

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ
«ХАРКІВСЬКИЙ ПОЛІТЕХНІЧНИЙ ІНСТИТУТ»

Бойко Антон Миколайович



УДК 621.319.4

**ДІАГНОСТИКА ПОЛІМЕРНОЇ ІЗОЛЯЦІЇ В ПРОЦЕСІ СТАРІННЯ
КАБЕЛІВ ПІД ДІЄЮ СИЛЬНОГО ЕЛЕКТРИЧНОГО ПОЛЯ ЗА
ТРИБОЕЛЕКТРИЧНИМ ПОТЕНЦІАЛОМ**

Спеціальність 05.09.13 – техніка сильних електричних
та магнітних полів

Автореферат дисертації на здобуття наукового ступеня
кандидата технічних наук.

Харків – 2016

Дисертацією є рукопис

Робота виконана на кафедрі електроізоляційної та кабельної техніки Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут», Міністерство освіти і науки України, м. Харків

Науковий керівник: доктор технічних наук, професор
Безпрозванних Ганна Вікторівна,
Національний технічний університет
«Харківський політехнічний інститут», м. Харків
професор кафедри електроізоляційної
та кабельної техніки

Офіційні опоненти: доктор технічних наук, професор
Шумілов Юрій Миколайович,
ПАТ «Слов'янський завод високовольтних
ізоляторів», заступник директора з наукової роботи

кандидат технічних наук, старший викладач
Щерба Максим Анатолійович,
Національний технічний університет України
«Київський політехнічний інститут», докторант

Захист відбудеться «3» березня 2016 р. о 14:30 годині хвилин на засіданні спеціалізованої вченої ради Д.64.050.08 при Національному технічному університеті «Харківський політехнічний інститут» за адресою: 61002, м. Харків, вул. Багалія, 21.

З дисертацією можна ознайомитись в бібліотеці Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут»

Автореферат розісланий «25» січня 2016 р.

Вчений секретар
спеціалізованої вченої ради



О.Ю. Юр'єва

ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

Актуальність теми. Для забезпечення надійної роботи силових кабелів середньої (6–35 кВ) напруги зі зшитою поліетиленовою ізоляцією в експлуатації застосовується система планово-профілактичних випробувань постійною напругою достатньо високого рівня, який в 4–6 разів перевищує номінальну напругу, з вимірюванням струму провідності. Планово-профілактичні випробування підвищеною постійною напругою навіть у випадку успішного проведення не тільки не гарантують безаварійну роботу в майбутньому, але в багатьох випадках призводять до скорочення строку експлуатації кабелів. Довготривале прикладання постійної високої та змінної випробувальної напруги до полімерної ізоляції кабелів недоцільне в зв'язку з накопиченням в товщі ізоляції значних об'ємних (просторових) зарядів, котрі призводять до електричного старіння. Виявлення ознак старіння полімерної ізоляції при таких випробуваннях неможливе. Механізм деградації властивостей електричної ізоляції пов'язаний з накопиченням просторових та поверхневих зарядів як в товщі ізоляції, так і на границях розділу конструктивних елементів кабелів.

З іншого боку, конструктивною та технологічною особливістю кабелів є щільне накладання полімерної ізоляції на струмопровідну жилу. Наявність постійного контакту (тертя) струмопровідних жил відносно полімерної ізоляції по всій довжині кабелю, ізоляції відносно металевого екрану, ізольованих провідників один відносно одного, призводить до процесу статичної електризації, в результаті якого на границях розділу накопичуються трибозаряди та виникає стрибок потенціалу – контактна різниця потенціалу (трибоелектричний потенціал).

Таким чином, науково-практична задача дослідження зміни трибоелектричного потенціалу в процесі старіння кабелів під дією сильного електричного поля є актуальною, дає змогу визначити поверхневі властивості полімерної ізоляції кабелів та визначила напрям дисертаційних досліджень.

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами.

Дисертаційна робота виконана на кафедрі електроізоляційної та кабельної техніки в НТУ “ХПІ” в рамках госпдоговірних тем з Харківською філією “Інженерно-технічний центр “КОРО” (м. Харків): “Обстеження технічного стану кабелів енергоблоку №4 та ОСО ВП ЗАЕС в лабораторних умовах”, “Обстеження в лабораторних умовах технічного стану зразків кабелів енергоблоку ВП ЗАЕС з ціллю продовження строку їх експлуатації” та “Обстеження технічного стану кабелів енергоблоку №3 ВП ЮАЕС в лабораторних умовах”, у яких здобувач був виконавцем окремих етапів.

Мета і задачі дослідження. Мета дослідження полягає у розробці та обґрунтуванні системи діагностики за трибоелектричним потенціалом для виявлення зміни поверхневих властивостей полімерної ізоляції в процесі старіння кабелів під дією сильного електричного поля, підвищеної температури та іонізуючого випромінювання.

Для досягнення мети в роботі поставлені такі задачі:

1. Провести аналіз сучасних публікацій, що присвячені природі виникнення об'ємних зарядів в полімерній ізоляції та актуальній на сьогоднішній день техніці їх виявлення в процесі старіння високовольтних кабелів.

2. Розробити математичну модель розподілу густини поверхневих зарядів на границі розділу двох діелектриків відповідно до теорії Максвелла – Вагнера із застосуванням схеми заміщення двошарової ізоляції та при наявності між ними повітряного зазору та тонкого дефектного шару на поверхні полімерної ізоляції.

3. Визначити вплив поверхневих зарядів на результати діагностичних обстежень за опором ізоляції силових кабелів зі зшитою поліетиленовою ізоляцією в початковому стані після експлуатації протягом 25 років при високій напрузі та після прискореного терморадіаційного старіння.

4. Експериментально визначити значення трибоелектричного потенціалу в залежності від конструктивного виконання кабелів, застосованих матеріалів та проаналізувати динаміку зміни контактної різниці потенціалу в процесі прискореного терморадіаційного старіння кабелів.

5. Удосконалити метод термо-трибоелектричного генерування поверхневих зарядів та обґрунтувати технологічні показники системи діагностики стану полімерної ізоляції за трибоелектричним потенціалом.

Об'єкт дослідження – процес старіння кабелів під дією сильного електричного поля, підвищеної температури, радіації, вологи, що призводить до зміни поверхневих властивостей полімерної ізоляції.

Предмет дослідження – діагностика поверхневих властивостей полімерної ізоляції в процесі старіння кабелів, що ґрунтується на вимірюваннях трибоелектричного потенціалу (контактної різниці потенціалу), обумовленого накопиченням трибозарядів на границі розділу контактуючих конструктивних елементів.

Методи дослідження: а) теоретичні – теорія електропровідності діелектриків в області слабких та сильних електричних полів для урахування накопичення просторових та поверхневих зарядів; теорія макроструктурної поверхневої поляризації гетерогенних діелектриків Вагнера – Максвелла для встановлення зміни в часі напруженості електричного поля та густини поверхневих зарядів; теорія електричного поля, інтегральні рівняння Фредгольма першого і другого роду, інтегральне перетворення Фур'є для отримання аналітичного рішення розподілу густини поверхневих зарядів на границі двох ізольованих провідників при наявності повітряного зазору та дефектного прошарку на поверхні ізоляції; зонна теорія контакту двох діелектриків для визначення контактної різниці потенціалу; спектральний аналіз для отримання спектрів трибоелектричного потенціалу кабелів в залежності від умов експлуатації; б) експериментальні – інтегральні функції розподілу трибоелектричного потенціалу; статистичний аналіз результатів вимірювань ємності та тангенсу кута діелектричних втрат витих пар неекранованого та екранованого кабелів; кореляційний аналіз часових залежностей трибоелектричного потенціалу, отриманих електростатичним вольтметром та цифровим мультиметром; математична обробка часових рядів трибоелектричного потенціалу шляхом фільтрації за допомогою нерекурсивного лінійного цифрового фільтру.

Наукова новизна отриманих результатів полягає у тому, що вперше:

– на основі застосування схеми заміщення двошарової ізоляції за допомогою введеного параметру, який дорівнює добутку струму на час заряджання, встановлено появу додаткових струмів під дією сильного електричного поля, що змінюються по експоненційному закону, та показана динаміка зміни в часі процесу накопичення, рекомбінації та релаксації поверхневого заряду на границі розділу двох діелектриків, один з яких зістарений в більшій мірі,

– визначено розподіл густини поверхневого заряду та падіння напруги по довжині симетричних ізолюваних провідників при наявності між ними повітряного зазору та тонкого дефектного шару на поверхні полімерної ізоляції на основі отриманого аналітичного рішення;

– визначено на основі експериментальних досліджень значення трибоелектричного потенціалу та встановлена динаміка зміни контактної різниці потенціалу в процесі прискореного терморадіаційного старіння полімерної ізоляції в залежності від конструктивного виконання і застосованих матеріалів кабелів (патент України на корисну модель №83470);

– досліджено вплив поверхневих зарядів та трибозарядів на результати діагностичних обстежень за опором ізоляції при високій напрузі та стабільність під час вимірювань ємності і тангенсу кута діелектричних втрат кабелів з полімерною ізоляцією;

– запропонована з обґрунтуванням та технічним забезпеченням система діагностики поверхневих властивостей полімерної ізоляції за трибоелектричним потенціалом, який пов'язано з накопиченням трибозарядів в процесі старіння силових, контрольних та інформаційних кабелів під дією сильного електричного поля, температури та радіації.

Практичне значення одержаних результатів роботи для електроенергетичної галузі:

1. З'ясовано, що діагностичні обстеження зістареної під дією сильного електричного поля полімерної ізоляції потребують більш тривалого часу витримки кабелів під випробувальною напругою заряджання.

2. Розроблено рекомендації щодо часу витримкування заземленими струмопровідних жил та металевих екранів (всіх металевих елементів) перед вимірюваннями для більш об'єктивної та достовірної оцінки стану ізоляції кабелів.

3. Визначено зв'язок додаткових заводів в інформаційних кабелях при порушення заземлення екранованих кабелів (обрив екрану з однієї сторони) з трибоелектричним потенціалом.

4. Визначено вплив механічних заводів при вимірюванні ємності та тангенсу кута діелектричних втрат при діагностичних обстеженнях кабелів за діелектричною абсорбцією. Встановлено, що механічні заводи призводять до підвищення значення тангенсу кута діелектричних втрат для ПВХ ізоляції та зменшення – для поліетиленової. Так, для обстежених силових кабелів спостерігається збільшення тангенсу кута діелектричних втрат на 30 % для ПВХ ізоляції і зменшення в 2 рази для поліетиленової ізоляції на частоті 120 Гц.

5. Обґрунтовано застосування малошумливих інтерфейсних кабелів та проведення математичної обробки часових рядів шляхом фільтрації для підвищення достовірності результатів діагностики за трибоелектричним потенціалом.

Результати дисертаційної роботи знайшли впровадження при виконанні діагностичних обстежень кабелів АЕС в рамках госпдоговірних тем з Харківською філією Інженерно-технічний центр «КОРО» та в навчальному процесі кафедри електроізоляційної та кабельної техніки Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут» при підготовці бакалаврів та магістрів за спеціальністю 050701 – техніка та електрофізика високих напруг.

Особистий вклад здобувача. Всі наукові результати, що викладені в дисертаційній роботі, отримані здобувачем самостійно. Серед них: теоретичні методи моделювання на основі теорії Максвелла – Вагнера для поверхневої поляризації розподілу в часі напруженості електричного поля в процесі старіння двошарової ізоляції при прикладанні постійної високої напруги; постановка задачі та отримання аналітичного рішення для густини поверхневих зарядів по довжині симетричних ізольованих провідників при наявності між ними повітряного зазору та тонкого дефектного шару на поверхні полімерної ізоляції з урахуванням зміни лінійних зарядів електродів; експериментальна перевірка можливості використання контактної різниці потенціалу в якості діагностичного параметру для оцінки зміни поверхневих властивостей полімерної ізоляції в процесі старіння кабелів; обробка та узагальнення результатів експериментальних досліджень за результатами вимірювань трибоелектричного потенціалу, ємності та тангенсу кута діелектричних втрат зразків силових кабелів в залежності від конструктивного виконання та застосованих матеріалів; обґрунтування рекомендацій щодо підвищення достовірності діагностичних обстежень кабелів АЕС; участь у впровадженні результатів досліджень.

Апробація результатів дисертації. Основні положення та результати роботи доповідались на: Всеукраїнському конкурсі студентських робіт з природних, технічних та гуманітарних наук (м. Одеса, 2011, 2012 р.р.), Міжнародних симпозиумах «Проблеми удосконалення електричних машин та апаратів. Теорія та практика. SIEMA» (м. Харків, 2013, 2014 р.р.), XXI – XXIII Міжнародних науково-практичних конференціях «Інформаційні технології: наука, техніка, технологія, освіта, здоров'я» (м. Харків, 2013–2015 р.р.), Міжнародній конференції «Функціональні матеріали Icfm'2013» (Ялта), Всеукраїнському науково-практичному семінарі «Сучасні методи обслуговування, експлуатації та ремонту кабельних мереж» (м. Харків, 2013).

Публікації. Основний зміст дисертації відображено у 17-х публікаціях, з них: 9 статей у фахових виданнях України (6 – у наукометричних базах), 1 патент України на корисну модель, 6 – у матеріалах конференцій,

Структура та обсяг дисертації. Дисертаційна робота складається зі вступу, чотирьох розділів, висновків, списку використаних джерел, додатків. Загальний обсяг дисертації становить 180 стор., з них: 94 рисунки по тексту; 3 рисунки на 3 окремих сторінках; 12 таблиць по тексту; списку використаних джерел з 135 найменувань на 16 сторінках, 2 додатків на 16 сторінках.

ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ

У вступі обґрунтовано актуальність теми, сформульовано мету та задачі досліджень, показана наукова новизна та практична цінність отриманих результатів. Наведено дані щодо апробації та публікації результатів досліджень.

Перший розділ присвячено проблемному аналізу науково-технічної інформації щодо виявлення та спостереження просторових зарядів в зразках ізоляції та силових кабелях високої напруги. Відзначено, що об'ємний заряд, як одна з головних причин старіння полімерної ізоляції високовольтних силових кабелів, змінює розподіл внутрішнього поля в діелектрику. Для спостереження профілю просторового заряду в товщі полімерної ізоляції застосовується сучасна техніка акустичної емісії, зокрема, метод акустичної емісії, стимульованої електричним полем (РЕА). Виявляється, що діагностика, яка оснований на вимірюванні струму об'ємної провідності, більш чутлива в порівнянні з технікою РЕА: порогові значення напруженості сильного електричного поля нижче значень, визначених за результатами вимірювань методом акустичної емісії, і становлять (4–7 кВ/мм) в залежності від температури проведення обстежень.

Встановлено, що в процесі старіння полімерної ізоляції кабелів під дією сильного електричного поля просторовий заряд накопичується на границях розділу електрод – діелектрик, діелектрик – діелектрик, тобто спостерігається зміна поверхневих властивостей полімерної ізоляції, як з внутрішньої, так і зовнішньої сторони. Але на цих границях розділу збільшується також і поверхневий заряд. Виникає необхідність у визначенні розподілу поверхневої густини зарядів при нещільному контакті двох діелектриків (уточнення моделі Максвелла – Вагнера) в процесі старіння полімерної ізоляції. Слід врахувати також появу трибозарядів в кабелях, які призводять до виникнення трибоелектричного потенціалу. Для цього доцільно експериментально визначити значення трибоелектричного потенціалу в різних конструкціях кабелів (силових, контрольних, телекомунікаційних) з різними полімерними матеріалами. Також потрібно проаналізувати динаміку зміни трибоелектричного потенціалу в процесі прискореного терморадіаційного старіння кабелів та обґрунтувати можливості діагностики поверхневих властивостей полімерної ізоляції кабелів за трибоелектричним потенціалом.

У другому розділі виконано математичне моделювання накопичення поверхневого заряду на пласкій границі розділу двох діелектриків на основі теорії Максвелла – Вагнера для міжфазної (поверхневої) поляризації та на основі схем заміщення двошарової ізоляції при прикладанні постійної високої напруги.

Двошарова ізоляція представлена схемою заміщення (рис. 1 а), на якій позначено: ємності швидких видів поляризації C_1, C_2 ; ланцюжки сповільнених видів поляризації $R_{11} - C_{11}; R_{22} - C_{22}$; опори витоку R_1, R_2 . Стрілками вказано обрані напрямки позитивних напрямів струмів в вітках. Відповідна дискретна резистивна схема заміщення двошарової ізоляції представлена на рис. 1 б. На основі розрахункових даних із застосуванням методу дискретних резистивних схем заміщення ізоляції отримано криві струму заряджання з відніманням струму абсорбції швидких видів поляризації в двошаровій ізоляції (рис. 2 а) при постійній напрузі 6 кВ. Встановлено, що в міру старіння ізоляції під дією сильного електричного поля

з'являються додаткові складові струму, які змінюються по експоненціальному закону (рис. 2 а), що свідчить про зростання поверхневих зарядів на границі розділу діелектриків.

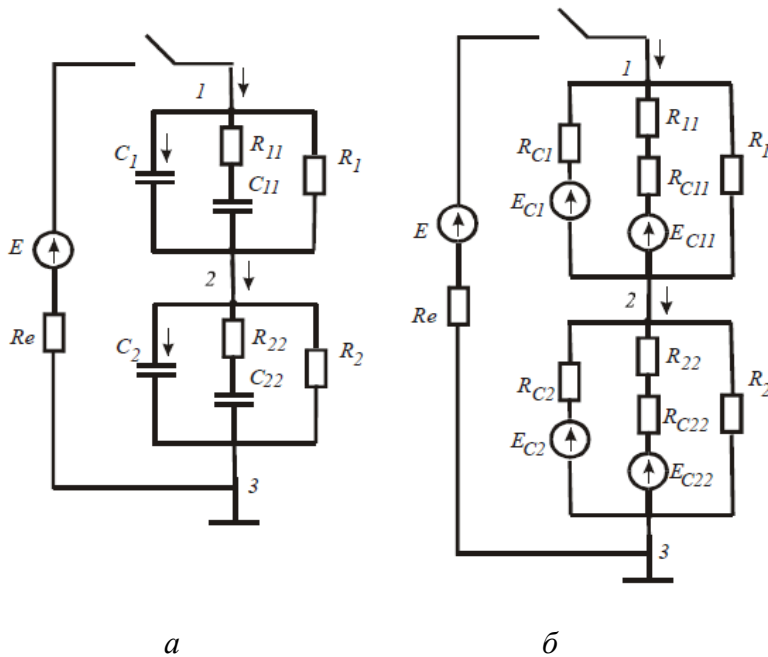


Рисунок 1 – Схема заміщення двохшарової ізоляції (а) та відповідна дискретна резистивна схема заміщення (б)

За допомогою введеного параметру, який дорівнює добутку струму на час заряджання, показана динаміка зміни в часі процесу накопичення, рекомбінації та релаксації поверхневого заряду на границі розділу двох діелектриків, один з котрих зістарений в більшій мірі (рис. 2 б). [Криві на рис. 2 отримано при наступних параметрах схеми заміщення рис. 1 а: крива 1 – однакові електрофізичні параметри двох діелектриків: $C_1=1000$ пФ, $\tau_1=500$ с, $C_2=C_1$, $\tau_2=500$ с (стала часу); крива 2 – $C_1=1000$ пФ, $\tau_1=500$ с, $C_2=9C_1$, $\tau_2=500$ с; крива 3 – $C_1=1000$ пФ, $\tau_1=500$ с, $C_2=9C_1$, $\tau_2=50$ с; крива 4 – $C_1=1000$ пФ, $\tau_1=500$ с, $C_2=9C_1$, $\tau_2=25$ с.]

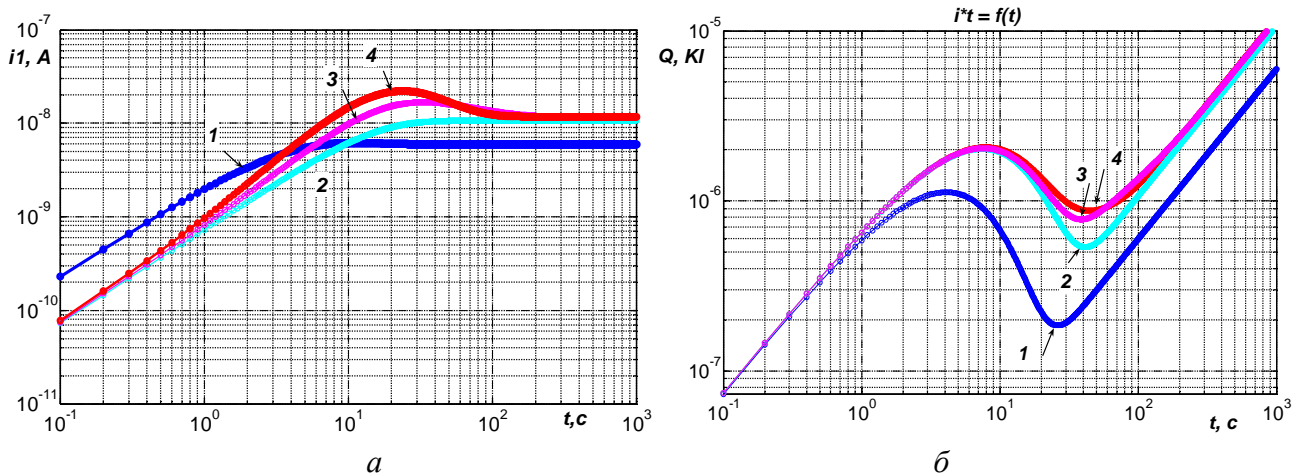


Рисунок 2 – Динаміка зміни кривих струму заряджання з відніманням струму абсорбції (а) та поверхневого заряду (б) від часу заряджання двохшарової ізоляції постійною напругою 6кВ

На рис. 3 а наведено математичну модель двох ізольованих провідників з лінійними зарядами електродів q_1 , q_2 (потенціалами електродів U_1 , U_2), розташованих симетрично відносно початку координат в точках з координатами $-c$ та $+c$ (рис. 3 а). Товщина ізоляції провідника d і відносна діелектрична проникність ϵ_2 . На поверхні ізоляції – прошарок дефектного діелектрика товщиною h_1 і діелектричною проникністю ϵ_3 , між ізольованими провідниками – повітряний зазор товщиною $2h$ та діелектричною проникністю ϵ_1 . На основі методу інтегральних рівнянь Фредгольма першого та другого роду від вихідної моделі з шматково-

однорідними ділянками здійснюється перехід до розрахунку поля в вакуумі. На границі розділу середовищ тангенціальна складова вектора напруженості електричного поля не змінюється при переході скрізь границю розділу: $E_{2t} = E_{3t}$, а нормальна – стрибкообразно змінюється: $\varepsilon_2 E_{2n} = \varepsilon_3 E_{3n}$ – на прикладі однієї з двох границь розділу (рис. 3 а): 2 (ізоляція) – 3 (прошарок дефектного діелектрика).

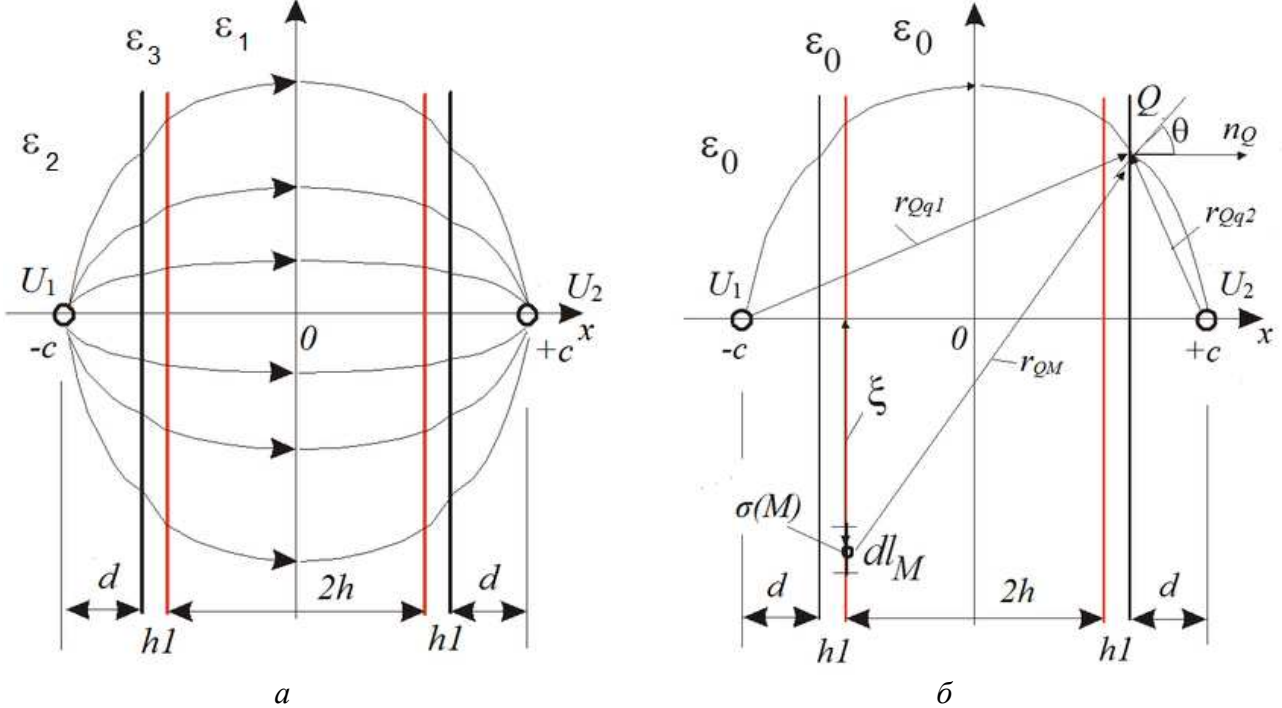


Рисунок 3. – Система двох лінійних зарядів, розташованих на глибині d під поверхнею ізоляції (а) та схема розрахунку з основними відстанями в вакуумі (б)

На рис. 3 б показана схема розрахунку і основні відстані: Q – довільна точка на одній з поверхонь розділу середовищ, де шукається напруженість поля, створена вторинними зарядами $\sigma(M)$ та джерелом поля; r_{QM} – відстань до точки Q від точки M , де розташовано вторинний заряд; ξ – поточна ордината точки M ; r_{Qq1} , r_{Qq2} – відстані до точки Q від точок q_1 , q_2 , де розташовано первинні заряди, які створюють поле в проміжку (заряди на жилах з потенціалами U_1 та U_2); n_Q – вектор нормалі до поверхні в точці Q ; θ – кут між векторами n_Q и r_{QM} .

Інтегральне рівняння Фредгольма другого роду для розрахункової (приведеної до вакууму) густини заряду на границі розділу ізоляція – прошарок дефектного діелектрика

$$\frac{\sigma(Q)}{2\varepsilon_0} - \frac{\varepsilon_3 - \varepsilon_2}{\varepsilon_3 + \varepsilon_2} \frac{1}{2\pi\varepsilon_0} \int_{S-\Delta S} \frac{\sigma(M) \cdot \cos(\vec{r}_{QM}, \vec{n}_Q) \cdot dl_M}{r_{QM}} = 0. \quad (1)$$

З введеними значеннями розрахункових параметрів

$$r_{QM} = \sqrt{(x_Q - x_M)^2 + (y_Q - y_M)^2} = \sqrt{(x_Q - x_M)^2 + (y_Q - \xi)^2}; \quad \cos(\theta) = \frac{x_Q - x_M}{r_{QM}}, \quad (x_Q - x_M) = h; \quad y_Q = \eta,$$

рівняння (1) записується у вигляді

$$\int_{S-\Delta S} \frac{\sigma(M) \cdot \cos(\bar{r}_{QM}, \bar{n}_Q) \cdot dl_M}{r_{QM}} = \int_{S-\Delta S} \frac{\sigma(M) \cdot \cos(\theta) \cdot dl_M}{r_{QM}} = \int_{-\infty}^{+\infty} \frac{\sigma(\xi) \cdot (x_Q - x_M) \cdot d\xi}{(x_Q - x_M)^2 + (y_Q - \xi)^2}. \quad (2)$$

При застосуванні інтегрального перетворення Фур'є $\int_{-\infty}^{\infty} \sigma(\eta) \cdot e^{j\eta u} \cdot d\eta = \bar{\sigma}(u)$ до лівої та правої частинам (2) замість інтегрального отримано лінійне рівняння відносно Фур'є – образів $\bar{\sigma}(u)$ функцій, які шукаються як

$$\bar{\sigma}_Q(u) - \frac{\varepsilon_3 - \varepsilon_2}{\varepsilon_3 + \varepsilon_2} \cdot e^{-uh} \cdot \bar{\sigma}_M(u) = 0, \quad (3)$$

де $\bar{\sigma}_Q(u)$, $\bar{\sigma}_M(u)$ - Фур'є – образи густини зарядів паралельних площин, які знаходяться на відстані h одна від одної та містять довільні точки Q і M . При цьому точка Q розташована в одній площині, а точка M – в іншій.

Для моделі, представленої на рис. 3 а, в якій два лінійних заряди, розташованих симетрично відносно вісі симетрії, а також дві пари симетричних площин із зарядами, система лінійних алгебраїчних рівнянь відносно невідомих Фур'є – образів густини зарядів (3) має вигляд

$$\begin{cases} \bar{\sigma}_1(u) = -q \cdot \sum_{k=0}^{\infty} \sum_{m=0}^k \sum_{n=0}^m C_{kmn} \cdot \sum_{i=3}^6 a_i \cdot e^{-L_i u} \\ \bar{\sigma}_2(u) = q \cdot \sum_{k=0}^{\infty} \sum_{m=0}^k \sum_{n=0}^m C_{kmn} \cdot \sum_{i=1}^2 a_i \cdot e^{-L_i u} \end{cases}. \quad (4)$$

Після переходу від образів (4) до оригіналів шукані густини поверхневих зарядів на границях розділу $\sigma_1(y)$ (між поверхнею ізоляції та прошарком дефектного діелектрика на поверхні ізоляції) та $\sigma_2(y)$ (між прошарком дефектного діелектрика та повітряного зазору між ізолюваними провідниками) визначається

$$\begin{cases} \sigma_1(y) = -\frac{q}{\pi} \cdot \sum_{k=0}^{\infty} \sum_{m=0}^k \sum_{n=0}^m C_{kmn} \cdot \sum_{i=3}^6 a_i \cdot \frac{L_i}{y^2 + L_i^2} \\ \sigma_2(y) = \frac{q}{\pi} \cdot \sum_{k=0}^{\infty} \sum_{m=0}^k \sum_{n=0}^m C_{kmn} \cdot \sum_{i=1}^2 a_i \cdot \frac{L_i}{y^2 + L_i^2} \end{cases}, \quad (5)$$

де $C_{kmn} = C_k^m \cdot C_m^n \cdot \left(\frac{\varepsilon_3 - \varepsilon_2}{\varepsilon_3 + \varepsilon_2} \right)^n \left(\frac{\varepsilon_1 - \varepsilon_3}{\varepsilon_1 + \varepsilon_3} \right)^{m-n} \cdot \left(-\frac{\varepsilon_3 - \varepsilon_2}{\varepsilon_3 + \varepsilon_2} \cdot \frac{\varepsilon_1 - \varepsilon_3}{\varepsilon_1 + \varepsilon_3} \right)^{k-m}$; C_k^m , C_m^n – поєднання без повторень, a_i , L_i – наведені в таблиці 1.

На рис.4 на основі отриманого аналітичного рішення (5) наведено розподіл уздовж вісі симетрії у густини поверхневих зарядів $\sigma_1(y)$ (суцільні лінії кривих) та $\sigma_2(y)$ (пунктирні лінії) подвійного електричного шару, утвореного, з однієї сторони, суцільною поліетиленовою ізоляцією та дефектним прошарком товщиною 10 мкм на її поверхні, а з другої, – дефектним прошарком та повітряним зазором товщиною 250 мкм між провідниками.

Таблиця 1 – Коефіцієнти формул аналітичного рішення

| i | a_i | L_i |
|-----|--|------------------------------------|
| 1 | $\frac{\varepsilon_3 - \varepsilon_2}{\varepsilon_3 + \varepsilon_2} \left(1 + \frac{\varepsilon_1 - \varepsilon_3}{\varepsilon_1 + \varepsilon_3}\right)$ | $c + (2m - 1)h + (2k - 2n)h_1$ |
| 2 | $\frac{\varepsilon_3 - \varepsilon_2}{\varepsilon_3 + \varepsilon_2} \left(1 + \frac{\varepsilon_1 - \varepsilon_3}{\varepsilon_1 + \varepsilon_3}\right)$ | $c + (2m + 1)h + (2k - 2n)h_1$ |
| 3 | $-\frac{\varepsilon_3 - \varepsilon_2}{\varepsilon_3 + \varepsilon_2} \cdot \frac{\varepsilon_1 - \varepsilon_3}{\varepsilon_1 + \varepsilon_3}$ | $c + (2m - 1)h + (2k - 2n + 1)h_1$ |
| 4 | $-\frac{\varepsilon_3 - \varepsilon_2}{\varepsilon_3 + \varepsilon_2} \cdot \frac{\varepsilon_1 - \varepsilon_3}{\varepsilon_1 + \varepsilon_3}$ | $c + (2m + 1)h + (2k - 2n - 1)h_1$ |
| 5 | $\frac{\varepsilon_1 - \varepsilon_3}{\varepsilon_1 + \varepsilon_3}$ | $c + (2m - 1)h + (2k - 2n - 1)h_1$ |
| 6 | $\frac{\varepsilon_1 - \varepsilon_3}{\varepsilon_1 + \varepsilon_3}$ | $c + (2m + 1)h + (2k - 2n + 1)h_1$ |

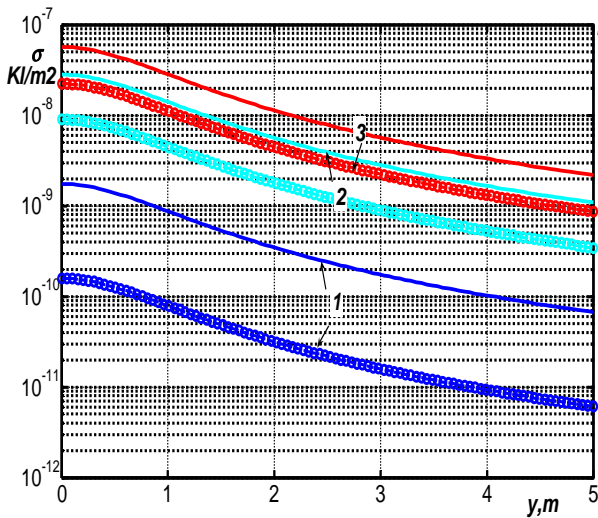


Рисунок 4 – Розподіл по довжині симетричних ізованих провідників густини поверхневих зарядів

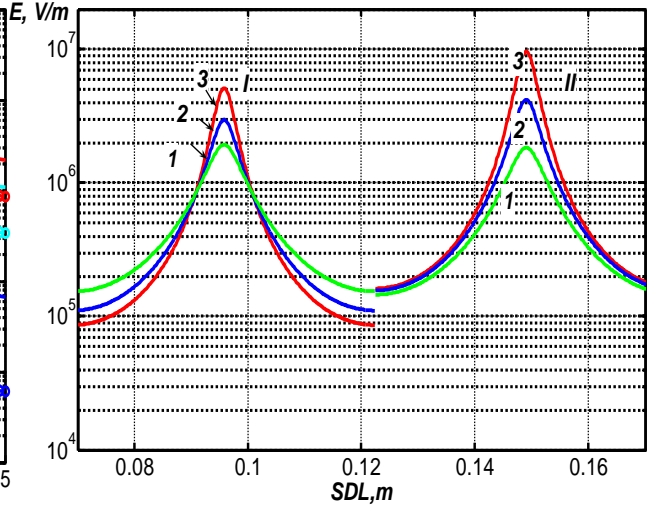


Рисунок 5 – Фрагмент розгортки напруженості електростатичного поля по поверхням ізоляції однієї жили та прошарку

Прошарок на поверхні ізоляції призводить до перерозподілу напруженості електричного поля на поверхні ізоляції (I) та самого прошарку (II) (рис.5). При збільшенні діелектричної проникності ε_3 прошарку в 4 рази (з 2,5 – крива 1 до 10 – крива 3; крива 2 – $\varepsilon_3=5$) напруженість електричного поля зростає в 2,5 та 5 разів на поверхні зшитої ізоляції та прошарку відповідно при потенціалі на жилах

± 3 кВ. Наявність окисненого прошарку на поверхні поліетиленової ізоляції призводить до появи сильного електричного поля, при якому спостерігається відхилення лінійної залежності струму провідності від прикладеної напруги. Розрахункові значення напруженості сильного електричного поля в діапазоні (5–7 кВ/мм) узгоджуються з наведеними в аналітичному огляді та результатами експериментальних досліджень для зістарених силових кабелів (рис. 6). Експериментальні

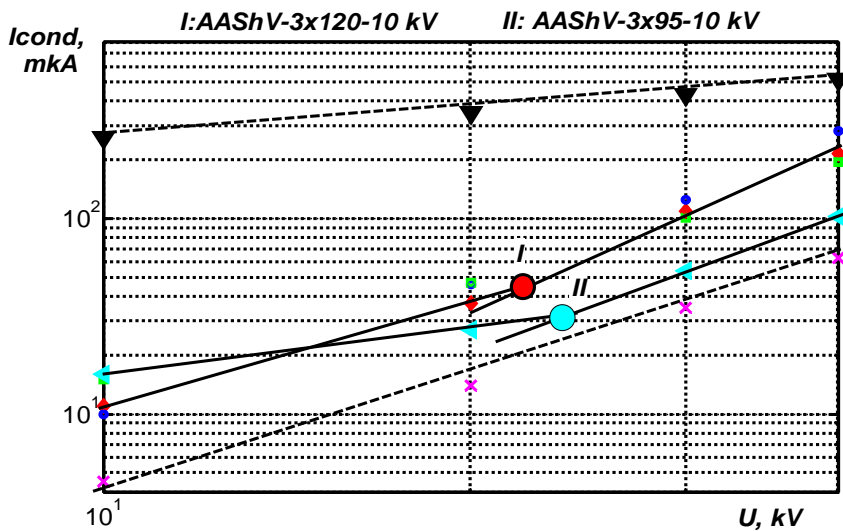


Рисунок 6 – Залежність струму провідності від випробувальної напруги для трьохфазних кабелів напругою 10 кВ

дані для струму провідності в залежності від випробувальної постійної напруги двох фаз різних кабелів (I та II) свідчать про старіння (окиснення) полімерної ізоляції: злам відбувається при напрузі 22 – 26 кВ (рис. 6, позначено кругом). Напруженість електричного поля в такому випадку становить 6 кВ/мм.

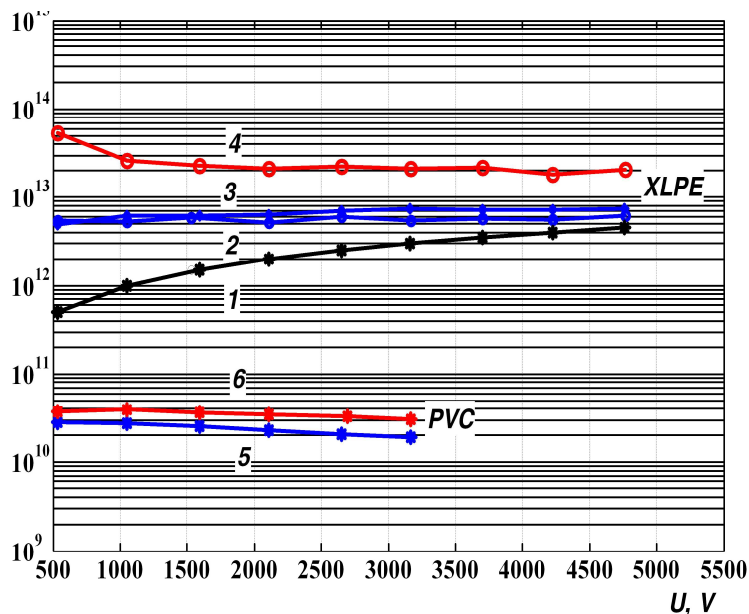


Рисунок 7 – Вплив часу стікання поверхневих зарядів на результати вимірювань опору ізоляції кабелів

Експериментально доведено, що наявність поверхневих зарядів в кабелях з високоякісною полімерною ізоляцією призводить до спотворення результатів діагностичних обстежень за опором ізоляції (рис. 7, криві 1, 2, 3 – без попереднього розрядження металевого екрану та струмопровідної жили одножильного силового кабелю зі зшитю поліетиленовою ізоляцією на напругу 6 кВ).

Стікання вільних зарядів під час довготривалого розрядження кабелю призводить до зміни характеру залежності (рис. 7, крива 4) та збільшення значень опору відносно початкового (до розрядження) стану. Для зразка силового кабелю з ПВХ-ізоляцією результати обстежень без розрядження (рис. 7, крива 5) та з роз-

ряджанням струмопровідних жил (рис. 7, крива б) мало відрізняються. Стала часу поверхневих зарядів в такій ізоляції значно менша часу розряджання та часу вимірювання, ніж в поліетиленовій ізоляції.

Важливо, що внаслідок постійного тертя конструктивних елементів одне об одне, в кабелях спостерігаються повільні процеси, обумовлені трибоелектризацією, генерацією трибозарядів та трибоелектричного потенціалу (контактної різниці потенціалу). Трибоелектричні ефекти впливають на дифузію продуктів деструкції полімерної ізоляції, структурно-фазові перетворення та відображають стан поверхні ізоляції.

У третьому розділі проаналізовано особливості прояву контактної різниці потенціалу при контакті двох діелектриків, що полягає у виникненні поверхні стану, на якій розташовуються можливі енергетичні рівні для електронів. За рахунок перерозподілу електронів на поверхнях контактуючих матеріалів виникає подвійний електричний прошарок з протилежними знаками електричних зарядів – електрична ємність, яка суттєво залежить від поверхневих властивостей полімерної ізоляції.

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

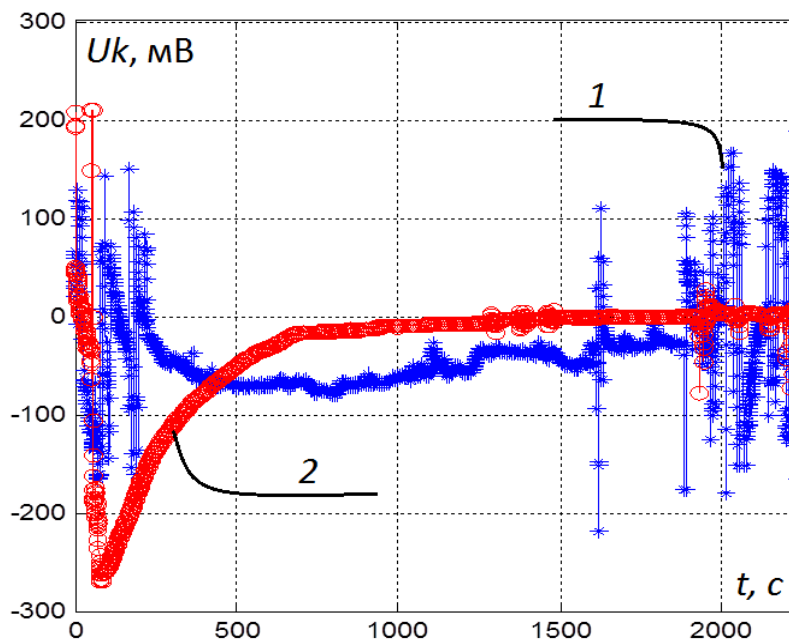


Рисунок 8 – Динаміка зміни контактної різниці потенціалу в процесі старіння кабелю з напівпровідними екранами

Експериментально доведено, що контактна різниця потенціалів суттєво залежить від діелектричних матеріалів та схеми обстеження силових кабелів. Наявність в конструкції кабелів зі зшитою ізоляцією напівпровідних екранів по жилі та ізоляції (рис. 8, крива 1) не призводить до зменшення контактної різниці потенціалу в порівнянні з кабелями без таких екранів (рис. 9 а, крива 1), що може бути пов'язано з впливом наночасток сажі в кабельній композиції. Експериментально

показано (рис. 8, 9 а), що контактна різниця потенціалу є чутливим параметром та може бути використана в якості показника стану поверхні полімерної ізоляції. В зразку одножильного силового кабелю на напругу 6 кВ після прискореного терморадіаційного старіння трибоелектричний потенціал зростає більше,

ніж в три рази (крива 2) в порівнянні з початковим станом (крива 1), а стала часу (напрямок зміни вказано стрілкою на рис.8) зменшується більше, ніж на порядок.

В силовому кабелі для контактуючих ізолюваних жил зшитим поліетиленом без напівпровідних екранів встановлено, що в процесі прискореного старіння контактна різниця потенціалу (рис. 9 а), навпаки, зменшується (крива 1 – до старіння, 2 – після старіння). З характером зміни потенціалу узгоджуються результати діагностики за ємністю (рис. 9 б) та тангенсом кута діелектричних втрат (рис. 9 в, для частоти 120 Гц): окиснення поверхні поліетиленової ізоляції призводить до збільшення шорсткості: зростанню пасток, в яких осідають трибозаряди, що призводить до зменшення контактної різниці потенціалу.

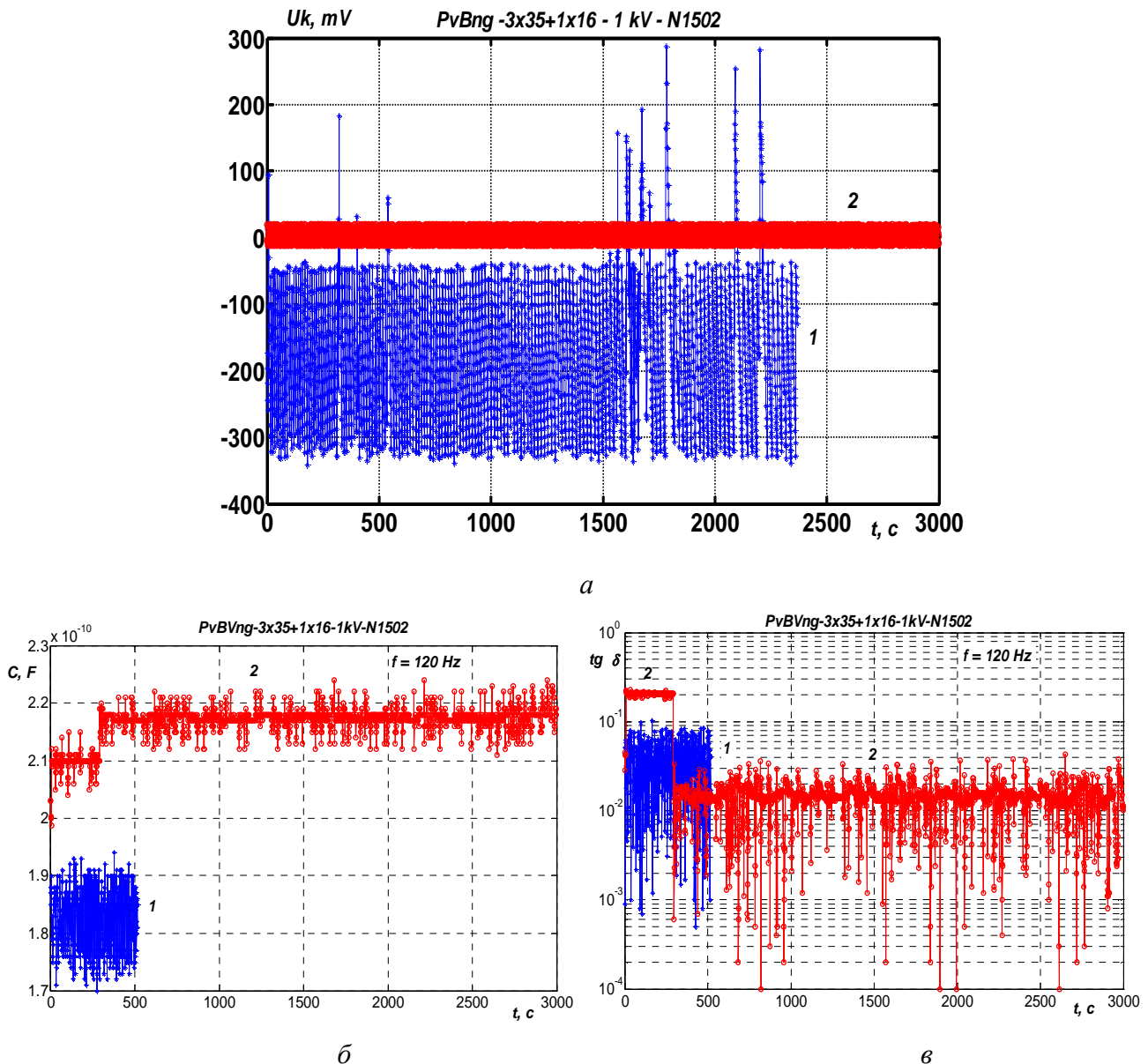


Рисунок 9 – Узгодженість зміни трибоелектричного потенціалу (а) з параметрами діелектричної абсорбції (б, в) в процесі прискореного терморадіаційного старіння

Важливо, що в процесі старіння спостерігається значне зменшення контактної різниці потенціалу (рис. 9 а): розмах в незістарому стані становить 660 мВ, після старіння – відсутній, при цьому спостерігається зростання ємності, зменшення тангенсу кута діелектричних втрат на частоті 100 Гц та зростання на частоті 1 кГц

(рис. 10). Це є непрямим доказом окиснення поверхні полімерної ізоляції в процесі терморадіаційного старіння кабелю: на окисненій зістареній поверхні ізоляції,

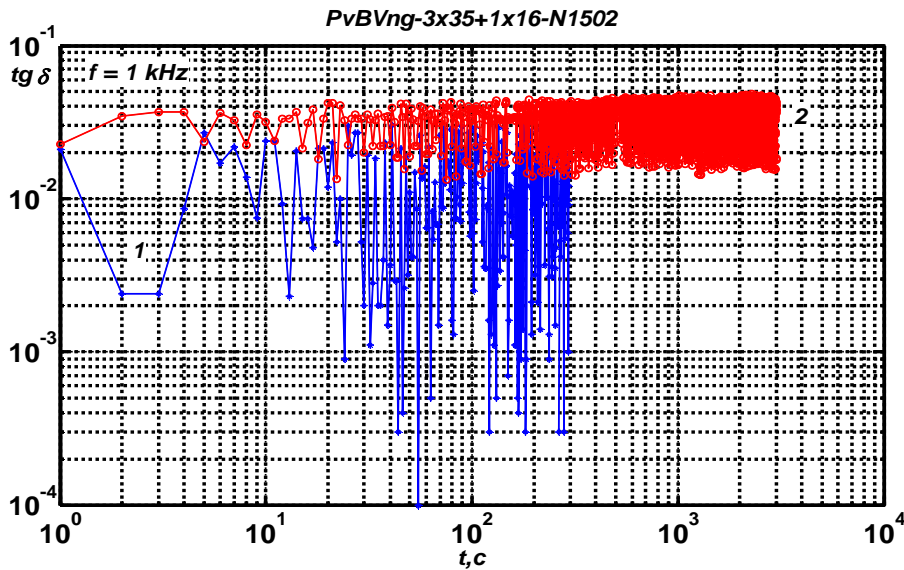


Рисунок 10 – Динаміка зміни тангенсу кута діелектричних втрат на частоті 1 кГц зразка силового кабелю в процесі старіння

як в пастках, залишаються трибозаряди, в результаті ємність зростає, рухливість, а значить і провідність вільних трибозарядів, зменшується (відповідно втрати зменшуються для частоти 100 Гц). В процесі старіння силових кабелів експериментально спостерігається

стерігається від'ємна кореляція для поліетиленової зшитої ізоляції без напівпровідних екранів та додатна для полівінілхлоридної ізоляції між трибоелектричним потенціалом та параметрами діелектричної абсорбції (ємністю та тангенсом кута діелектричних втрат на частоті 1 кГц), що свідчить про окиснення (старіння) поверхні полімерної ізоляції.

В кабелях з вулканізованою поліетиленовою ізоляцією та напівпровідними екранами по жилі та ізоляції непрямо, за результатами вимірювань контактної різниці потенціалу, встановлено, що сажонаповнені напівпровідні екрани уповільнюють процес окиснення поліетиленової ізоляції.

У четвертому розділі удосконалено метод термо-трибоелектричного генерування поверхневих зарядів та обґрунтовано технологічні показники системи діагностики поверхневих властивостей полімерної ізоляції кабелів за трибоелектричним потенціалом.

Діагностичні обстеження слід проводити без збудження трибозарядів шляхом циклу нагрівання – охолодження. Збудження трибоелектричного потенціалу призводить до значних значень трибоелектричного потенціалу не стільки завдяки трибозарядам, а скільки поверхневим зарядам, які присутні як на поверхні полімерної ізоляції, так і в просторі між ізольованими провідниками.

Система діагностики включає попереднє розрядження (заземлення) всіх металевих елементів кабелю для стікання поверхневих зарядів протягом часу, який перевищує сталу часу саморозряду τ полімерної ізоляції, та проведення вимірювань трибоелектричного потенціалу протягом часу, більшого за τ в 3 рази, при сталій температурі без циклу нагрів – охолодження зразків кабелів приладами з високим вхідним опором та гальванічною розв'язкою. Під час обстеження кабелів загальний металевий екран або металева оболонка не заземлюються. Значення

трибоелектричного потенціалу записуються в режимі реального часу в пам'ять комп'ютера. Передача значень трибоелектричного потенціалу з вимірювального приладу до комп'ютеру здійснюється за допомогою інтерфейсу RS-232 з оптичною розв'язкою. Загальний час вимірювання становить одну годину. Значення трибоелектричного потенціалу вимірюються дискретно, з інтервалом 0,5 с. Результати вимірювань трибоелектричного потенціалу представляються у графічному вигляді на екрані комп'ютеру.

За результатами обстежень зразків неекранованого UTP (unshielded twisted pair) та екранованого STP (shielded twisted pair) кабелів (рис. 11) встановлено, що

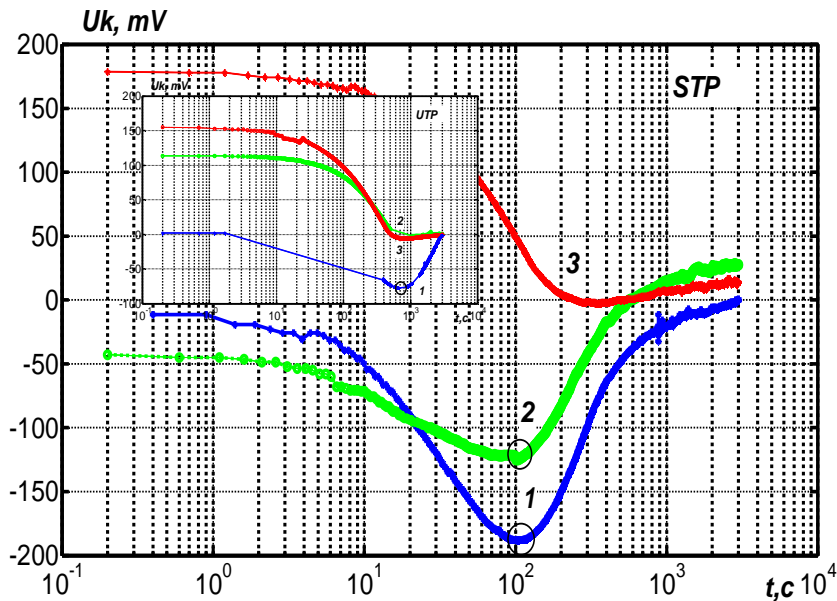


Рисунок 11 – Вплив екранованої камери на результати діагностичних обстежень кабелів

для останніх цілком прийнятно проведення діагностики без розміщення кабелю в екранованій заземленій камері (рис. 11, крива 1, STP). Для кабелю UTP вимірювання в екранованій заземленій камері (рис. 11, UTP, крива 2) призвело до зміни знака контактної різниці потенціалу (крива 3 – в екранованій незаземленій камері). При обстеженнях необхідно зберігати порядок (полярильність) підключення жил

та екранів (металевої оболонки) до клем приладу. В протилежному випадку знак та характер контактної різниці потенціалу може змінитися, тому що в контакті будуть знаходитися різні матеріали.

Порівняння результатів обстежень цифровим мультиметром та електростатичним вольтметром показує, що амплітуда вимірюваного сигналу вольтметром більша в два рази, та між результатами вимірювань слабка кореляція (на рівні 0,5). Причина полягає в високій чутливості електростатичного вольтметра: в результатах вимірювань присутні сторонні шуми, обумовлені в тому числі внутрішніми шумами самого приладу (особливо в області великих значень часу вимірювань (більше 1000 с). Обстеження повинні виконуватись при однаковій температурі. Інакше в провідниках можливо виникнення внутрішніх теплових шумів. Математична обробка шляхом фільтрації за допомогою нерекурсивного лінійного цифрового фільтру призвела до суттєвого, в 1,4 рази, збільшення коефіцієнту парної кореляції результатів обстеження мультиметром та електростатичним вольтметром: коефіцієнт кореляції становить 0,89. Таке високе значення позитивного коефіцієнту кореляції після фільтрації свідчить про сильний зв'язок між результатами вимірювань: коефіцієнт детермінації більше 50 %.

ВИСНОВКИ

В дисертаційній роботі вирішена науково-практична задача по розробці системи діагностики процесів старіння полімерної ізоляції кабелів під дією сильного електричного поля, що ґрунтується на вимірюваннях в часі трибоелектричного потенціалу (контактної різниці потенціалу), обумовленого накопиченням трибозарядів на границі розділу контактуючих конструктивних елементів кабелів. Процеси старіння полімерної ізоляції кабелів, як дисипативних структур, під дією сильного електричного поля, температури, вібрації, радіації, вологи, хімічно-агресивних речовин починаються з поверхневої сегрегації, що призводить до зміни властивостей, складу, структури саме поверхні полімерної ізоляції. Дослідження за динамікою зміни контактної різниці потенціалу в процесі старіння кабелів дає можливість виявити зміну поверхневих властивостей полімерної ізоляції.

1. Під час аналізу сучасних науково-технічних публікацій встановлено, що в процесі старіння кабелів під дією сильного електричного поля на границі діелектрик – діелектрик, як на міжфазних поверхнях, накопичуються поверхневі заряди. Визначена динаміка зміни в часі процесу накопичення, рекомбінації та релаксації поверхневого заряду на границі розділу двох діелектриків, один з котрих зістарений в більшій мірі.

2. Отримано аналітичне рішення для розподілу густини поверхневих зарядів на границях розділу симетричних ізольованих провідників при наявності між ними повітряного зазору та тонкого дефектного шару. Показано, що наявність на поверхні зшитої поліетиленової ізоляції окисненого прошарку призводить до підвищення напруженості електричного поля в 5 разів (з 2 кВ/мм до 10 кВ/мм), появи сильного електричного поля та прояву нелінійного характеру залежності між струмом провідності та високою прикладеною напругою. Результати розрахунку узгоджуються з наведеними даними в аналітичному огляді для силових кабелів високої напруги та результатами експериментальних досліджень.

3. Розроблено рекомендації щодо часу витримування заземленими струмопровідних жил, металевих екранів та оболонки кабелів для більш об'єктивної та достовірної оцінки стану полімерної ізоляції при діагностичних обстеженнях.

4. Експериментально визначені значення трибоелектричного потенціалу в інформаційних неекранованих та екранованих кабелях на основі витих пар, контрольних та силових кабелях зі зшитою поліетиленовою та полівінілхлоридною ізоляцією.

5. Підтверджено високу чутливість контактної різниці потенціалу в процесі старіння кабелів із полімерною ізоляцією до процесів старіння на основі встановленої експериментально динаміки його зміни, що свідчить про можливість застосування цього параметру в якості показника ступеню зміни поверхневих властивостей ізоляції.

6. Удосконалено метод термо-трибоелектричного генерування поверхневих зарядів шляхом попереднього розрядження кабелю для стікання поверхневих зарядів протягом часу, що перевищує сталу саморозряду, та вимірювання трибоеле-

ктричного потенціалу, обумовленого наявністю трибозарядів, при температурі оточуючого середовища без циклів нагріву та охолодження.

7. Розроблено рекомендації щодо застосування екранованої камери та фільтрації отриманих результатів під час проведення діагностики старіння кабелів за трибоелектричним потенціалом при обстеженні електростатичним вольтметром та цифровим мультиметром.

8. Результати дисертаційної роботи впроваджено в Харківській філії «Інженерно-технічний центр «КОРО» при оцінці технічного стану кабелів АЕС, що підтверджується актом впровадження. Запропоновані рекомендації дозволили зменшити вплив поверхневих зарядів на результати вимірювань опору ізоляції, ємності та тангенсу кута діелектричних втрат.

Результати досліджень використовуються в навчальному процесі кафедри електроізоляційної та кабельної техніки НТУ «ХПІ» при викладанні учбових дисциплін «Фізика діелектриків», «Фізика електростатичних процесів та технологій» та «Діагностика кабелів інформаційних мереж» для студентів спеціальності «Техніка та електрофізика високих напруг».

СПИСОК ОПУБЛІКОВАНИХ ПРАЦЬ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

1. Бойко А.М. Ефективність екранування витих пар / А.М. Бойко, Г.В. Безпрозванних // Вісник Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут». – 2011. – №41. – С. 29–35. *Здобувачем досліджено вплив матеріалу та товщини захисної оболонки на напруженість електричного поля.*

2. Бойко А.М. Обґрунтування товщини ізоляції витих екранованих пар структурованих кабельних систем / А.М. Бойко, Г.В. Безпрозванних // Вісник Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут». – 2011. – № 3. – С. 21–35. *Здобувачем виконано узагальнення результатів розрахунку чисельним методом.*

3. Бойко А.М. Експериментальне визначення трибоелектричного потенціалу в неекранованих та екранованих кабелях / Г.В. Безпрозванних, А.М. Бойко // Електротехніка і Електромеханіка. – 2012. – Харків: НТУ «ХПІ» – № 3. – С. 56–60. *Здобувачем виконано вимірювання трибоелектричного потенціалу та узагальнення результатів.*

4. Бойко А.М. Влияние конструктивных и технологических неоднородностей на волновое сопротивление коаксиальных радиочастотных кабелей / А.В. Беспрозванных, А.Г. Кессаев, А.Н. Бойко // Електротехніка і Електромеханіка. – 2013. – Харків: НТУ «ХПІ» – № 2 – С. 57–61. *Здобувачем запропоновано застосування методу дискретних резистивних схем заміщення для розрахунку.*

5. Бойко А.М. Електростатичні процеси в силових кабелях / Г.В. Безпрозванних, А.М. Бойко // Електротехніка і Електромеханіка. – 2013. – Харків: НТУ «ХПІ» – № 4. – С. 27–31. *Здобувачем виконано обстеження трибоелектричного потенціалу, ємності та тангенсу кута діелектричних втрат в зразках кабелів з різними матеріалами.*

6. Бойко А.Н. Дрейф во времени емкости и тангенса угла диэлектрических потерь неэкранированных и экранированных сетевых кабелей / А.Н. Бойко //

Вісник Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут». – 2013. – № 42 (948). – С. 65–68.

7. Бойко А.Н. Контактная разность потенциалов – как показатель степени старения полимерной изоляции силовых кабелей / А.В. Беспрозванных, А.Н. Бойко // *Електротехніка і Електромеханіка*. – 2014. – Харків: НТУ «ХПІ» – № 5. – С. 62–67. *Здобувачем запропоновано послідовність проведення обстежень зразків кабелів.*

8. Бойко А.Н. Распределение плотности поверхностных зарядов на границе раздела контактирующих изолированных проводников / А.В. Беспрозванных, А.Н. Бойко // *Технічна електродинаміка*. – 2014. – №6 – С. 18–23. *Здобувачем обґрунтовано застосування інтегрального перетворення Фур'є для отримання аналітичного рішення.*

9. Бойко А.Н. Обоснование и обеспечение технологических показателей трибоэлектрического метода контроля кабелей с полимерной изоляцией / А.В. Беспрозванных, А.Н. Бойко // *Електротехніка і Електромеханіка*. – 2014. – Харків: НТУ «ХПІ» – № 6. – С.56–60. *Здобувачем проведені обстеження та сформульовані основні вимоги до апаратного забезпечення системи діагностики.*

10. Беспрозванных 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. Публікація відомостей 10.09.2013, Бюл. № 17 про видачу патенту. *Здобувачем обґрунтовано формулу винаходу.*

11. Бойко А.Н. Влияние собственных шумов на результаты диагностических измерений диэлектрических параметров силовых кабелей со сшитой полиэтиленовой изоляцией / А.Н. Бойко // *Электрические сети и системы*. – 2013. – № 6. – С. 73–75.

12. Бойко А.М. Вплив екрану на параметри передачі витих екранованих пар структурованих кабельних систем / А.М. Бойко // *Телекомунікаційні системи та мережі, інформаційні мережі зв'язку: тези доповідей Всеукраїнського конкурсу студентських робіт з природних, технічних та гуманітарних наук 21–24 березня 2011 р.* – Одеса, 2011. – С. 3.

13. Бойко А.М. Трибоелектричний ефект в електроізоляційних конструкціях / Г.В. Беспрозванных, А.М. Бойко // *Інформаційні технології: наука, техніка, технологія, освіта, здоров'я: тези доповідей Міжнар. науково-практичної конф.* 15–17 травня 2012. – Харків, 2012. – С. 324. *Здобувачем виконано вимірювання трибоелектричного потенціалу кабелів.*

14. Бойко А.М. Оцінка точності розрахунку робочої ємності симетричної пари чисельним методом / А.М. Бойко // *Інформаційні технології: наука, техніка, технологія, освіта, здоров'я: тези доповідей Міжнар. науково-практичної конф.* 29-31 травня 2013 р. – Харків, 2013. – С. 178.

15. Boyko A.N. The influence of triboelectrical charges on the results of the dielectric characteristics measurement of the cross-linked polyethylene cables / G.V. Bezprozvannykh, A.N. Boyko // *Functional materials Icfm'2013: abstracts of internat. Conf.* September, 29 – October 5 2013. – Yalta, Haspra, 2013. – P. 475. *Здобувачем*

обґрунтовано час розрядження металевих частин кабелів.

16. Бойко А.М. Вплив поверхневої провідності на результати вимірювань опору ізоляції силових кабелів / А.М. Бойко // Інформаційні технології: наука, техніка, технологія, освіта, здоров'я: тези доповідей Міжнар. науково-практичної конф. 15–17 жовтня 2014 р. – Харків, 2014. – С. 205.

17. Бойко А.Н. Корреляция между контактной разностью потенциалов и параметрами диэлектрической абсорбции силовых кабелей в процессе терморрадиационного старения / А.Н. Бойко, А.В. Беспрозванных // Інформаційні технології: наука, техніка, технологія, освіта, здоров'я: тези доповідей Міжнар. науково-практичної конф. 20-22 травня 2015 р. – Харків, 2015. – С. 135. *Здобувачем встановлено кореляційний зв'язок між трибоелектричним потенціалом та параметрами діелектричної абсорбції.*

АНОТАЦІЇ

Бойко А.М. Діагностика полімерної ізоляції в процесі старіння кабелів під дією сильного електричного поля за трибоелектричним потенціалом. – На правах рукопису.

Дисертація на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук за спеціальністю 05.09.13 – техніка сильних електричних та магнітних полів. Національний технічний університет “Харківський політехнічний інститут”, Харків, 2015.

Дисертація присвячена розробці та обґрунтуванню діагностики за трибоелектричним потенціалом для виявлення зміни поверхневих властивостей полімерної ізоляції в процесі старіння кабелів під дією сильного електричного поля, підвищеної температури та іонізуючого випромінювання. В процесі старіння для двохшарової ізоляції на основі застосування схеми заміщення встановлено появу струмів, що змінюються по експоненціальному закону, та отримано динаміку в часі накопичення, рекомбінації та релаксації поверхневого заряду на границі розділу. Встановлено розподіл густини поверхневого заряду по довжині симетричних ізольованих провідників при наявності між ними зазору та тонкого дефектного шару на поверхні полімерної ізоляції на основі отриманого аналітичного рішення. Показано, що окиснений прошарок на поверхні ізоляції призводить до появи сильного електричного поля. В залежності від конструктивного виконання і застосованих матеріалів експериментально визначено значення трибоелектричного потенціалу та встановлена динаміка його зміни в процесі прискореного терморрадіаційного старіння кабелів. Встановлено вплив поверхневих та трибозарядів на результати діагностичних обстежень кабелів за опором ізоляції на високій напрузі. Запропонована діагностика за трибоелектричним потенціалом силових, контрольних та інформаційних кабелів дозволяє виявити зміну поверхневих властивостей полімерної ізоляції в процесі старіння кабелів.

Ключові слова: діагностика полімерної ізоляції, старіння кабелів, сильне електричне поле, густина поверхневого заряду, методи моделювання електричного поля, трибозаряди, контактна різниця потенціалу.

Бойко А.Н. Диагностика полимерной изоляции в процессе старения кабелей под действием сильного электрического поля с помощью измерения трибоэлектрического потенциала. – На правах рукописи.

Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 05.09.13 – техника сильных электрических и магнитных полей. Национальный технический университет “Харьковский политехнический институт”, Харьков, 2015.

Конструктивной и технологической особенностью силовых кабелей является плотное наложение полимерной изоляции на токопроводящую жилу. Наличие постоянного контакта (трения) конструктивных элементов приводит к процессу статической электризации, в результате чего на границах раздела накапливаются трибозаряды, возникает скачок потенциала – контактная разность потенциала (трибоэлектрический потенциал), двойной электрический шар и, как следствие, дополнительная емкость и диэлектрические потери. Наблюдение за динамикой изменения трибоэлектрического потенциала в процессе старения кабелей позволяет оценить состояние поверхности полимерной изоляции.

На основе полученного аналитического решения представлено распределение плотности поверхностных зарядов по длине двух симметричных изолированных проводников при наличии между ними воздушного зазора и тонкого дефектного слоя. Показано, что плотность поверхностных зарядов неравномерно распределяется вдоль оси симметрии. Наличие на поверхности сшитой полиэтиленовой изоляции окисленного слоя приводит к нелинейной зависимости тока проводимости от высокого приложенного напряжения, что согласуется с литературными и экспериментальными данными для состаренных силовых кабелей под действием сильного электрического поля. Экспериментально определены значения трибоэлектрического потенциала (контактной разности потенциала) в кабелях в зависимости от конструктивного исполнения, применяемых материалов и условий эксплуатации. Для одножильного силового кабеля со сшитой полиэтиленовой изоляцией на напряжение 6 кВ после ускоренного терморadiационного старения наблюдается значительный (в три раза) рост максимального значения контактной разности потенциала и смещение момента достижения максимума в сторону меньших значений. Это подтверждает высокую чувствительность трибоэлектрического потенциала и свидетельствует о возможности применения этого параметра в качестве показателя степени старения полимерной изоляции. Динамика изменения контактной разности потенциала в процессе старения силовых кабелей с разными материалами согласуется с результатами диагностических обследований по емкости и тангенсу угла диэлектрических потерь.

Ключевые слова: диагностика полимерной изоляции, старение кабелей, сильное электрическое поле, плотность поверхностного заряда, методы моделирования электрического поля, трибозаряды, контактная разность потенциала.

Boyko A.M. Diagnosis Polymeric Insulation in Aging Cables under Strong Field for Triboelectric Potential. - Manuscript.

Thesis for granting Candidate of Technical sciences Degree in specialty 05.09.13 – Technics of Strong Electric and Magnetic Fields. – National Technical University "Kharkiv Polytechnic Institute", 2015.

The thesis is devoted to development and diagnostic system for substantiation triboelectric potential to detect changes in surface properties of polymer isolation in aging cables under the strong electric field, high temperature and radiation. The distribution of surface charge density and voltage drop along the length of symmetrical insulated conductors in the presence of the gap between them and the defective thin layer on the surface of the polymer insulation was established based on the analytical solution. Experimentally determined the values of triboelectric potential and its dynamics of change in the process of accelerated thermoradiation aging polymer cable insulation depending on the design of applied materials. There is a significant (threefold) increase in the maximum value of the contact potential difference and achieve maximum torque bias towards smaller values for single core power cables with cross-linked polyethylene insulation 6 kV after accelerated aging thermoradiation. This confirms the high sensitivity of triboelectric potential to aging and allows us to make a suggestion to use this parameter as an indicator of the polymeric insulation aging degree. Influence of surface charges and tribocharges on the results of diagnostic tests on the insulation resistance and stability during the measurement capacitance and dielectric loss tangent cables with polymer insulation was observed. Dynamics of changes in contact potential difference in the aging process power cables with different materials remains consistent with the results of diagnostic tests of capacity and dielectric loss tangent.

Keywords: diagnostics polymer insulation, aging cables, strong electric field, surface charge density, electric field modeling techniques, tribocharges, contact potential difference.

