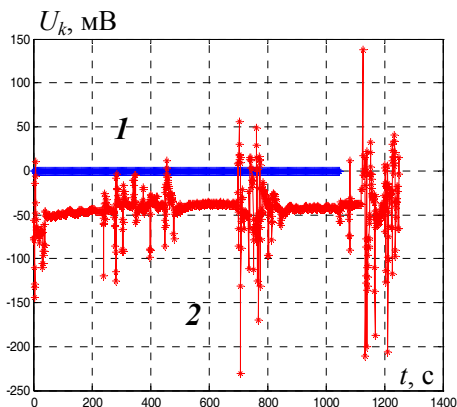
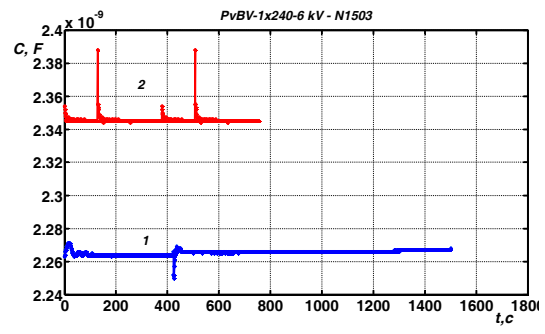
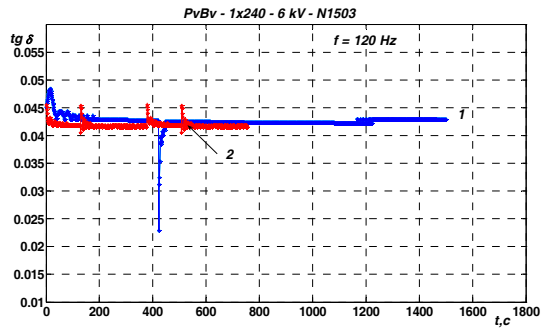


Рис. 8

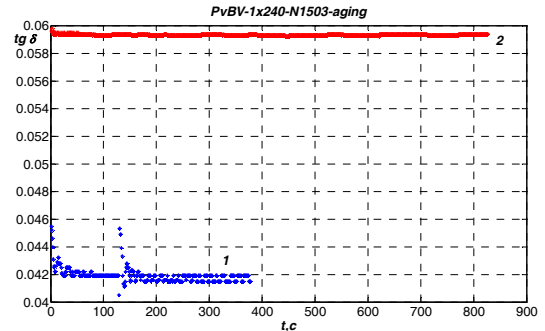
Увеличение емкости (рис. 9,а) после старения связано с процессом окисления поверхности изоляции. Эти результаты находятся в прямой зависимости с результатами измерения тангенса угла диэлектрических потерь на частоте 1 кГц (рис. 9,в): существенный, в 1,4 раза, рост является подтверждением старения ПВХ-оболочки, т.е. ее окисления. Потери на частоте 120 Гц не изменились (рис. 9,б): кривые 1 и 2 – совпадают.



а



б



в  
Рис. 9

Наблюдается качественное различие временных рядов емкости и тангенса угла диэлектрических потерь для полиэтиленовой и поливинилхлоридной изоляции (сравни рис 4, 5, 7 и 9). Разброс экспериментальных данных диэлектрических параметров меньше в случае ПВХ-изоляции, что связано с менее выраженными трибологическими свойствами ПВХ-пластиката.

### ВЫВОДЫ

Экспериментально показано, что контактная разность потенциалов является чувствительным параметром и может быть использована в качестве показателя состояния поверхности полимерной изоляции.

Для уменьшения влияния поверхностных свободных зарядов на результаты измерений перед началом измерений необходимо в течение времени, соизмеримого с постоянной времени, произвести разрядку кабеля (жилу и металлическую оболочку – заземлить).

В процессе старения окисленная поверхность полимерной изоляции способна в большей степени "захватить" ("связать") трибозаряды, что приводит, в зависимости от конструкции кабеля и применяемых материалов, к заметному изменению характера зависимости во времени контактной разности потенциалов.

Для более окисленной поверхности полимерной изоляции характерен меньший разброс контактной разности потенциалов (в случае полиэтиленовой изоляции без полупроводящих экранов) либо сдвиг максимума в область меньших времен (для полиэтиленовой изоляции с полупроводящими экранами).

В кабелях с вулканизированной полиэтиленовой изоляцией и полупроводящими экранами по жиле и изоляции косвенно, по результатам измерения контактной разности потенциалов, установлено, что саженаполненные полупроводящие экраны замедляют процесс окисления полиэтиленовой изоляции.

Для промежуточной поливинилхлоридной защитной оболочки в процессе старения наблюдается рост контактной разности потенциалов, что является подтверждением ее окисления.

Динамика изменений контактной разности потенциалов в процессе старения в зависимости от применяемых материалов и конструктивного исполнения согласуется с результатами измерений диэлектрических параметров кабелей: емкости и тангенса угла диэлектрических потерь. Величина размаха диэлектрических параметров также является информативным показателем для оценки состояния поверхности изоляции.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Bhushan B. Introduction to Tribology. Second Edition. John Wiley & Sons, 2013. – 711 p.
2. Безпрозванных Г.В., Бойко А.М. Электростатичні процеси в силових кабелях // Електротехніка і електромеханіка. – 2013. – №4. – С. 27-31.
3. Безпрозванных Г.В., Бойко А.М. Експериментальне визначення трибоелектричного потенціалу в неекранованих та екранованих кабелях // Електротехніка і електромеханіка. – 2012. – №3. – С. 56-60.
4. Безпрозванных Г.В., Бойко А.М. Трибоелектричний ефект в електроізоляційних конструкціях // Тези доповідей ХХ міжн.-практ. конф., Ч.2. 15-17 травня 2012 р., Харків, НТУ "ХПІ", 324 с.
5. Бойко А.Н. Дрейф во времени емкости и тангенса угла диэлектрических потерь неэкранированных и экранированных сетевых кабелей // Вісник НТУ "ХПІ". – 2013. – №42(948). – С. 65-68.
6. Безпрозванных А.В. Термо-трибо-електрический потенциал для оценки старения полимерной изоляции // Вестник НТУ "ХПІ". – 2009. – №27. – С. 16-24.

7. Безпрозванных Г.В., Бойко А.М. Патент України на копію модель №83470. Спосіб визначення старіння полімерної ізоляції екранованого багатожильного кабелю UA МПК (2013.01) G01B 1/00 H01B 9/00 H01B 11/00. Публ. 10.09.2013, бюл. №17.

**REFERENCES:** 1. Bhushan B. *Introduction to Tribology. Second Edition.* John Wiley & Sons Publ., 2013. 711 p. 2. Bezprozvannykh G.V., Boyko A.M. Electrostatic processes in power cables. *Elektrotehnika i elektromekhanika – Electrical engineering & electromechanics*, 2013, no4, pp. 27-31. 3. Bezprozvannykh G.V., Boyko A.M. Experimental determination of triboelectric potential in unshielded and shielded network cables. *Elektrotehnika i elektromekhanika – Electrical engineering & electromechanics*, 2012, no.3, pp. 56-60. 4. Bezprozvannykh G.V., Boyko A.M. Triboelectric effect in electrical design. *Anotatsii dopovidei 20 Mizhn. nauk.-prakt. konf. "Informatsiini tekhnologii: nauka, tekhnika, tekhnologii, osvita, zdorov'ia"* [Abstracts of 20th Int. Sci.-Pract. Conf. "Information technology: science, engineering, technology, education and health"]. Kharkov, 2012, p. 324. 5. Boyko A.N. Drift in time capacity and dielectric loss tangent of unshielded and shielded network cables. *Visnyk NTU "KhPI" – Bulletin of NTU "KhPI"*, 2013, no.42(948), pp. 65-68. 6. Bezprozvannykh A.V. Thermo-triboelectric potential to assess aging polymeric insulation. *Visnyk NTU "KhPI" – Bulletin of NTU "KhPI"*, 2009, no.27(948), pp. 16-24. 7. Bezprozvannykh G.V., A.M. Boyko *Sposib viznachennia starinnia polimernoї izoliatsii ekranovanogo bagatozhil'nogo kabeliu* [Method of determining the aging of polymeric insulation shielded multicore cable]. Patent UA, no.83470, 2013.

Поступила (received) 21.07.2014

Безпрозванных Анна Викторовна<sup>1</sup>, д.т.н., проф.,  
Бойко Антон Николаевич<sup>1</sup>, аспирант,

<sup>1</sup>Национальный технический университет  
"Харьковский политехнический институт",  
61002, Харьков, ул. Фрунзе, 21,  
тел/phone +38 057 7076010,  
e-mail: bezprozvannykh@kpi.kharkov.ua

A.V. Bezprozvannykh<sup>1</sup>, A.N. Boyko<sup>1</sup>

<sup>1</sup>National Technical University "Kharkiv Polytechnic Institute"  
21, Frunze Str., Kharkiv, 61002, Ukraine

#### Contact potential difference as a measure of power cable polymer insulation aging.

The paper shows dynamics of changing contact potential difference in power cables with cross-linked polyethylene insulation in the initial state and after additional thermal-radiation aging. The cable metal elements grounding is proposed to do before measurements in order to reduce the degree of surface charges action. It is experimentally revealed that the contact potential difference is a sensitive indicator of polymer insulation aging (oxidation) processes.

**Key words** – contact potential difference, power cables, thermal-radiation aging, surface charges, polymer insulation oxidation.