

**НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ
“ХАРКІВСЬКИЙ ПОЛІТЕХНІЧНИЙ ІНСТИТУТ”**

Федяй Анна Сергіївна

УДК 621.319.4

**УДОСКОНАЛЕННЯ КОНТРОЛЮ ЕЛЕКТРОІЗОЛЯЦІЇ
КАБЕЛІВ З ЕКРАНОВАНИМИ ВИТИМИ ПАРАМИ**

Спеціальність 05.09.13 – техніка сильних електричних
та магнітних полів

Автореферат дисертації
на здобуття наукового ступеня
кандидата технічних наук

Харків-2007

Дисертацією є рукопис

Робота виконана в Національному технічному університеті “Харківський політехнічний інститут”, Міністерство освіти і науки України, м. Харків

Науковий керівник: доктор технічних наук, професор
Набока Борис Григорович,
Національний технічний університет
“Харківський політехнічний інститут”,
професор кафедри електроізоляційної
та кабельної техніки

Офіційні опоненти: доктор технічних наук, професор
Рудаков Валерій Васильович,
Національний технічний університет
“Харківський політехнічний інститут”,
завідувач кафедри інженерної електрофізики

доктор технічних наук, професор
Бржезицький Володимир Олександрович,
Національний технічний університет України
“Київський політехнічний інститут”,
завідувач кафедри техніки високих напруг

Захист відбудеться “20” вересня 2007 р. о 14 годині 30 хвилин на засіданні спеціалізованої вченої ради Д.64.050.08 при Національному технічному університеті “Харківський політехнічний інститут” за адресою: 61002, м. Харків, вул. Фрунзе, 21.

З дисертацією можна ознайомитись в бібліотеці Національного технічного університету “Харківський політехнічний інститут”

Автореферат розісланий “10” липня 2007 р.

Вчений секретар
спеціалізованої вченої ради

Марков В.С.

ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

Актуальність теми. Кабелі з екранованими витими парами (ЕВП) – окремих випадок широкого класу контрольних кабелів. Вони складніші у виготовленні і дорожчі звичайних багатожильних контрольних кабелів. Екранування застосовують для підвищення завадостійкості витих пар. Кабелі з ЕВП, що використовуються у відповідальних системах контролю енергоблоків АЕС, розраховані на тривалу дію підвищеної температури (до 60 °С), майже стопроцентної вологості повітря, дії опромінення низької інтенсивності (до поглиненої дози 30 Мрад за 30 років нормальної експлуатації). Їхня електроізоляція виготовляється з радіаційно зшитого поліетилену (не плавиться навіть при 200 °С), обмотка пар – з поліімідної плівки, що має надзвичайно високу теплову та радіаційну стійкість. Екрани виконують з мідних дротинок, покритих олов'яно-свинцевим припоєм. Це захищає їх від корозії під впливом жирних органічних кислот, що утворюються внаслідок радіолізу поліетилену (розкладу під впливом радіації). Кабелі мають дві захисні оболонки – внутрішню і зовнішню, між якими розміщений додатковий екран з мідної стрічки. Наявність екранів пар та загального екрану дає змогу вести контроль цілісності внутрішньої оболонки електричними методами.

Складна досконала конструкція, застосування матеріалів, стійких до дії підвищених температур, радіації, вологості, причому не тільки за нормальних умов експлуатації, а й в разі розриву трубопроводів першого контуру охолодження реактора (при так званій максимальній проектній аварії, коли температура всередині гермозони може підвищитися до 150 °С, тиск водяного пара – до 0,5 МПа, інтенсивність опромінення в сотні-тисячі разів) призводять до того, що помітити деградацію ізоляції кабелів гермозони електричними методами дуже складно.

Удосконалення контролю ізоляції кабелів електричними (неруйнівними) методами дозволить зменшити кількість зразків, що відбираються для лабораторних обстежень руйнуючими методами. Проблема відбору зразків стає дедалі актуальнішою внаслідок вичерпання резервних ліній протягом тривалої експлуатації кабелів. Чим рідше будуть відбиратися зразки для механічних випробувань, тим менше ймовірність ушкодження працюючих кабелів. Електричні вимірювання можуть виконуватися при кожному планово-попереджувальному ремонті, що дозволить спостерігати за дрейфом параметрів і прогнозувати момент настання критичного стану кабелів. Необхідними умовами для цього є знаходження способів електричного контролю, чутливих до процесів старіння ізоляції й захисних оболонок, а також установлення кореляції з відомими критеріями граничного стану кабелів.

Зв'язок роботи з науково-дослідними програмами. Дисертаційна робота виконана на кафедрі електроізоляційної та кабельної техніки НТУ "ХПІ" та пов'язана з участю здобувача як виконавця в науково-дослідних роботах за госпдоговорами: "Обстеження технічного стану кабелів КПЭТИ

енергоблоку №3 ВП РАЕС з метою продовження терміну експлуатації”, “Обстеження технічного стану зразків кабелів енергоблоку №1 ВП РАЕС з метою продовження терміну їхньої експлуатації”, “Розробка методик обстеження технічного стану кабелів ВП ЮУАЕС неруйнівними методами”, (“СЕРТЦентр АСУ”, м. Харків).

Мета і задачі дослідження. Метою роботи є удосконалення контролю електроізоляції кабелів з екранованими витими парами шляхом аналізу величин ємностей та тангенсів кутів діелектричних втрат різних ізоляційних проміжків ЕВП, а також змін властивостей поверхні ізоляції в ході старіння аж до моменту досягнення критичного технічного стану.

Для досягнення вказаної мети поставлені наступні задачі:

1. Провести дослідження електричних та механічних характеристик зразків кабелів з ЕВП, відібраних з енергоблоків АЕС після тривалої експлуатації за нормальних умов у вихідному стані, а також після додаткового радіаційно-термічного старіння зразків, що імітує умови максимальної проектної аварії.

2. Розробити модель області сильного електричного поля (всередині ЕВП) з метою визначення часткових ємностей та напруги початку часткових розрядів (ЧР) – як важливих діагностичних показників якості ЕВП.

3. Розробити модель області слабого електричного поля (між окремими ЕВП) з метою визначення прохідних ємностей, характеристики яких можуть бути використані для побічної оцінки якості захисних оболонок кабелів.

Об'єкт дослідження – процес старіння контрольних кабелів з екранованими витими парами, що використовуються для передачі сигналів термодатчиків і потоку нейтронів в енергоблоках АЕС.

Предмет дослідження – способи контролю електроізоляції кабелів, засновані на вимірюванні електричних характеристик при змінній нарузі.

Методи дослідження. Енергія електричного поля, що розсіюється у твердій фазі ізоляційних проміжків ЕВП, оцінювалася на основі методів фізики діелектриків, теорії поля, інтегральних рівнянь Фредгольма першого й другого роду для плоскопаралельних систем. Виявлення змін поверхневих властивостей ізоляції в процесі старіння кабелів здійснювалося шляхом збудження високою напругою часткових розрядів в ізоляційних проміжках ЕВП і вимірювання їхньої частоти. Аналіз результатів експериментальних досліджень виконувався з використанням інтегральних функцій розподілу вимірюваних величин, побудованих у функціональних масштабах нормального й логарифмічно нормального законів розподілу. Значимість змін параметрів кабелів після старіння оцінювалася за допомогою критеріїв Фішера й непараметричного критерію Т'юкі.

Наукова новизна одержаних результатів полягає в наступному.

1. Встановлено, що величини ємностей і тангенсів кутів діелектричних втрат ізоляційних проміжків ЕВП залежать від дольового вмісту твердої фази діелектрика, еліпсоїдності екрану, а також від наявності на поверхні ізоляції низькомолекулярних продуктів її розпаду.

2. Розроблено загальну математичну модель ЕВП з еліптичним екраном, в якій враховані відмінності діелектричних проникностей твердих та газових фаз ізоляційних проміжків, циліндричність поверхні жил, ізоляції, еліптичність форм екрану та стрічкової обмотки. Модель використана для оцінки критичних напруженостей електричного поля, а також діапазонів допустимих значень ємностей і тангенсів кутів діелектричних втрат, характерних для нормального стану ізоляції (при відсутності на її поверхні низькомолекулярних продуктів розпаду) - так звана C -tgд діаграма.

3. Запропоновано здійснювати контроль електроізоляції за допомогою C -tgд діаграми за прямими та сукупними характеристиками ізоляційних проміжків в чотирьох характерних областях кабелів з ЕВП. Встановлено, що зміни параметрів ємностей і тангенсів кутів діелектричних втрат ізоляційних проміжків ЕВП відбуваються в процесі старіння ізоляції доти, поки вона зберігає еластичність (відносне видовження при розриві залишається вище 50 %). Після досягнення критичного стану (при крихкій ізоляції) зміни зазначених параметрів можливі через утворення тріщин і гігроскопічного поглинання атмосферної вологи.

4. Показано, що гігроскопічне зволоження проявляється у збільшенні тангенса кута діелектричних втрат саме міжкранного простору, що може бути використане для контролю цілісності оболонки.

5. Запропоновано додатковий параметр оцінки технічного стану ЕВП по частоті ЧР в ізоляційних проміжках області сильного поля. Для зістареної ізоляції характерна більш висока частота, що пов'язано з більшою швидкістю розтікання поверхневих зарядів.

Практичне значення одержаних результатів.

1. Контроль електроізоляції кабелів змінною напругою за параметрами ємностей і тангенсів кутів діелектричних втрат ізоляційних проміжків ЕВП дозволяє виключити шунтуючий вплив ділянок зі зниженим опором – гермопроходок енергоблоків АЕС. В результаті стає можливою діагностика кабелів в умовах експлуатації, стає зайвим відбір зразків для лабораторних обстежень.

2. Порівняння параметрів ЕВП з допустимими за допомогою C -tgд діаграми полегшує інтерпретацію результатів аналізу: зміни геометричних розмірів ізоляції (через набрякання або усадку) відбиваються на часткових ємностях; поява й зникнення продуктів розпаду ізоляції - на тангенсах кутів діелектричних втрат. Це дозволяє підвищити чутливість контролю до процесів старіння та зволоження електроізоляції кабелів з ЕВП.

3. Зіставлення результатів досліджень ЕВП зразків кабелів КПЭТИ у вихідному стані та після додаткового старіння дало змогу висунути ознаку досягнення критичного стану: завершення значущих змін параметрів C -tgд діаграм. Систематичні спостереження за параметрами C і tgд кабелів з ЕВП протягом старіння дозволяють виявляти момент досягнення критичного стану.

Рекомендації, сформульовані в роботі, використані при розробці методик обстеження контрольних кабелів з радіаційно-зшитою ізоляцією Харківським госпрозрахунковим підрозділом “СЕРТЦентр АСУ” (м.Харків)

за темою “Розробка методик обстеження технічного стану кабелів ВП ЮУАЕС електричними методами”. Результати роботи використані в учбових дисциплінах: “Методи випробувань електричної ізоляції”, “Контроль технічного стану та діагностика якості електричної ізоляції”, які викладаються на кафедрі електроізоляційної та кабельної техніки НТУ “ХПІ”.

Особистий внесок здобувача в результати, що отримані та викладені в дисертації: розроблена розрахункова модель екранованої витієї пари з еліптичним екраном; обґрунтовані нормативні величини ємностей і тангенсів кутів діелектричних втрат ізоляційних проміжків, що відрізняються вмістом твердої фази; виконані систематичні дослідження параметрів ізоляційних проміжків протягом тривалого старіння зразків кабелів в лабораторних умовах.

Публікації. Основний зміст роботи відображений в 10 публікаціях, з яких 8 – у фахових виданнях ВАК України.

Апробація роботи. Результати роботи доповідались на науково-технічних конференціях: “Актуальні проблеми наглядно-профілактичної діяльності в МНС” (Харків: АЦЗУ, 2003, 2004); Міжнародна науково-технічна конференція “Конструкційна міцність матеріалів і ресурс обладнання АЕС” (Київ 2004); “Проблеми удосконалення електричних машин і апаратів” (Харків, 2005, 2006); “Інформаційні технології: наука, техніка, технологія, освіта, здоров’я” (Харків, 2005, 2006); “Нові розробки в галузі електричної ізоляції” (Харків, 2005).

Структура й обсяг дисертації. Дисертація складається зі вступу, п’яти розділів, висновків та додатків. Повний обсяг дисертації складає 146 стор.; 50 ілюстрацій по тексту, з яких 4 – на окремих сторінках; 10 таблиць по тексту; 4 додатка на 22 стор.; 82 використаних літературних джерела на 4 стор.

ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ

У вступі обґрунтовано актуальність теми, сформульовано мету та задачі дослідження, показано наукову новизну та практичне значення отриманих результатів.

В першому розділі проведено аналітичний огляд науково-технічних публікацій за темою, існуючих методів визначення технічного стану кабелів АЕС, показано, що традиційні методи, що спираються на випрямлену напругу, не дозволяють виявляти приховані процеси старіння комбінованої ізоляції, коли деструкція слабшого компонента не помітна на фоні сильнішого. Вказано, що застосування змінних напруг має певні переваги в цьому плані, але методика їх застосування ще потребує доопрацювання. В кабелях з екранованими витієми парами виділено дві області – внутрішню (де може бути створене сильне електричне поле) та зовнішню (де електричне поле в тисячі разів слабкіше). Ставиться задача обстеження кожної з цих областей окремо.

В другому розділі обґрунтовано модель ЕВП (рис.1) з круговими поверхнями жил, ізоляції та *еліптичним* екраном і відповідною поверхнею стрічкової обмотки. В моделі ЕВП враховано різні діелектричні проникності

ізоляційних матеріалів твердої фази (ϵ_2), газової фази (ϵ_1) та плівкової обмотки (ϵ_3).

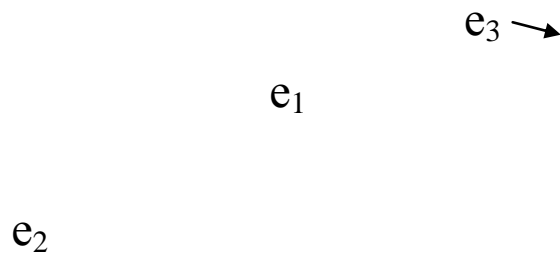


Рис.1. Модель ЕВП з екраном еліптичної форми при $b/a = 0,75$. Показані основні вузли на поверхнях жил, ізоляції, обмотки та допоміжні вузли по перерізу ізоляції жил.

Розрахунок поля зводиться до розв'язку системи лінійних алгебраїчних рівнянь (СЛАР) за методом вторинних зарядів

$$\bar{A} \cdot \bar{\sigma} = \bar{U} \quad (1)$$

де: $\bar{\sigma}$ - матриця-стовпчик *розрахункової* (приведеної до вакууму) густини вторинних зарядів, Кл/м²; \bar{U} - матриця-стовпчик потенціалів для вузлів на поверхнях електродів або нулів - для вузлів на межах розподілу діелектричних середовищ; \bar{A} - матриця коефіцієнтів, елементи a_{ij} якої знаходяться за формулами, що витікають з інтегральних рівнянь Фредгольма першого роду для потенціалів у вузлах на електродах або другого роду - для стрибка нормальної складової напруженості електричного поля у вузлах на межах розподілу діелектричних середовищ:

$$a_{ij} = \left\{ \begin{array}{l} \frac{1}{2\pi\epsilon_0} \ln \frac{r_{0j}}{r_{ij}} \cdot \Delta l_j \quad \forall i \neq j \\ \frac{1}{2\pi\epsilon_0} \ln \frac{r_{0j}}{\Delta l_j / (2e)} \cdot \Delta l_j \quad \forall i = j \end{array} \right\} i = 1 \div N_e, \quad (2)$$

$$\left. \begin{array}{l} \frac{1}{2\epsilon_0} \quad \forall i = j \\ -\alpha \cdot \frac{1}{2\pi\epsilon_0} \ln \frac{\cos \overline{\overline{\mathbf{r}}_{ij}, \overline{\overline{\mathbf{n}}}_j}}{r_{ij}} \cdot \Delta l_j \quad \forall i \neq j \end{array} \right\} i = N_e + 1 \div N,$$

де: i – номер вузла, в якому знаходяться характеристики поля; j – номер вузла, в якому розміщений заряд; r_{ij} – відстань між точками i та j ; r_{0j} – відстань від точки j до точки O з нульовим потенціалом (зазвичай приймають $r_{0j} = 1\text{м}$ для моделей, переріз яких лежить в сантиметровому діапазоні); $\cos \overline{\overline{\mathbf{r}}_{ij}, \overline{\overline{\mathbf{n}}}_j}$ – косинус кута між векторами $\overline{\overline{\mathbf{r}}}_{ij}$ та $\overline{\overline{\mathbf{n}}}_j$ (вектором нормалі до межі розділу середовищ в точці i); α – параметр, пов'язаний з діелектричними проникностями суміжних середовищ: при орієнтації вектора нормалі з e_2 в e_1 параметр $\alpha = \frac{\epsilon_2 - \epsilon_1}{\epsilon_2 + \epsilon_1}$, а якщо з e_1 в e_3 то $\alpha = \frac{\epsilon_1 - \epsilon_3}{\epsilon_1 + \epsilon_3}$; Δl_j – довжина j -го відрізка межі розподілу середовищ; ϵ_0 – електрична стала; e – основа натуральних логарифмів; N_e – число вузлів на електродах (жилах та екрані); N – загальна кількість основних вузлів (на електродах та на межах розподілу різних діелектричних середовищ).

В результаті чисельного розв'язку СЛАР (1) знаходяться σ_i , а за ними і напруженості поля:

а) на поверхнях електродів – за формулою, що витікає з теореми Гауса-Остроградського

$$E_i = \frac{\sigma_i}{\epsilon_0}, \quad (3)$$

б) на межах розподілу діелектричних середовищ (нормальна складова напруженості) – за відповідною формулою

$$E_i = \frac{\sigma_i}{2\epsilon_0} \left(1 + \frac{1}{\alpha}\right). \quad (4)$$

Істинна густина поверхневого заряду σ' , за якою власне і визначається повний заряд Q та ємність електроду $C = Q/U$, в e_2 разів більша

$$\sigma' = \epsilon_2 \cdot \sigma. \quad (5)$$

Часткові та сукупні ємності ізоляційних проміжків залежать від форми екрану. Для сплюсненої форми (співвідношення півосей еліпсів b/a росте) зростають ємності жил на екран (за рахунок зменшення довжини ізоляційних проміжків) і зменшується ємність між жилами (за рахунок “відтягування” частини силових ліній на екран). Тому відношення ємностей C_{1e}/C_{12} зростає.

Саме за умови, що $b/a \approx 0,75$ отримали найкращу відповідність розрахункових та експериментальних ємностей – таблиця 1.

Таблиця 1.

Вплив геометрії екрану на параметри часткових та сукупних ємностей ЕВП, пФ/м.

b/a	C_{12}	C_{1-e}	C_{1-2e}	C_{12-e}	C_{1-e}/C_{12}
1	20,1	74,0	93,8	148	3,68
0,9	19,4	79,2	97,8	158	4,08
0,8	18,4	87,3	104	175	4,74
0,75	17,8	93,6	109	187	5,26
0,7	17,0	103	116	206	6,06

Тому надалі саме це співвідношення півосей еліпсу застосовувалось і при аналізі діелектричних втрат в ізоляційних проміжках ЕВП. Тут позначено: C_{12} - часткова ємність між жилами 1 і 2; C_{1-e} – часткова ємність жили 1 на екран; C_{1-2e} – сукупна ємність жили 1 відносно жили 2 та екрану; C_{12-e} – те саме для двох жил разом відносно екрану.

Діелектричні втрати в ізоляційних проміжках. Кожен із означених вище ізоляційних проміжків ЕВП має різну долю твердої фази. Внаслідок цього відрізняються також і їхні діелектричні втрати. Знайдемо діелектричні втрати проміжків ($\text{tg}\delta$) через $\text{tg}\delta_d$ власне самого твердого діелектрика та долю з енергії, що накопичується в твердій фазі

$$\text{tg}\delta = z \text{tg}\delta_d, \quad (6)$$

де в залежності від ізоляційного проміжку для параметра z можемо записати формули:

$$\eta_{12} = \frac{\xi W_1 + W_2}{\frac{Q_2 U_1}{2}}; \quad \eta_{1-e} = \frac{(1-\xi)W_1 + W_2}{\frac{Q_3 U_1}{2}}; \quad \eta_{1-2e} = \frac{W_1 + W_2}{\frac{Q_1 U_1}{2}}; \quad \eta_{12-e} = \frac{W_1 + W_2}{\frac{Q_1 U_1}{2} + \frac{Q_2 U_1}{2}}, \quad (8)$$

W_1 – енергія, що накопичена в твердій ізоляції першої жили;

W_2 – те саме для другої жили;

$\frac{Q_1 U_1}{2} + \frac{Q_2 U_2}{2}$ - сумарна енергія, що накопичена в твердій та газовій фазах ізоляційного проміжку.

Параметр o визначає долю силових ліній з жили 1, що досягають жилу 2. Його величина ($o = 0,1075$) визначена шляхом обчислення потоку вектора електричного зміщення, що попадає на жилу 2 від силових ліній, які відходять від жили 1.

Енергію W_1 знайдемо інтегруванням потужності тепловиділення по перерізу ізоляції першої жили

$$W_1 = \int \frac{\epsilon \epsilon_0 E_k^2}{2} dS_k \approx \sum_{k=1}^K \frac{\epsilon \epsilon_0 E_k^2}{2} \cdot \Delta S_k, \quad (9)$$

де: E_k - напруженість електричного поля у *додаткових* вузлах всередині твердої ізоляції першої жил; ΔS_k – площа ділянки навколо k -го вузла.

Аналогічно знаходиться W_2 . Результати обчислень зведено в таблицю 2.

Таблиця 2.

Доля (з) енергії, що накопичується в твердій фазі ізоляційних проміжків ЕВП.

b/a	η_{12}	η_{1-e}	η_{1-2e}	η_{12-e}
1	0.63	0.65	0.65	0.59
0,9	0.67	0.66	0.67	0.61
0,8	0.73	0.67	0.69	0.64
0,75	0.78	0.68	0.71	0.66
0,7	0.85	0.69	0.74	0.70

Враховуючи ємності проміжків та втрати енергії в них, можемо побудувати типову діаграму нормального стану ЕВП – так звану C - tgd діаграму - рис. 2.

Рис. 2. Розрахункова C - tgd діаграма екранованої витої пари при різних співвідношеннях півосей еліптичного екрану: від 1 (нижні точки) до 0,7 (верхні точки). По горизонталі – лінійна ємність C' , пФ/м; по вертикалі – tgd ізоляційних проміжків. Рівень тангенса кута втрат власне твердої фази прийнято одиничним $\text{tgd}_d=0,01 = 1\%$.

Параметри ЕВП на C - tgd діаграмі повинні знаходитися поблизу вказаних чотирьох областей. Перша з них - область C_{12-e} - відповідає обстеженням за схемою “дві жили разом – проти екрану”. Ємність цього

проміжку – найбільша, а t_{gd} – найменший (див. табл. 2) внаслідок того, що доля повітряної фази – найвища. Можливі забруднення, що накопичуються в зоні контакту ізольованих жил, не можна помітити за такою схемою обстежень, адже в цьому випадку поле в проміжку між жилами відсутнє (обидві жили мають однакові потенціали).

Дві другі області - C_{1-e} та C_{1-2e} пов'язані з ємностями кожної з жил на екран поодиноці (частковими ємностями) та у сукупності з ємністю C_{12} між жилами. Як бачимо, для трохи більшої сукупної ємності C_{1-2e} повинен спостерігатися також дещо більший рівень t_{gd} . І таке співвідношення є наслідком лише різної долі твердої фази, зайнятої електричним полем при вказаних обстеженнях. Тільки у разі, коли для проміжку C_{1-2e} буде спостерігатися значно вищий рівень t_{gd} , ніж вказано на діаграмі рис. 2, це може бути свідченням дії вказаних вище забруднень між ізольованими жилами.

Нарешті, четверта область C_{12} пов'язана з ізоляційним проміжком між жилами. Ємність цієї області найменша. Будь-яке забруднення, що накопичується в мікро-капілярній зоні контакту поміж ізольованими жилами, може бути виявлене, але тільки у разі, коли відповідний t_{gd} перевищить рівень, вказаний на рис.2.

Таким чином, відхилення фактичних параметрів ЕВП від розрахункових рис.2 можуть бути свідченнями різних процесів: а) зсідання (скорочення) ізоляції жил; б) утворення низькомолекулярних продуктів розпаду ізоляції (вони відчуюються також по запаху, що нагадує масляну фарбу); в) зволоження ізоляції внаслідок втрат герметичності захисник оболонки тощо. Певні гіпотези щодо конкретної природи відхилень можна отримати, виконуючи обстеження при різних частотах, скажімо, звукових – від 100 Гц до 10 кГц. Саме цей діапазон частот було використано в подальшому при обстеженні зразків кабелів з ЕВП (розділ 4).

В третьому розділі виконано розрахунки електричного поля та прохідних ємностей ізоляційних проміжків поміж окремими ЕВП (так звана область слабого поля). Внаслідок не суцільності екранів з переплетених дротів (рис. 3) частина силових ліній однієї пари проникає в область сусідньої пари (рис. 4).

Внаслідок цього прохідні ємності коливаються від сотих долей до одиниць пФ/м – табл. 3, табл. 4.

Таблиця 3.

Власні та прохідні ємності витих пар, пФ/м при різних коефіцієнтах густини екрану k_e .

k_e	C_{11}	C_{12}	C_{13}	C_{14}	C_{15}	C_{16}
0,8	127	17,8	109	7.9e-05	8.0e-05	5.2e-02
0,6	126	18,0	107	1.7e-03	1.7e-03	2.4e-01
0,4	124	18,2	105	7.4e-03	7.3e-03	4.9e-01

Рис.3.

Рис. 3. Схема екрану з пасм дротів одного напрямку (суцільні лінії) та другого напрямку (пунктирні лінії). Параметри екрану: кут (ν), крок (h) та діаметр (D).

Рис.4.

Рис. 4. Модель для розрахунків прохідних ємностей між екранованими витими парами: 1, 2 – жили; 3 – екран жил; 4, 5 – жили сусідньої пари; 6 – екран сусідньої пари.

Таблиця 4.

Те саме, що і в Табл. 3, але з урахуванням впливу підвищеної діелектричної проникності ізоляції жил, та виконання екрану з окремих пасом. Діаметр дротиків 0,15 мм, число в пасмі – 5, число пасм - a_1 .

a_1	k_e	C_{11}	C_{12}	C_{13}	C_{14}	C_{15}	C_{16}
5	0.64	110	17,9	94	2.8e-03	6.2e-04	8.1e-01
4	0.54	108	18,0	90	2.3e-02	3.6e-03	2.7
3	0.43	105	18,3	82	0.16e-02	4.1e-02	6.4

Вимірювання характеристик таких малих прохідних ємностей рекомендується виконувати не поодиночі, а у сукупності – між кількома ЕВП одночасно.

В четвертому розділі наводяться результати обстежень параметрів C - $tg\delta$ зразків кабелів з ЕВП за схемами прямих і сукупних вимірювань (рис. 5). Якби ізоляція всередині ЕВП була цілком однорідною (без повітряних проміжків), то незалежно від схеми обстежень мали б одне й те саме значення величини $tg\delta$. Насправді ж маємо ряд різних діелектричних середовищ, до того ж ізоляційні поверхні, на яких можуть накопичуватися низькомолекулярні продукти окислення або радіолізу. Це може призводити до суттєвої різниці величин $tg\delta$.

На рис. 6 наведена одна з діаграм, де показані як розрахункові області допустимих значень параметрів C - $tg\delta$, так і експериментальні. Повний збіг даних по ємностям проміжків свідчить про цілком нормальну товщину ізоляції жил.

Рис. 6. Експериментальні та розрахункові параметри C - tgd зразка кабелю КПЭТИ-12х2х0,7. Частоти 100 Гц, 1 та 10 кГц.

Але суттєво вищий рівень tgd для області C_{12} є ознакою накопичення забруднень саме в проміжку між ізолюваними жилами.

На рис. 7 дана аналогічна діаграма для двох зразків кабелів після тривалої витримки в сирому приміщенні. Для зразка, який був додатково

зістарений, спостерігаються значно вищі рівні $\text{tg}\delta$ як для області сильного поля C_{I2} , так і для області слабого поля C_{p-all} . Таким чином, передісторія зразків чітко відбивається на $C\text{-tg}\delta$ діаграмі.

☆ Рис. 7. $C\text{-tg}\delta$ діаграма зразків кабелів КПЭТИнг 7х2х0,7 у вихідному стані (“o” - 0,1кГц, “x” - 1кГц, “*” - 10 кГц) та після додаткового радіаційно-термічного старіння (“□” - 0,1кГц, “Δ” - 1кГц, “ ” - 10 кГц).

В п'ятому розділі розглянуті можливості визначення стану кабелів з ЕВП за характеристиками часткових розрядів. Передумовою цього є сильне поле, яке виникає в ЕВП при випробуваннях їх цілком допустимими змінними напругами – до 1500 В частоти 50 Гц. Виявляється, що внаслідок малої товщини ізоляції (близько 0,35 мм на одну сторону), наявності екрану та відмінностей діелектричних проникностей ізоляції жил і повітряних прошарків навколо них, напруженість електричного поля на поверхні ізоляції перевищує напруженість початку ЧР $E_c = 2,1$ МВ/м вже при напругах близько 0,55 кВ – рис.8. Прямими лініями на рисунку позначена межа критичної напруженості поля. Вже при напрузі 1500 В вона перевищується як на поверхні жил (області 1, 2) так і на поверхні ізоляції жил та обмотки (в повітряних проміжках – області 4 - 6). Тому при вказаній напрузі в ЕВП повинні виникати ЧР. Якщо на поверхні ізоляції жил є низькомолекулярні продукти радіолізу діелектрика або адсорбовані водяні пари це може вплинути на частоту ЧР.

Рис. 8. Розгортки напруженості поля на межах розділу середовищ в ЕВП при трьох різних видах випробувань змінною напругою: а) симетричною різнополярною (“жила”-“жила”-“екран”: 750 В, +750 В, 0); б) симетричною однополярною (1500 В, 1500В, 0); в) несиметричною (1500В, 0, 0). Характерні ділянки: 1,2 – поверхні жил; 3 – екран пари; 4,5 – поверхні ізоляції жил; 6 – поверхня плівкової обмотки. Геометрія ЕВП подана у масштабі на рис.1.

Рис. 9. Інтегральні функції розподілу частоти ЧР зразків ЕВП у вихідному стані (1- 6) та після додаткового тривалого теплового старіння (1' - 7').

Чим швидше розтікаються поверхневі заряди, тим більше ЧР виникає за кожний півперіод змінної напруги, тобто вище їхня частота. Саме таке явище спостерігалось нами експериментально, причому при напрузі близько 1100 В (рис.9): для зістарених зразків ЕВП частота ЧР виявилася в 10 – 100 разів вищою, ніж для базових зразків. Таким чином, навіть початкові стадії старіння

поверхні ізоляції ЕВП можна виявити, якщо виконати вимірювання частоти ЧР.

ВИСНОВКИ

Розв'язана науково-практична задача удосконалення контролю електроізоляції кабелів з екранованими витими парами шляхом аналізу характеристик ємностей і тангенсів кутів діелектричних втрат ізоляційних проміжків, що обстежуються поодиночі і у сукупності. Отримані такі результати:

1. Всередині екранованої витної пари є три ізоляційні проміжки – один типу “жила-жила” та два типу “жила – екран” – що містять тверду та газову фази. Вміст твердої фази в проміжках – різний, внаслідок чого тангенси кутів діелектричних втрат проміжків також виявляються різними. Аналіз параметрів окремих ізоляційних проміжків (на відміну від параметрів конструкції в цілому) підвищить чутливість контролю електроізоляції.

2. Розроблена модель сильного поля (всередині ЕВП), за допомогою якої визначені допустимі границі по ємностям і по $\text{tg}\delta$ ізоляційних проміжків. Запропоновано проводити контроль електроізоляції шляхом вимірювань параметрів 6 ємностей – трьох часткових та трьох сукупних. Результати подаються на C - $\text{tg}\delta$ діаграмі у вигляді 4 характерних областей з допустимими границями, вихід за які є ознакою дефекту ЕВП.

3. Аналіз результатів експериментальних досліджень кабелів, що тривалий час працювали в умовах підвищеної вологості, температури та радіаційного опромінювання, дає підстави стверджувати, що вони містять низькомолекулярні продукти розпаду ізоляції та вологу: величини $\text{tg}\delta$ в групах C_{1-2} , $C_{1-2,e}$, $C_{2-1,e}$ перевищують нормовані в 2 – 8 раз. При додатковому радіаційно-термічному старінні зразків таких кабелів в лабораторних умовах спостерігається зменшення $\text{tg}\delta_{0,1}$, що зумовлено видаленням низькомолекулярних речовин, та збільшення $\text{tg}\delta_{10}$, що зумовлено подальшим старінням ізоляції. Вказані зміни спостерігаються для всіх чотирьох областей C - $\text{tg}\delta$ діаграми. Контроль електроізоляції за характеристиками ємностей і тангенсів кутів діелектричних втрат виявляється чутливим до процесів старіння.

4. Встановлено, що зміни параметрів C - $\text{tg}\delta$ ізоляційних проміжків ЕВП практично перестають спостерігатися, коли ізоляція твердіє (відносне видовження при розриві стає менше 50%). Тому ознакою досягнення критичного стану може бути завершення значимих змін параметрів C - $\text{tg}\delta$ в ході старіння кабелів.

5. В умовах експлуатації при прямих вимірюваннях параметрів C і $\text{tg}\delta$ (із застосуванням трьох клем вимірювача імітансу, включаючи екрануючу), може спостерігатися явище “насичення” вимірювача імітансу, яке призводить до хибних результатів внаслідок перевантаження джерела ЕРС ємнісними

струмами паразитних кіл, що шунтують контрольований проміжок. У цьому випадку рекомендується виконувати сукупні вимірювання (із застосуванням лише двох клем, без екрануючої), а параметри окремих ізоляційних проміжків визначати у результаті рішення систем рівнянь.

6. Аналіз моделі області слабого поля (між окремими ЕВП) показує, що у випадку плетеного екрану характеристики прохідних ємностей (C і $\text{tg}\delta$) можуть бути використані для побічної оцінки якості захисних оболонок кабелів. Встановлено, що ознакою втрати герметичності захисних оболонок є різке збільшення $\text{tg}\delta$ в області слабого поля (між окремими ЕВП) – в 4 рази у порівнянні з $\text{tg}\delta$ базових проміжків в області сильного поля.

7. Додатковим параметром електричного контролю ЕВП в умовах, близьких до завершення ресурсу, може бути частота ЧР. Розрахунками та експериментально показано, що для ЕВП кабелів КПЭТИ ЧР виникають при напругах від 500 до 1500 В, що менше номінальної випробувальної. Для зразків, доведених до критичного стану, спостерігається суттєве зростання частоти ЧР – до 10 - 100 раз. Причиною того є зростання поверхневої електропровідності зістареної ізоляції, внаслідок чого збільшується швидкість розтікання поверхневих зарядів.

8. Результати дисертаційної роботи впроваджені при створенні методики діагностики кабелів з радіаційно-зшитим поліетиленом на ХГП “СЕРТЦентр АСУ” (м.Харків), та в навчальному процесі на кафедрі електроізоляційної та кабельної техніки НТУ “ХПІ”. Результати розробок можуть бути використані для моніторингу стану електроізоляції кабелів, що експлуатуються в умовах підвищених температур, вологості, дії іонізуючого випромінювання в енергоустановках, де складно відібрати зразки для проведення лабораторних обстежень.

СПИСОК ОПУБЛІКОВАНИХ ПРАЦЬ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

1. Набока Б.Г., Беспрозванных А.В., Штангей (Федяй) А.С. Определение параметров многоэлементных схем замещения сетевых кабелей // Вісник Національного технічного університету “Харківський політехнічний інститут”. – Харків: НТУ “ХПІ”. – 2003. - №9, т. 4. - С. 35 - 40. *Здобувачем виконано вимірювання часткових ємностей та тангенсів кутів діелектричних втрат зразків чотирипарних кабелів.*

2. Набока Б.Г., Беспрозванных А.В., Штангей (Федяй) А.С., Чертков Г.Н., Крикунов В.В. Наблюдение процессов старения изоляции многожильных кабелей по корреляционной связи электрических характеристик ее соседних участков // Надійність і довговічність машин і споруд. – Київ: Інститут проблем міцності ім. Г.С. Писаренка НАН України. – 2004. – №2 (23). – С. 93 – 98. *Здобувачем виконано розрахунок часткових ємностей за результатами сукупних вимірювань.*

3. Штангей (Федяй) А.С. Проблемы выбора оптимального плана эксперимента при обследовании многожильных кабелей методом совокупных измерений // Вісник Національного технічного університету “Харківський політехнічний інститут”. – Харків: НТУ “ХПІ”. – 2004. – № 7. – С.121 – 126.

4. Штангей (Федяй) А.С. Обследование многожильных кабелей методом совокупных измерений. Выбор оптимальных планов с помощью чисел обусловленности // Вісник Національного технічного університету “Харківський політехнічний інститут”. – Харків: НТУ “ХПІ”. – 2004. – № 22. – С. 117 – 120.

5. Набока Б.Г., Беспрозванных А.В., Штангей (Федяй) А.С. Параметры частичных емкостей как индикатор состояния контрольных кабелей АЭС // Електротехніка і Електромеханіка. - Харків: Національний технічний університет “ХПІ”. – 2005. – №3. - С. 80 – 82. *Здобувачем виконано електричний контроль кабелів у вихідному стані та після прискореного термічного та радіаційного старіння.*

6. Набока Б.Г., Беспрозванных А.В., Штангей (Федяй) А.С., Радченко О.Н. Методика прямых измерений параметров частичных емкостей многожильных кабелей // Вісник Національного технічного університету “Харківський політехнічний інститут”. – Харків: НТУ “ХПІ”. – 2005. – № 42. – С. 80 – 86. *Здобувач знайшла явище спотворення результатів електричного контролю при триелектродному підключенні вимірювача імітансу.*

7. Федяй А.С. Влияние облучения на диэлектрические потери в изоляции контрольных кабелей с витыми экранированными парами // Вісник Національного технічного університету “Харківський політехнічний інститут”. – Харків: НТУ “ХПІ”. - 2006. –№ 7. – С. 173 – 179.

8. Федяй А.С. Диэлектрические потери изоляционных промежутков экранированной витой пары // Вісник Національного технічного університету “Харківський політехнічний інститут”. – Харків: НТУ “ХПІ”. - 2006. –№ 34. – С. 28 – 35.

9. Штангей (Федяй) А.С. Контроль изоляции многожильных кабелей по $S-tg\delta$ диаграмме // Матеріали науково-практичної конференції “Пожежна безпека кабельно-провідникової продукції”. - Харків: Академія пожежної безпеки України, 2003. - С. 44 – 45.

10. Набока Б.Г., Беспрозванных А.В., Гладченко В.Я., Штангей (Федяй) А.С. Контроль целостности оболочек многожильных кабелей по диэлектрическим свойствам межфазного пространства // Матеріали науково-практичної конференції “Актуальні проблеми наглядно-профілактичної діяльності в МНС – 2004”: - Харків: АЦЗУ, 2004. – С. 45 – 46. *Здобувачем виконано електричний контроль кабелів у вихідному стані та після зволоження.*

Анотації

Федяй Г.С. Удосконалення контролю електроізоляції кабелів з екранованими витими парами. – Рукопис.

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, 2007.

В дисертації розглянуто питання визначення технічного стану кабелів з екранованими витими парами шляхом обстежень характеристик ізоляційних проміжків на змінній напрузі. Ізоляційні проміжки мають різну долю твердої та газової фази, внаслідок чого величини тангенсів кутів діелектричних втрат ($\text{tg}\delta$) виявляються різними навіть за умов нормальної якості кабелів. Визначені допустимі рівні ємностей C і $\text{tg}\delta$ різних проміжків, що зображаються на так званій C - $\text{tg}\delta$ діаграмі нормального стану кабелю. Відхилення від них, що спостерігаються на практиці, розглядаються як ознаки наявності дефектів.

Природу дефектів виявляють шляхом вимірювань параметрів в діапазоні звукових частот (від 0,1 до 10 кГц). При цьому результати, отримані при низьких частотах, виявляються більш чутливими до процесів зволоження ізоляції, а при високих частотах – до незворотних процесів власне старіння ізоляції.

Ознакою втрати герметичності захисних оболонок є зростання $\text{tg}\delta$ в області слабкого поля – проміж окремих ЕВП.

Встановлено, що зміни параметрів C - $\text{tg}\delta$ ізоляційних проміжків ЕВП тривають, поки ізоляція зберігає свою еластичність. Після цього (коли вона стає жорсткою) значних змін вказаних параметрів не спостерігається. Тому ознакою досягнення критичного стану може бути завершення дрейфу параметрів C - $\text{tg}\delta$ під час старіння кабелів.

Запропонований перспективний спосіб контролю якості поверхні ізоляції жил ЕВП за частотою часткових розрядів, що вимірюються при напругах від 0,5 до 1,5 кВ.

Зроблені застереження відносно умов правильного застосування три клемного підключення вимірювачів імітансу (комплексного опору) для запобігання перевантаження джерела ЕРС приладу, при якому результати вимірювань стають хибними.

Ключові слова: електроізоляція кабелів, екранована вита пара, ізоляційні проміжки, ємність і тангенс кута діелектричних втрат, моделювання сильних електричних полів, часткові розряди.

Федяй А.С. Усовершенствование контроля электроизоляции кабелей с экранированными витыми парами. – Рукопись.

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, 2007.

В диссертации рассмотрен вопрос определения технического состояния кабелей с экранированными витыми парами путем обследования характеристик изоляционных промежутков при переменном напряжении. Изоляционные промежутки имеют разную долю твердой и газообразной фаз,

из-за чего величины тангенсов углов диэлектрических потерь ($\text{tg}\delta$) оказываются разными даже при условии нормального качества кабелей. Определены допустимые диапазоны емкостей C и $\text{tg}\delta$ разных промежутков, которые изображаются на так называемой C - $\text{tg}\delta$ диаграмме нормального состояния кабеля. Отклонения от них, наблюдаемые на практике, рассматриваются как признаки наличия дефектов.

Природу дефектов выявляют путем измерения параметров в диапазоне частот. Используют звуковые частоты от 0,1 до 10 кГц. При этом результаты, полученные при низких частотах, оказываются более чувствительными к увлажнению изоляции, а при высоких частотах – к необратимым процессам старения изоляции.

Признаком потери герметичности защитных оболочек есть увеличение $\text{tg}\delta$ в области слабого поля – между отдельными экранированными витыми парами (ЭВП).

Установлено, что изменения параметров C - $\text{tg}\delta$ изоляционных промежутков ЭВП происходят, пока изоляция сохраняет свою эластичность. После этого (когда она становится жесткой) существенных изменений указанных параметров не наблюдается. Поэтому признаком достижения критического состояния может быть завершение дрейфа параметров C - $\text{tg}\delta$ во время старения кабелей.

Предложен перспективный способ контроля качества поверхности изоляции жил ЭВП по частоте частичных разрядов, которая измеряется при напряжениях от 0,5 до 1,5 кВ частоты 50 Гц.

Сделаны предостережения относительно условий правильного применения измерителей иммитанса (комплексного сопротивления) для предупреждения перегрузки источника ЭДС прибора, при которой результаты измерения становятся ложными.

Для обоснования параметров частичных и совокупных емкостей витой экранированной пары рассмотрена модель с круговыми границами раздела сред – жил, их изоляции, и эллиптическими формами экрана и пленочной оплетки поверх витой пары. Винтовой поверхностью пары пренебрегли, из-за чего поле принималось плоскопараллельным. Учтено различие относительных диэлектрических проницаемостей изоляции жил и пленочной подмотки. Напряженность на поверхности изоляции жил достигает критического значения при испытательных напряжениях 0,55 кВ. Фактически частичные разряды наблюдались при вдвое большем напряжении.

Ключевые слова: электроизоляция кабелей, экранированная витая пара, изоляционные промежутки, емкость и тангенс угла диэлектрических потерь, моделирование сильных электрических полей, частичные разряды.

Fedyai A.S. The Improvement of Monitoring of Electrical Insulation for Cables with Shielded Twisted Pairs. - Manuscript.

The thesis is presented for Ph. D. degree in the speciality 05.09.13 – techniques of strong electrical and magnetic fields. National Technical University “Kharkov polytechnic institute”, Kharkov, 2007.

In the thesis the question of technical condition definition for cables with the shielded twisted pairs is considered by inspection of characteristics of insulation depth at alternative voltage. The insulation gaps have a different share of a firm and gaseous phase, because of what sizes of dissipation factor ($\text{tg}\delta$) appear different even under condition of normal quality of cables. Allowable ranges of capacities C and $\text{tg}\delta$ for different depth which are represented on so-called C - $\text{tg}\delta$ diagram of a normal condition of a cable are determined. Deviations from them, observable on practice, are considered as attributes of presence of defects.

The nature of the defects reveal by measurement of parameters in a range of frequencies. We use the sound frequencies from 0,1 up to 10 kHz. Thus, the results received at low frequencies, appear more sensitive to humidifying insulation, and at high frequencies - to irreversible processes of ageing of insulation.

The attribute of loss of tightness of protective environments is increase $\text{tg}\delta$ in the field of a weak field - between separate shielded twisted pairs (*STP*).

It has established, that changes of parameters C - $\text{tg}\delta$ insulation intervals *STP* occur, while insulation keeps the elasticity. After that (when it becomes rigid) essential changes of the specified parameters is not observed. Therefore an attribute of achievement of a critical condition can be end of drift of parameters C - $\text{tg}\delta$ during ageing cables.

The perspective way of quality assurance of a surface of insulation of *STP* on frequency of partial discharges, which is measured at voltage from 0,5 up to 1,5 kV frequencies of 50 Hz is offered.

Cautions concerning conditions of correct application of measuring instruments (for complex resistance) for the prevention of an overload of voltage source of the device at which results of measurement become false are made.

Key words: cable electrical insulation, shielded twisted pairs, insulation gaps, capacity and dissipation factor, modeling of strong electrical fields, partial discharges.