

ЕЛЕКТРОСТАТИЧНІ ПРОЦЕСИ В СИЛОВИХ КАБЕЛЯХ

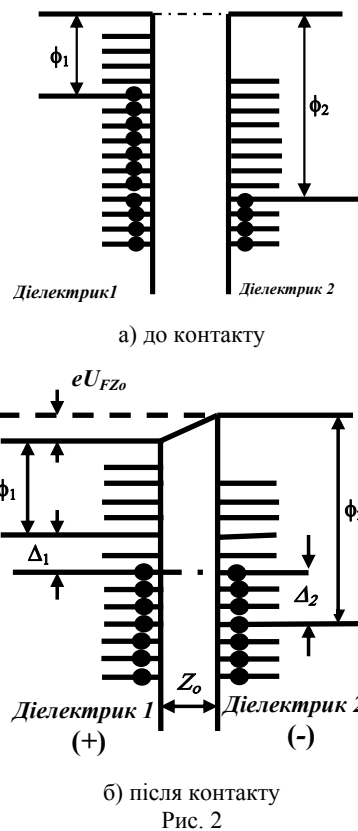
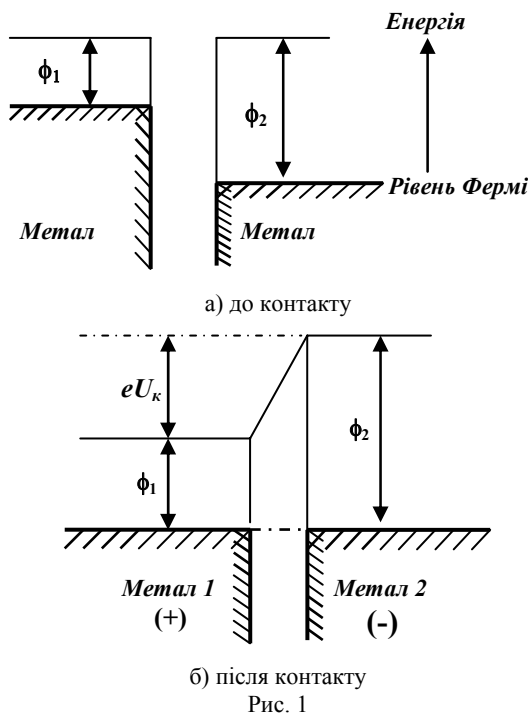
Виконано спостереження контактної електризації зразків силових кабелів. Встановлено, що контактна різниця потенціалів, що утворилась при розділенні вільних зарядів на поверхнях контактуючих матеріалів, залежить від конструкції кабелів, застосованих матеріалів та схеми обстеження. Представлено часові ряди дрейфу ємності та тангенса кута діелектричних втрат, який обумовлено нестабільністю процесу трибоелектричного заряджання поверхонь, які контактують.

Выполнено наблюдение контактной электризации образцов силовых кабелей. Установлено, что контактная разность потенциалов и емкость, образованная при разделении свободных зарядов на поверхностях контактирующих материалов, зависит от конструкции кабелей, применяемых материалов и схемы обследования. Представлены временные ряды дрейфа емкости и тангенса угла диэлектрических потерь, обусловленного нестабильностью процесса трибоэлектрической зарядки контактирующих поверхностей.

ПОСТАНОВКА ПРОБЛЕМИ ТА АНАЛІЗ ПУБЛІКАЦІЙ

Статична електрика представляє сукупність явищ, що пов'язані з виникненням, збереженням та релаксацією вільного електричного заряду (електронів, іонів на поверхні або в об'ємі діелектричних матеріалів, на ізольованих провідниках, між провідником та ізоляцією.

При контакті двох матеріалів з різними властивостями електричний заряд переходить з одного матеріалу на інший. Це явище відомо як контактна електризація або контактне заряджання. При постійному терті матеріалів це явище називається як трибоелектризація, трибоелектричне заряджання або просто трибозаряджання [1-4]. Перенос електричних зарядів обумовлено контактною різницею потенціалів внаслідок різної роботи виходу, наприклад, електронів ϕ_1 та ϕ_2 (при контакті двох металів, рис.1) або ефективній роботі виходу (при контакті металу та діелектрика або двох діелектриків, рис.2):



При молекулярно-іонній моделі контакту металу – діелектрик вільний електрон інjektується в поверхню акцептора діелектрика [1].

Контактна різниця потенціалів U_k для металів визначається як:

$$U_k = \frac{\phi_1 - \phi_2}{e}, \tag{1}$$

де $e = 1,6 \cdot 10^{-19}$ Кл – заряд електрона.

При контакті двох діелектриків можливі енергетичні рівні для електронів розташовуються на поверхні, яка називається поверхню стану [1]. Перехід електронів з заповненої поверхні стану діелектрика 1 на незаповнену поверхню стану діелектрика 2 (рис. 2,а) відбувається за рахунок різниці ефективних робіт виходу двох поверхонь. Переніс заряду можливий

тільки в тому випадку, коли рівні Фермі співпадають (див. рис. 2,а та рис. 2,б). При цьому енергія Фермі діелектрика 1 та 2 змінюється на Δ_1 та Δ_2 відповідно. Переніс заряду призводить до появи різниці потенціалів U_{FZ_0} між поверхнями:

$$U_{FZ_0} = \frac{(\phi_2 - \Delta_2) - (\phi_1 + \Delta_1)}{e} \quad (2)$$

Заряд, що переноситься, при контакті як двох металів, так і діелектриків, визначається контактною різницею потенціалів, та ємністю, яка утворилась при розділенні зарядів на поверхнях контактуючих металів (металу та діелектрика, діелектриків).

В табл. 1 наведено амплітудні значення щільності заряду після контакту полімерних матеріалів з металом в залежності від умов контакту.

Таблиця 1

Полімерний матеріал	Щільність заряду, пКл/см ²	Умови контакту
Поліетилен	500	Повітря, контакт
	5000	Повітря, тертя
	10000	Вакуум, тертя
Політетрафторетилен	3000	Вакуум
	7000	Повітря, контакт
	20000	Вакуум, тертя
Нейлон	200000	Вакуум, обертання
	100000	Вакуум, контакт
Поліімід	100000	Вакуум, обертання
Полікарбонат	300000	Вакуум, обертання

Контактна електризація є причиною виникнення значних потенціалів та термоелектронних струмів, значення яких залежать від діелектричних властивостей матеріалів, значення їх взаємного тиску при стиранні, вологості та температури поверхонь. Так, в залежності від типу полімеру при контакті та терті метал-полімер, полімер-полімер виникають потенціали до декількох тисяч вольт, що може призвести до електростатичного пробую (ESD) [3].

За рахунок перерозподілу електронів на поверхнях контактуючих матеріалів виникає подвійний електричний прошарок з протилежними знаками електричних зарядів (див. рис. 1,б та 2,б) – електрична ємність, яка суттєво залежить від типу матеріалів.

Схематично процес контакту двох матеріалів з релаксацією заряду представлено на рис. 3: позиція а – до контакту; б – контакт та переніс заряду; в – розділення контактуючих матеріалів; г – релаксація зарядів.

ПОСТАНОВКА ЗАВДАННЯ

В електроізоляційних конструкціях, зокрема, в силових кабелях, між струмопровідними жилами та ізоляцією, ізоляцією та металевими екранами спостерігається постійний контакт (позиція "б" на рис. 3). Можливість накопичення заряду статичної електрики визначається як інтенсивністю виникнення, так і умовами стирання зарядів. Інтенсивність виникнення зарядів визначається фізико-хімічними властивостями матеріалів та технологічного обладнання, які застосовуються при виготовленні кабелів, а також парамет-

рами технологічних процесів. Стикання зарядів може частково відбуватися в разі заземлення металевих екранів кабелю [5], а на інших контактуючих поверхнях відбувається переніс зарядів, що призводить до виникнення контактної різниці потенціалів, побічної ємності та додаткових втрат на електропровідність, що є джерелом старіння полімерної ізоляції.

Ціллю статті є спостереження за електро-статичними процесами в зразках силових кабелів різної конструкції та з різними матеріалами, які призводять до виникнення контактної різниці потенціалів, флуктуацій ємності та тангенсу кута діелектричних втрат в часі.

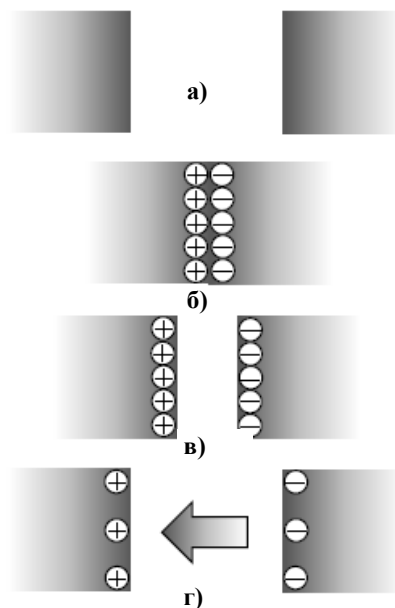


Рис. 3

МЕТОДИКА ТА РЕЗУЛЬТАТИ ДОСЛІДЖЕНЬ

Вимірювання контактної різниці потенціалів (U_k) зразків силових кабелів виконано цифровим мультиметром APPA 106, електричної ємності та тангенсу кута діелектричних втрат на частоті 120 Гц та 1 кГц - цифровим вимірювачем E7-22.

Нижче наведено результати обстежень чотирьох зразків силових кабелів практично однакової довжини (1,2-1,3 метра).

1. Кабель ЦААБНЛГ-3×150-6 кВ трьохжильний з паперово-просоченою ізоляцією, алюмінієвими жилами перерізом 150 мм² на напругу 6 кВ.

В такому кабелі кожна струмопровідна жила має фазну ізоляцію на основі кабельного паперу. Поверх фазної на всі три ізольовані жили накладається шляхом обмотки поясна ізоляція також з кабельного паперу. В процесі експлуатації властивості фазної та поясної ізоляції – різні, між ними – прошарки просочення. Цілком ймовірно, що при контакті фазної та поясної ізоляції буде виникати різниця потенціалів.

На рис. 4 наведено залежності контактної різниці потенціалів від часу спостереження для двох схем обстеження: а) одна фаза відносно металевої алюмінієвої оболонки; б) три фази разом відносно металевої алюмінієвої оболонки.

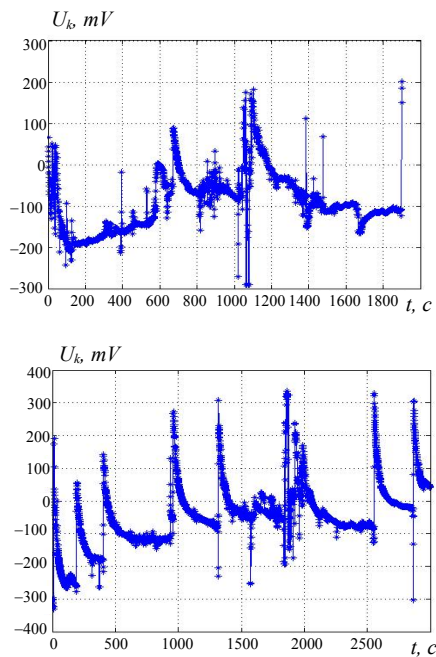


Рис. 4

Для останньої схеми обстеження контактна різниця потенціалів більше, що обумовлено наявністю більших контактуючих поверхонь, зокрема, трьома фазними з відповідними частинами поясної ізоляції.

2. Кабель АВВГ-4×120 чотирьохжильний з алюмінієвими жилами перерізом 120 мм² з полівінілхлоридною (ПВХ) ізоляцією та захисною оболонкою на основі ПВХ пластикату без металевих оболонок на напругу 1 кВ.

Між поряд розташованими ізольованими жилами є повітряний зазор. Властивості двох діелектриків – ПВХ пластикату та повітря – різні, що обумовлює появу потенціалу та додаткової ємності.

На рис. 5 наведено зміни в часі контактної різниці потенціалів для двох фаз, що безпосередньо знаходяться в контакті (крива 1), та не контактуючих (крива 2).

Часові залежності ємності контактуючих фаз та тангенсу кута діелектричних втрат для частоти 1 кГц показано на рис. 6 та рис. 7 відповідно. Під час проведення вимірювань на 500 секунд на кабель діяла механічна сила, що призвело до короткочасного розділення контакту та релаксації зарядів (див. рис. 3,в,г). Відповідно до цього відбулося зменшення ємності (рис. 6, стрибок вниз на залежності) та зростанню тангенсу кута діелектричних втрат (рис. 7, стрибок вгору). Зростання тангенсу кута діелектричних втрат в цей час обумовлено наявністю вільних не скомпенсованих зарядів, – втратами на електропровідність:

$$\varepsilon^* = \varepsilon + \frac{\sigma}{j\omega} = \varepsilon + \frac{1}{j\omega\rho_v}, \quad (3)$$

де ε^* – комплексна діелектрична проникність; яка складається з дійсної частини ε – відносної діелектричної проникності та уявної, що характеризує втрати в ізоляції на круговій частоті ω : σ – провідність та ρ_v – питомий об'ємний опір ізоляції.

Відновлення ємності до початкових значень відбулося за 4 секунди, що пов'язано з малою сталою τ

саморозряду ПВХ пластикату: від 5 до 50 с в залежності від складу. Для поліетилену стала саморозряду дорівнює 18000 с [4].

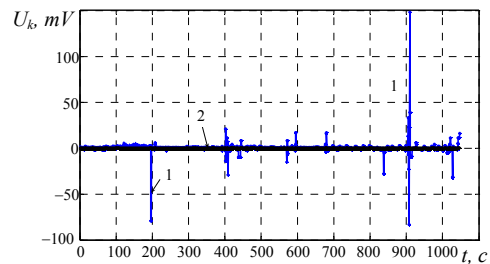


Рис. 5

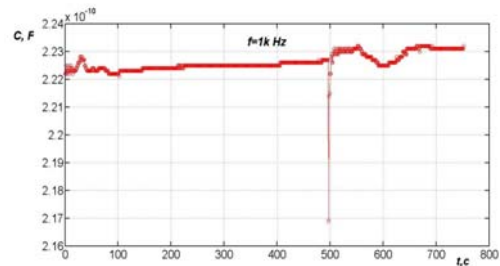


Рис. 6

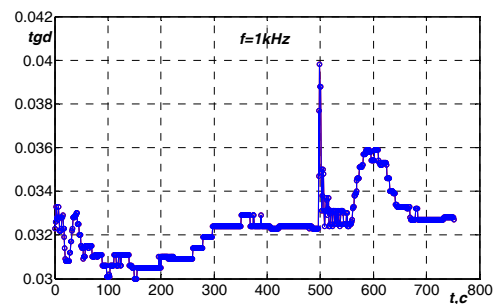


Рис. 7

3. Кабель ПвБВнг-3×35+1×16-1 кВ зі зшитю поліетиленовою ізоляцією, ПВХ проміжною оболонкою та зі сталеву бронею (рис. 8) на напругу 1 кВ. Три жили – перерізом 35 мм², одна – 16 мм².

Для поруч розташованих ізольованих жил однакового перерізу 35 мм² контактна різниця потенціалів дорівнює –350 мВ, причому має практично однакові значення на всьому періоді спостереження (рис. 9,а). Для віддалених жил однакового перерізу – зменшується від +350 мВ до 0, переходить в область від'ємних значень до –150 мВ і поступово наближається до 0 за той же час спостереження, що і для поруч розташованих жил.

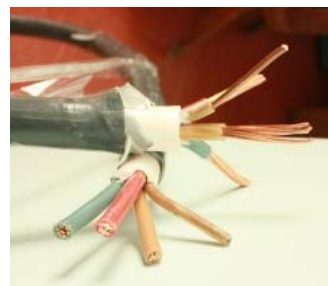


Рис. 8

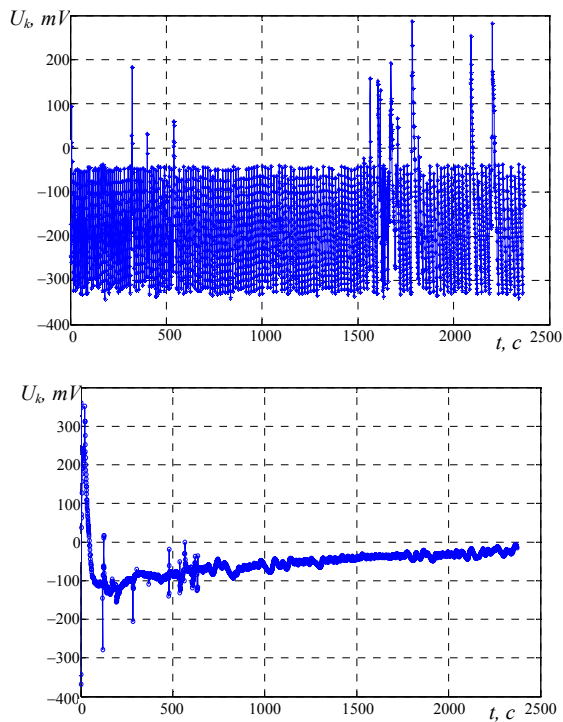


Рис. 9

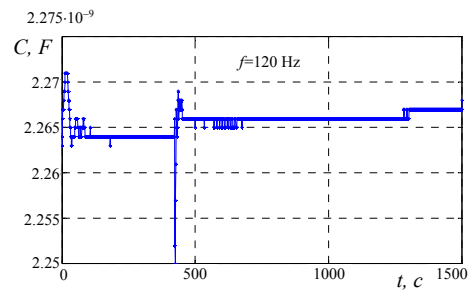
Для віддалених жил в кабелі з поліетиленовою ізоляцією на протязі 40 хвилин спостерігається контактна різниця потенціалів на відміну від кабелю з ПВХ ізоляцією (порівняйте рис. 5, крива 2 та рис. 9,б). Це обумовлено високими електрофізичними властивостями поліетиленової ізоляції. Відповідно з цим характер зміни ємності та тангенсу кута діелектричних втрат для зшитої поліетиленової ізоляції при дії механічної завади (натискання на кабель) – однаковий (стрибки на рис. 10,а,б – для частоти 120 Гц, в,г – для частоти 1 кГц). Висока щільність поверхневих пасток поліетилену (10^{14} еВ⁻¹ м⁻²) [4] призводить до того, що зі зменшенням ємності тангенс кута діелектричних втрат також зменшується (на відміну від характеру зміни для ПВХ пластику – рис. 6, 7).

4. Одножильний кабель ПвБВнг-1×240-6 кВ (рис. 11) з мідною жилою перерізом 240 мм², зі зшитою поліетиленовою ізоляцією, напівпровідниковими екранами по жилі та ізоляції, мідним екраном, проміжною ПВХ оболонкою та мідною бронєю на напругу 6 кВ.

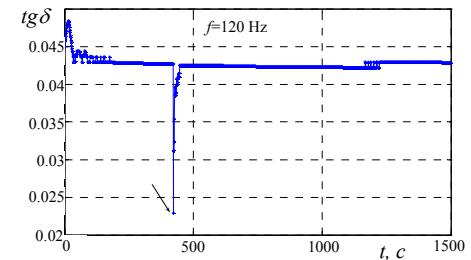
Наявність напівпровідникових екранів не призвела до суттєвого зменшення контактної різниці потенціалів (рис. 12).

Введення в поліетилен сажі призводить до зменшення питомого об'ємного опору, при чому значення такої напівпровідникової композиції не повинно перевищувати 10^5 Ом·м [6]. При значеннях $\rho_v \leq 10^5$ Ом·м контактна електризація не виникає [4]. Кабелі зі зшитою поліетиленовою ізоляцією з напівпровідниковими екранами напругою 20 кВ мають такі ж значення контактної різниці потенціалів U_k та характер зміни в часі [7].

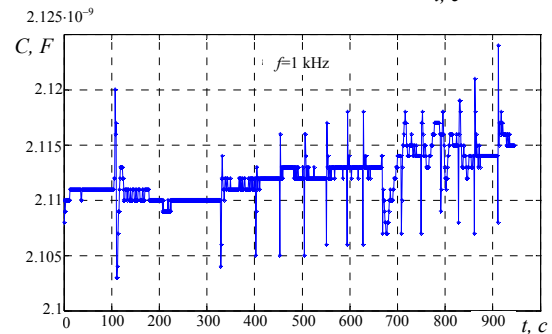
Для проміжної ПВХ оболонки контактна різниця потенціалів не перевищує 15 мВ (абсолютне значення) (рис. 13).



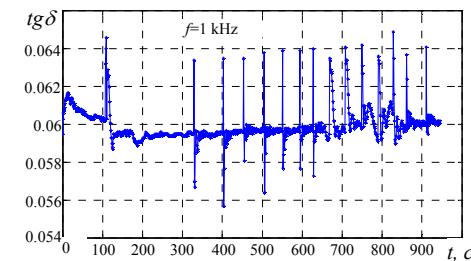
а



б



в



г

Рис. 10



Рис. 11

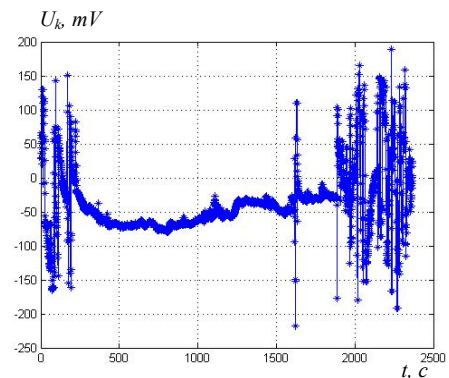


Рис. 12

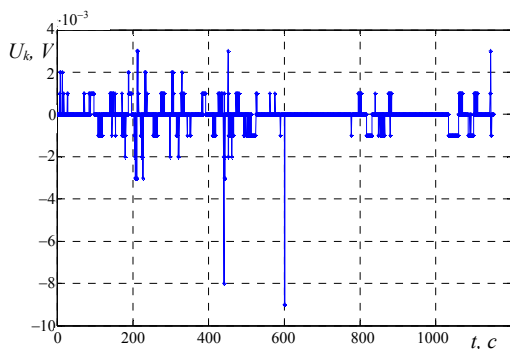


Рис. 13

ВИСНОВОК

Електростатичні процеси, пов'язані з контактною електризацією матеріалів конструктивних елементів силових кабелів, призводять до появи контактної різниці потенціалів, додаткової ємності та діелектричних втрат на електропровідність.

Експериментально показано, що контактна різниця потенціалів суттєво залежить від діелектричних матеріалів та схеми обстеження силових кабелів.

Встановлено характер зміни ємності та тангенсу кута діелектричних втрат для ізоляції на основі ПВХ пластикату та зшитої поліетиленової.

Наявність в конструкції кабелів зі зшитою ізоляцією напівпровідникових екранів по жилі та ізоляції не призводить до зменшення контактної різниці потенціалів в порівнянні з кабелями без таких екранів, що пов'язано, очевидно, з властивостями наночасток сажі в кабельній композиції.

Під дією контактної електризації в силових кабелях з паперово-просоченою та зшитою поліетиленовою ізоляцією має місце повільний постійний процес її старіння, навіть при відключенні від навантаження.

При діагностичних обстеженнях силових кабелів за діелектричною абсорбцією необхідно забезпечити умови вимірювання ємності та тангенсу кута діелектричних втрат без впливу механічних завод на кабель. Інакше можливо отримати підвищені значення тангенсу кута діелектричних втрат для ПВХ ізоляції та зменшені – для поліетиленової. Так, для обстежених кабелів спостерігається: для ПВХ ізоляції – збільшення $\text{tg}\delta$ на 30 %, для поліетиленової ізоляції – зменшення $\text{tg}\delta$ на частоті 120 Гц – в 2 рази.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Castle P.G. Contact charging between insulators / P.G. Castle // Journal of Electrostatics, 1997. – № 40-41, pp. 13-20.
2. Bailey A.G. The charging of insulator surface / A.G. Bailey // Journal of Electrostatics, 2001. – № 51/52, pp. 82-90.
3. Kwetkus B.A. Gas breakdown in contact electrification / B.A. Kwetkus, K. Satller, H.C. Siegmann // Journal Physics Dielectric: Applied Physics, 1992. – № 25. – 139 p.

4. Беспрозванных А.В. Термо-трибо-электрический потенциал для оценки старения полимерной изоляции / А.В. Беспрозванных // Вестник НТУ "ХПИ". – 2009. – № 27. – С. 16-24.
5. Беспрозванных Г.В. Экспериментальне визначення трибоелектричного потенціалу в неекраниваних та екраниваних кабелях / Г.В. Беспрозванных, А.М. Бойко // Електротехніка і електромеханіка. – 2012. – № 3. – С. 56-60.
6. Беспрозванных А.В. Обоснование электрофизических характеристик полупроводящих экранов силовых кабелей высокого напряжения со шитой изоляцией / А.В. Беспрозванных, Б.Г. Набока, Е.С. Москвитин // Електротехніка і електромеханіка. – 2010. – № 3. – С. 42-45.
7. Беспрозванных Г.В. Бойко А.М. Трибоелектричний ефект в електроізоляційних конструкціях / Г.В. Беспрозванных, А.М. Бойко // Тези доповідей ХХ міжнародно-практичної конференції, ч. II (15-17 травня 2012 р., Харків) / Харків, НТУ "ХПИ". – 324 с.

Bibliography (transliterated): 1. Castle P.G. Contact charging between insulators / P.G. Castle // Journal of Electrostatics, 1997. - № 40-41, pp. 13-20. 2. Bailey A.G. The charging of insulator surface / A.G. Bailey // Journal of Electrostatics, 2001. - № 51/52, pp. 82-90. 3. Kwetkus B.A. Gas breakdown in contact electrification / B.A. Kwetkus, K. Satller, H.C. Siegmann // Journal Physics Dielectric: Applied Physics, 1992. - № 25. - 139 p. 4. Besprozvannyh A.V. Termo-tribo-`elektricheskij potencial dlya ocenki stareniya polimernoj izolyacii / A.V. Besprozvannyh // Vestnik NTU "HPI". - 2009. - № 27. - S. 16-24. 5. Bezprozvannyh G.V. Eksperimental'ne viznachennya triboelektrichnogo potencialu v neekranovanih ta ekranovanih kabelyah / G.V. Bezprozvannyh, A.M. Bojko // Elektrotehnika i elektromehaniika. - 2012. - № 3. - S. 56-60. 6. Besprozvannyh A.V. Obosnovanie `elektrofizicheskikh harakteristik poluprovodnyaschih `ekranov silovyh kabelej vysokogo napryazheniya so sshitoy izolyaciej / A.V. Besprozvannyh, B.G. Naboka, E.S. Moskvitin // Elektrotehnika i elektromehaniika. - 2010. - № 3. - S. 42-45. 7. Bezprozvannyh G.V. Bojko A.M. Triboelektrichnij efekt v elektroizolyacijnih konstrukciyah / G.V. Bezprozvannyh, A.M. Bojko // Tezi dopovidej HH mizhnarodno-praktichnoi konferencii, ch. II (15-17 travnya 2012 r., Harkiv) / Harkiv, NTU "HPI". - 324 s.

Надійшла 25.05.2013

Беспрозванных Ганна Вікторівна, д.т.н., проф.,
Бойко Антон Миколайович

Національний технічний університет
"Харківський політехнічний інститут"
кафедра електроізоляційної та кабельної техніки
61002, Харків, вул. Фрунзе, 21
тел. (057) 707-60-10, e-mail: bezprozvannyh@kpi.kharkov.ua

Bezprozvannyh G.V., Boyko A.M.

Electrostatic processes in power cables.

Observation of contact electrification of power cable samples is made. It is revealed that the contact potential difference and the capacity formed under separation of free charges on the surfaces of the contacting materials depend on cable design, applied materials, and inspection schemes. Time series of capacity drift and dielectric loss tangent caused by instability of triboelectric charging of the contacting surfaces are presented.

Key words – contact electrification, triboelectric charging, contact potential difference, capacity drift, dielectric loss tangent.