

## ОБОСНОВАНИЕ И ОБЕСПЕЧЕНИЕ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПОКАЗАТЕЛЕЙ ТРИБОЭЛЕКТРИЧЕСКОГО МЕТОДА КОНТРОЛЯ КАБЕЛЕЙ С ПОЛИМЕРНОЙ ИЗОЛЯЦИЕЙ

*Представлено результати вимірів контактної різниці потенціалів неекранованого та екранованого зразків кабелів з витими парами без екранованої камери, в екранованій не заземленій та заземленій камері. Проведення обстеження в заземленій камері більш ефективно у випадку екранованих кабелів. Показано, що застосування електростатичного вольтметра з більш високою чутливістю в порівнянні з цифровим мультиметром призводить до реєстрації як власних внутрішніх індивідуальних шумів кабелю, так і зовнішніх. Визначено коефіцієнти кореляції між результатами вимірів контактної різниці потенціалів силового кабелю електростатичним вольтметром та цифровим мультиметром.*

*Представлены результаты измерений контактной разности потенциалов неэкранированного и экранированного образцов кабелей с витыми парами без экранированной камеры, в экранированной не заземленной и заземленной камере. Проведение обследований в заземленной камере более эффективно в случае экранированных кабелей. Показано, что применение электростатического вольтметра с более высокой чувствительностью в сравнении с цифровым вольтметром приводит к регистрации, как собственных внутренних индивидуальных шумов кабеля, так и внешних. Определены коэффициенты корреляции между результатами измерений контактной разности потенциалов силового кабеля электростатическим вольтметром и цифровым мультиметром.*

### ВВЕДЕНИЕ

В работах [1-5] показано, что контактная разность потенциалов  $U_k$ , обусловленная процессами трибоэлектризации рядом расположенными изолированными жилами, изолированной жилой и экраном, является индивидуальным параметром кабеля, т.к. зависит от конструкции и применяемых материалов. На рис. 1 приведены временные ряды контактной разности потенциалов силового кабеля с бумажно-пропитанной изоляцией ЦААБнГ-3×150-6 кВ при двух схемах измерения: одна из изолированных жил относительно двух других и металлической оболочки (рис. 1,а) и все три изолированных жилы относительно металлической оболочки (рис. 1,б). Видно, что индивидуальные свойства изолированной жилы проявляются также и в общих результатах измерений.

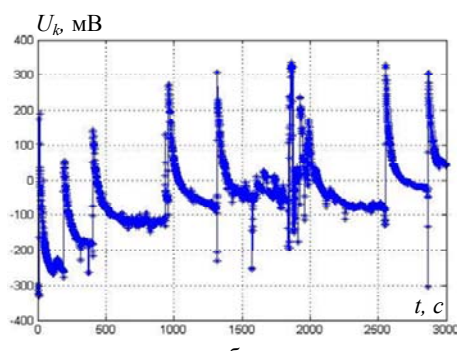
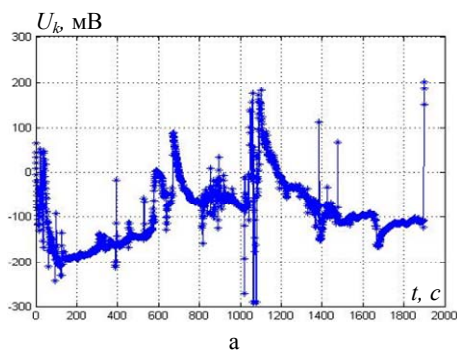


Рис. 1

Установлено [6, 7], что  $U_k$  – чувствительный параметр и может служить показателем степени старения полимерной изоляции кабелей. На рис. 2 приведены результаты измерений контактной разности потенциалов (мВ) изолированных жил кабеля АВВГ-4×120-1 кВ до (не изменяющаяся во времени) и после (изменяющаяся во времени кривая) теплового старения. Рис. 2,а соответствует удаленным жилам (через одну); рис. 2,б – для рядом расположенных жил. В процессе старения происходит изменение поверхностных свойств изоляции, возрастает шероховатость контактирующих поверхностей (рис. 3), что отражается и на отклике внутренних шумов на процесс трибоэлектризации.

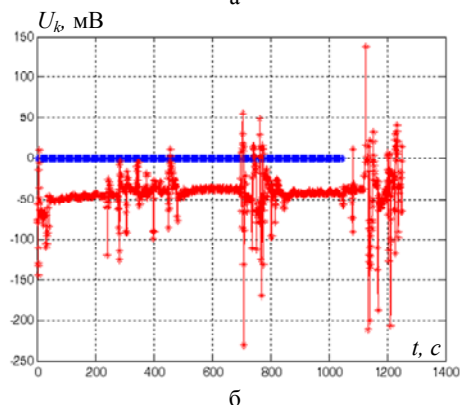
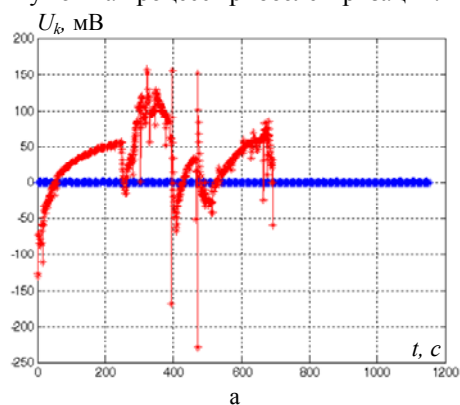


Рис. 2

© А.В. Беспрозванных, А.Н. Бойко

На рис. 3 приведена поверхность полиэтиленовой изоляции после старения. Фотографии получены с помощью акустического микроскопа на частоте 50 МГц (рис. 3,а) и оптического микроскопа с 500-кратным увеличением (рис. 3,б) [8].

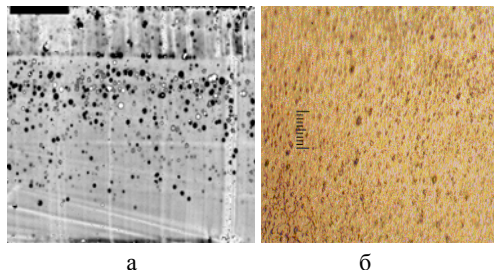


Рис. 3

Трибоэлектрический метод контроля состояния изоляции основан на эффекте накопления избыточного трибоэлектрического заряда в процессе контактной электризации изолированных проводников кабеля. Выполнено физическое обоснование метода [1, 2]; экспериментально определены величины трибоэлектрического потенциала для разных конструкций кабеля и материалов изоляции [3-5]; показана динамика изменения трибоэлектрического потенциала (контактной разности потенциалов) в процессе ускоренного терморadiационного старения кабелей [6, 7].

Контактная разность потенциалов является, по сути, внутренним индивидуальным сигналом - шумом кабеля, несущим полезную информацию о конструкции, проводниковых и изоляционных материалах, условиях и режимах эксплуатации. Исключение составляют специальные кабели с уменьшенными трибоэлектрическими шумами (так называемые Low Noise Cables), в которых применяют специальные малошумящие проводниковые (например, посеребренная медь) и изоляционные материалы.

*Рассмотрим вопросы, связанные с влиянием экранированной камеры на результаты измерений, полярности подключения объекта контроля и аппаратного (приборного) обеспечения метода.*

#### ВЛИЯНИЕ ЭКРАНИРОВАННОЙ КАМЕРЫ

Выполнено три серии измерений контактной разности потенциалов между проводниками одной из 4-х витых пар двух образцов сетевого кабеля категории 5е.

Первый образец – 100-метровая бухта неэкранированного кабеля плотной конструкции. Для измерений выбрана пара с наименьшим шагом скрутки. Вторым образец – экранированный кабель длиной 30 метров. Конструкция кабеля – не плотная (общий алюмополимерный экран неплотно прилегает к сердечнику кабеля из 4-х пар, т.е. есть возможность свободного перемещения пар).

Первое измерение – объект контроля находится вне экранированной камеры (рис. 4,а,б, поз. 1); второе – в экранированной заземленной камере (рис. 4,а,б, поз. 2); третье – в экранированной не заземленной камере (рис. 4,а,б, поз. 3).

К цифровому мультиметру подключается измеряемая пара, а остальные пары и общий экран экрани-

рованного кабеля – не заземляются. Передача данных с прибора в память компьютера осуществляется с помощью оптического интерфейса в режиме реального времени.

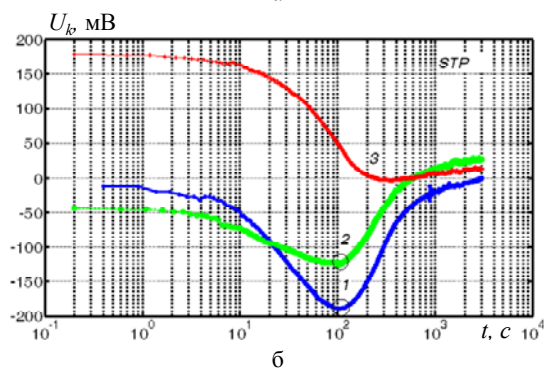
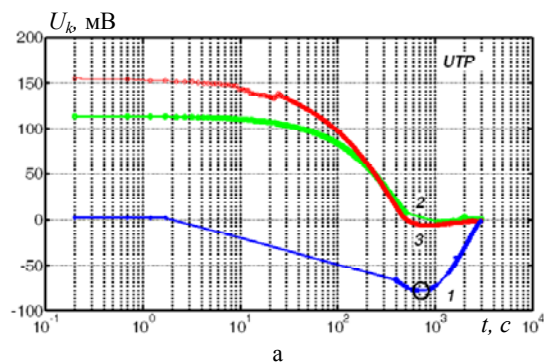


Рис. 4

Проведение измерений в экранированной камере привело к изменению знака контактной разности потенциалов пары неэкранированного кабеля (рис. 4,а, кривая 1 – отрицательные значения контактной разности потенциалов; кривые 2 и 3 – положительные значения). Сигнал мало отличается для не заземленной и заземленной камеры (сравни кривые 2 и 3 рис. 4,а).

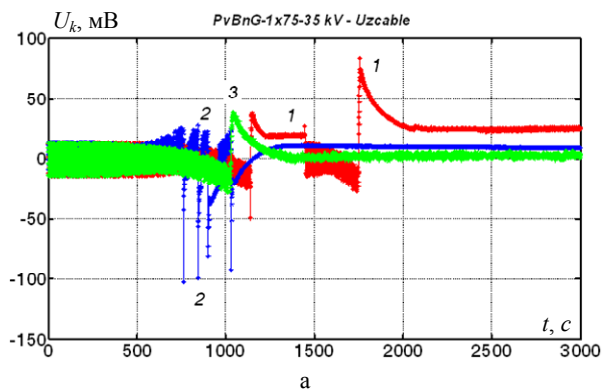
Для пары экранированного кабеля контактная разность потенциалов больше (сравни рис. 4,а и рис. 4,б, поз. 1): сказывается более свободная конструкция кабеля и возможность перемещения проводников пар. Проведение измерений в заземленной экранированной камере привело к уменьшению контактной разности потенциалов, но форма отклика и время достижения амплитудного значения остались без изменения (сравни поз. 1 и 2 на рис. 4,б).

#### ВЛИЯНИЕ СТЕКАНИЯ ПОВЕРХНОСТНОГО ЗАРЯДА

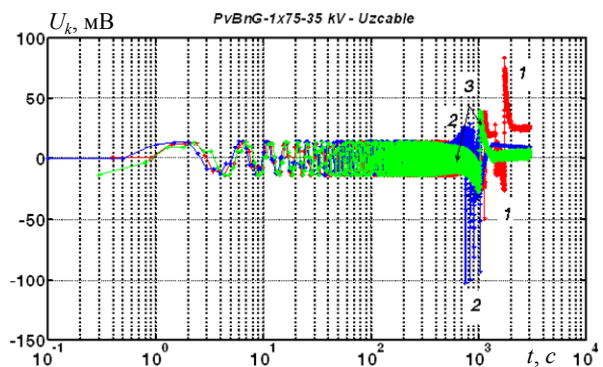
На рис. 5 приведены результаты измерений контактной разности потенциалов в новом (не бывшем в эксплуатации, 2013 года изготовления) одножильном силовом кабеле на напряжение 35 кВ со сшитой полиэтиленовой изоляцией.

Поверхностные заряды в наибольшей степени проявляются в исходном, предварительно не заземленном, состоянии (рис. 5, кривая 1). Заземление только одного экрана в течение 3-х дней (рис. 5, кривая 2) перед измерениями не приводит к уменьшению влияния поверхностных зарядов в области времен, меньших постоянной времени саморазряда (~1000 с). Одновременное заземление экрана и токопроводящей

жилы (рис. 5, кривая 3) в течение 8 дней приводит к уменьшению флуктуаций сигнала. Проявляется это влияние в диапазоне времени, соизмеримого с постоянной времени саморазряда (~1000 с). Размах контактной разности потенциалов для данного случая составляет 100 мВ. В исходном состоянии и при заземленном экране – 125 мВ. Наиболее наглядно это видно при представлении результатов не в равномерном (рис. 5,а), а в полулогарифмическом (рис. 5,б) масштабе.



а



б

Рис. 5

### ВЛИЯНИЕ ПОЛЯРНОСТИ ПОДКЛЮЧЕНИЯ ОБЪЕКТА КОНТРОЛЯ

Токопроводящие жилы и металлические экраны кабелей изготавливаются, как правило, из разных материалов. При проведении обследований необходимо сохранять полярность подключения кабеля к клеммам прибора, в противном случае знак контактной разности потенциалов может измениться на противоположный (см. рис. 6). При этом характер временной зависимости также может измениться, т.к. в контакте будут находиться разные материалы. Так, на рис. 6 приведены результаты измерений контактной разности потенциалов при прямом (кривая 1) и инверсном (кривая 2) подключении образца радиочастотного кабеля РК-75. Внутренний проводник – медный, экран – двухслойный: первый слой – алюмополимерный плотно прилегающий к полиэтиленовой изоляции (полимерный слой обращен к изоляции), второй – в виде луженой медной оплетки. При выбранной полярности подключения, например 1 (рис. 6) характер временных зависимостей контактной разности потенциалов будет определяться подключением к клемме двух слоев экрана (рис. 7, кривая 1), только второго – луженой медной оплетки (кривая 2, рис. 7) или только первого слоя экрана – алюмополимерного (кривая 3, рис. 7).

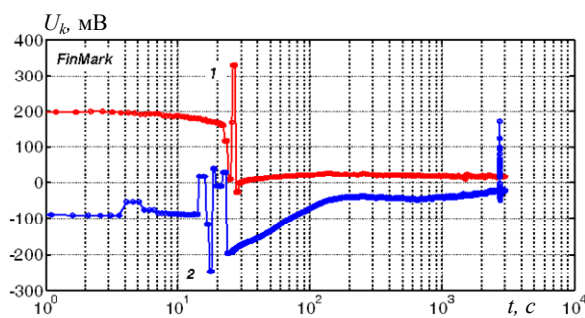


Рис. 6

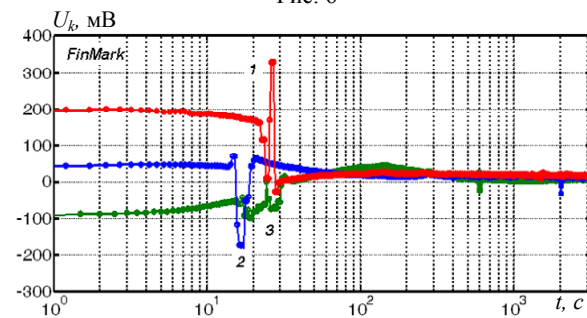


Рис. 7

### АНАЛИЗ АППАРАТНОГО ОБЕСПЕЧЕНИЯ

Так как измеряется шумовой сигнал, вызванный трибоэлектризацией конструктивных элементов кабеля, то возникает необходимость использования высокочувствительных малошумящих приборов.

На рис. 8 представлены результаты измерений контактной разности потенциалов, измеренные цифровым мультиметром (кривая 1) и электростатическим вольтметром (кривая 2), в одножильном силовом кабеле на напряжение 35 кВ со шитой полиэтиленовой изоляцией.

Высокая чувствительность электрометрического вольтметра В7-57/1 приводит к измерению, как контактной разности потенциалов измеряемого кабеля, так и других шумов, в том числе в измерительной линии (рис. 5, кривая 3), с помощью которой сигналы передаются в компьютер в режиме реального времени. Амплитуда измеряемого сигнала более чем в два раза больше (см. начальные участки кривых 1 и 2 рис. 8), в области больших времен измерений (> 1000 с) начинает проявляться как тепловой, так и дробовый шум самого электростатического вольтметра.

**Тепловой шум (шум Джонсона)** обусловлен тепловым движением носителей заряда в проводнике, в результате чего на его концах возникает флуктуирующая разность потенциалов [9]. Средний квадрат напряжения этого шума зависит только от активного сопротивления  $R$  и температуры  $T$  образца и рассчитывается по формуле Найквиста

$$\bar{U} = 4kTR\Delta f,$$

где  $k$  – постоянная Больцмана,  $\Delta f$  – полоса частот, в которой проводятся измерения.

Спектральная плотность такого шума  $S_f = 4kTR$  не зависит от частоты, поэтому его рассматривают как белый шум вплоть до частоты  $f_k$

$$f_k = \frac{kT}{2\pi\hbar},$$

где  $\hbar$  – постоянная Планка.



Характер зависимости спектральной плотности измеренного сигнала электростатическим вольтметром (рис. 9, кривая 2) отличается от двух других: измеренного с помощью цифрового мультиметра (кривая 1, рис. 9) и измерительной линии (кривая 3, рис. 9). Это находит подтверждение и в интегральных функциях распределения контактной разности потенциалов (рис. 10).

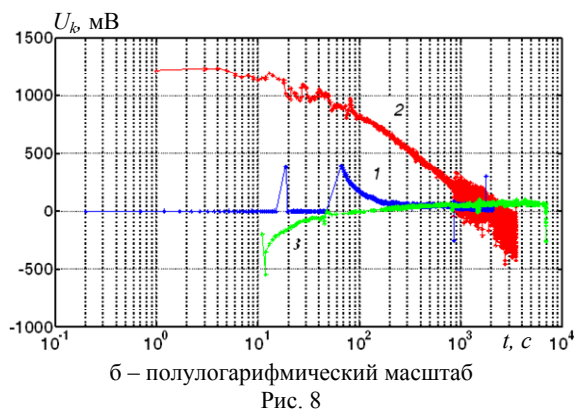
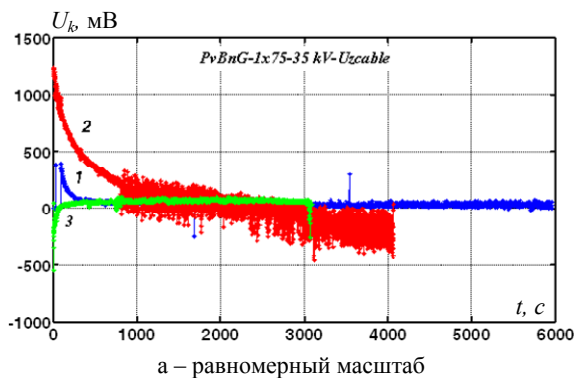


Рис. 8

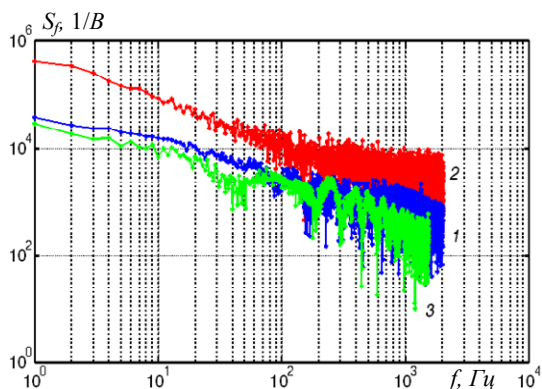


Рис. 9

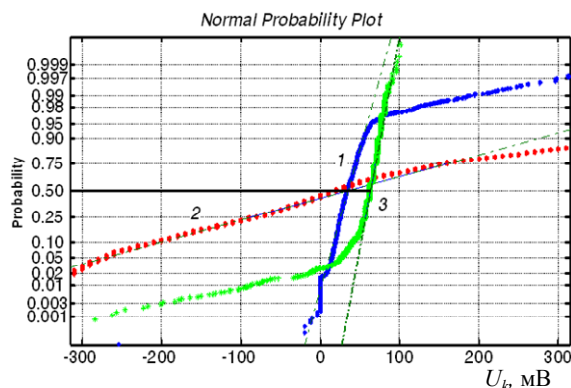


Рис. 10

По результатам измерений контактной разности потенциалов определены коэффициенты парной корреляции, которые составляют: **0,5** – между результатами измерений образца силового кабеля электростатическим вольтметром и цифровым мультиметром; **0,1** – между результатами измерений образца кабеля цифровым мультиметром и измерительной линии электростатическим вольтметром; **0,6** – между результатами измерений электростатическим вольтметром образца силового кабеля и измерительной линии. Слабая корреляция между результатами измерений образца силового кабеля электростатическим вольтметром и цифровым мультиметром является признаком того, что при использовании вольтметра наблюдается сильное влияние внутренних и внешних шумов на полезный слабый сигнал. Для выделения полезного сигнала на фоне сторонних помех целесообразно использовать математическую обработку сигнала путем фильтрации.

Особенностью цифрового мультиметра является то, что он измеряет среднеквадратичное значение напряжения (RMS – Root Mean Square), а результаты измерений передаются по оптическому интерфейсу в память компьютера. В результате наблюдается уменьшение влияния шумов на результаты измерений.

## ВЫВОДЫ

1. Для экранированных кабелей, кабелей с металлическими оболочками проведение контроля возможно без экранирующей заземленной камеры.
2. Полярность подключения электродов (жилы и экрана) к двум клеммам прибора определяет знак и характер временных зависимостей контактной разности потенциалов.
3. В зависимости от способа подключения многослойных экранов к прибору (индивидуальное либо общее) появляется возможность контроля не только полимерной изоляции, но и экранов (появление окисных пленок на поверхности металлических экранов).
4. Электростатический вольтметр, имеющий высокую чувствительность, наряду с индивидуальными шумами кабеля, обусловленными трибоэлектризацией, регистрирует помехи. При длительных измерениях начинает проявляться тепловой шум Джонсона – Найквиста, что ограничивает время наблюдения временных зависимостей контактной разности потенциалов. Измерения должны выполняться при одинаковой температуре. В противном случае в проводниках будут также проявляться внутренние тепловые шумы.
5. Значения контактной разности потенциалов образца силового кабеля со сшитой полиэтиленовой изоляцией, измеренные с помощью электростатического вольтметра и цифрового мультиметра, на уровне 50 % вероятности (средние значения) одинаковы.
6. Измерительные кабельные линии должны иметь низкий уровень контактной разности потенциалов (трибопотенциала) и иметь высокую помехозащищенность (специальные малошумящие кабели LNC). Наиболее оптимальный вариант – использование оптического интерфейса.

## СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Безпрозваних Г.В., Бойко А.М. Трибоелектричний ефект в електроізоляційних конструкціях // Анотації доповідей ХХ міжн. наук.-практ. конф. "Інформаційні технології: наука, техніка, технологія, освіта, здоров'я". – Харків, 2012. – С. 324.
2. Безпрозваних Г.В., Бойко А.М. Електростатичні процеси в силових кабелях // Електротехніка і електромеханіка. – 2013. – №4. – С. 27-31.
3. Безпрозваних А.В. Термо-трибо-електрический потенциал для оценки старения полимерной изоляции // Вісник НТУ "ХПІ". – 2009. – №27. – С. 16-24.
4. Безпрозваних Г.В., Бойко А.М. Експериментальне визначення трибоелектричного потенціалу в мережевих неекранованих та екранованих кабелях // Електротехніка і електромеханіка. – 2012. – №3. – С. 56-60.
5. Бойко А.Н. Дрейф во времени емкости и тангенса угла диэлектрических потерь неэкранированных и экранированных сетевых кабелей // Вісник НТУ "ХПІ". – 2013. – №42. – С. 65-68.
6. Безпрозваних Г.В., Бойко А.М. Патент на корисну 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.
7. Безпрозваних А.В., Бойко А.Н. Контактная разность потенциалов – как показатель степени старения полимерной изоляции силовых кабелей // Електротехніка і електромеханіка. – 2014. – №5. – С. 62-66.
8. Avila S.M., Horvath D.A. Microscopic void detection as a prelude to predicting remaining life in electric cable insulation // International Topical Meeting on Nuclear Plant Instrumentation, Controls, and Human-Machine Interface Technologies (NPIC&HMIT 2000), Washington, DC, November, 2000. – P. 8.
9. Johnson J. Thermal agitation of electricity in conductors // Physics Review. – 1928. – Vol.32. – P. 97.

**REFERENCES:** 1. Bezprozvannykh G.V., Boyko A.M. Triboelectric effect in electrical design. *Anotatsii dopovidei 20 Mizhn. nauk.-prakt. konf. "Informatsiini tekhnologii: nauka, tekhnika, tekhnologiya, osvita, zdorov'ia"* [Abstracts of 20th Int. Sci.-Pract. Conf. "Information technology: science, engineering, technology, education and health"]. Kharkov, 2012, p. 324. 2. Bezprozvannykh G.V., Boyko A.M. Electrostatic processes in power cables. *Elektrotehnika i elektromekhanika – Electrical engineering & electromechanics*, 2013, no.4, pp. 27-31. 3. Bezprozvannykh A.V. Thermo-triboelectric potential to assess aging polymeric insulation. *Visnyk NTU "KhPI" – Bulletin of NTU "KhPI"*, 2009, no.27, pp. 16-24. 4. 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. 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, pp. 65-68. 6. Bezprozvannykh G.V., Boyko A.M. *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. 7. Bezprozvannykh A.V., Boyko A.N. Contact potential difference as a measure of power cable polymer insulation aging. *Elektrotehnika i elektromekhanika – Electrical engineering & electromechanics*, 2014, no.5, pp. 62-66. 8. Avila S.M., Horvath D.A. Microscopic void detection as a prelude to predicting remaining life in electric cable insulation. *International Topical Meeting on Nuclear Plant Instrumentation, Controls, and Human-Machine Interface Technologies (NPIC&HMIT 2000)*. Washington, DC, November, 2000. p. 8. 9. Johnson J. Thermal agitation of electricity in conductors. *Physics Review*, 1928, vol.32, p. 97.

*Postynula (received) 21.10.2014*

*Безпрозваних Анна Викторовна<sup>1</sup>, д.т.н., проф.,  
Бойко Антон Николаевич<sup>1</sup>, аспірант,  
<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*

### **Substantiation and guaranteeing of technological parameters of triboelectrical method of monitoring of cables with polymer insulation.**

The results of measurements of the contact potential difference of not shielded and shielded samples of cables with twisted pair without shielded chamber, inside a shielded non-grounded and grounded camera are presented. Inspections carrying out in a grounded chamber are more effective in the case of shielded cables. It is shown that utilization of an electrostatic voltmeter with higher sensitivity in comparison with digital voltmeter leads to registration as individual own internal noises of the cable as external ones. The coefficients of correlation between the results of measurements of the contact potential difference of the power cable by electrostatic voltmeter and by digital multimeter are determined.

**Key words – contact potential difference, triboelectrical method, cables, polymer insulation, shielded test chamber, electrostatic voltmeter, digital voltmeter.**