

Міністерство освіти та науки, молоді та спорту України  
Національний технічний університет  
«Харківський політехнічний інститут»

МОСКВІТІН ЄВГЕН СЕРГІЙОВИЧ

УДК 621.319.4

**МЕТОДИ КОНТРОЛЮ СТАРІННЯ ПАПЕРОВО-ПРОСОЧЕНОЇ  
ІЗОЛЯЦІЇ СИЛОВИХ КАБЕЛІВ СЕРЕДНЬОЇ НАПРУГИ**

Спеціальність 05.11.13 – прилади та методи контролю та визначення складу  
речовин

Автореферат дисертації на здобуття наукового ступеня  
кандидата технічних наук

Харків – 2012

Дисертацією є рукопис

Робота виконана на кафедрі «Електроізоляційна та кабельна техніка» Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут» Міністерства освіти і науки, молоді та спорту України, м. Харків

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

Офіційні опоненти:  
доктор технічних наук, -професор  
**Рудаков Валерій Васильович**,  
Національний технічний університет  
«Харківський політехнічний інститут», м. Харків  
завідувач кафедри «Інженерна електrofізика»  
  
кандидат технічних наук,  
**Ганус Олексій Іванович**,  
АК «Харківобленерго» , м. Харків,  
технічний директор, заступник голови правління

Захист відбудеться «\_\_»\_\_\_\_\_ 2012 р. о годині хвилин на засіданні спеціалізованої вченої ради Д 64.050.09 в 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 «\_\_»\_\_\_\_\_ 2012 р.

Вчений секретар  
спеціалізованої вченої ради

С. М. Глоба

## ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

**Актуальність теми.** Надійність систем електропостачання енергоблоків атомних електричних станцій, промислових підприємств, транспорту, сільського та комунального господарства неможлива без безпечної роботи силових кабелів низької та середньої напруги. Силові кабелі з паперово-просоченою ізоляцією є основними в мережах «чистих» зон енергоблоків атомних електричних станцій, міських та обласних енергомереж напругою 1 – 10 кВ.

Достовірна діагностика стану паперово-просоченої ізоляції силових кабелів неруйнівними методами дозволяє відмовитися від профілактичних випробувань руйнівними методами контролю, які призводять до зменшення ресурсу, непередбаченому пробною ізоляції тощо.

Важливим питанням є оцінка результатів контролю та формулювання висновків про можливість подальшої експлуатації кабелів. Для цього необхідно мати критерії за параметрами, які контролюються та дозволяють оцінити ступінь старіння паперово-просоченої ізоляції.

Поява сучасних цифрових автоматичних вимірювачів імітансу Е7-14, вимірювачів втрат в ізоляції ВВІ-10, мостів змінного струму СА-7100 та «Тангенс-2000» дозволяють проводити неруйнівний контроль за тангенсом кута діелектричних втрат та електричною ємністю. Але прямі та сукупні вимірювання тангенсу кута діелектричних втрат паперово-просоченої ізоляції не дають можливості оцінити ступінь старіння індивідуальних характеристик фазної та поясної ізоляції силових кабелів у повному обсязі. Тому розробка високочутливих методів контролю старіння індивідуальних характеристик та обґрунтування критеріїв за параметрами, що контролюються, для оцінки технічного стану паперово-просоченої ізоляції силових кабелів середньої напруги, – є актуальною, науково-практичною задачею, яка визначила напрямок дисертаційних досліджень.

**Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами.** Дисертаційну роботу виконано на кафедрі «Електроізоляційна та кабельна техніка» НТУ «ХПІ» в рамках фундаментальної держбюджетної теми МОН України «Розробка теоретичних засад визначення технічного стану твердої ізоляції» (ДР № 0108U006119) та госпдоговірних тем з Сертифікаційним центром АСУ Державного центру регулювання якості поставок та послуг Державної інспекції ядерного регулювання України (м. Харків): «Проведення обстеження та оцінка технічного стану зразків кабелів енергоблоку №1 ВП Рівненської АЕС» (2006р.); «Обстеження технічного стану кабелів енергоблоку №1 ВП Південноукраїнської АЕС з метою продовження строку експлуатації» (2007р.); «Проведення обстеження та оцінка технічного стану зразків кабелів енергоблоку №2 ВП Запорізької АЕС в лабораторних умовах» (2008 р.); «Обстеження технічного стану кабелів енергоблоку №2 ВП Запорізької АЕС» (2009 р.); «Обстеження технічного стану кабелів енергоблоків №2 ОП Запорізької АЕС в лабораторних умовах» (2010 р.); «Обстеження технічного стану кабелів енергоблоків №3 ОП Запорізької АЕС в лабораторних умовах» (2011 р.), в яких здобувач був виконавцем окремих етапів.

**Мета та задачі дослідження.** Метою роботи є розробка методів контролю старіння паперово-просоченої ізоляції силових кабелів середньої напруги за числом подвійних згинів кабельного паперу та тангенсом кута діелектричних втрат фазної та поясної ізоляції окремо.

Для досягнення поставленої мети в роботі поставлені такі задачі:

1. Виконати аналіз чутливості методу контролю старіння фазної та поясної ізоляції силових кабелів з паперово-просоченою ізоляцією за числом подвійних згинів кабельного паперу.

2. Обґрунтувати метод контролю за тангенсом кута діелектричних втрат  $\text{tg}\delta$  фазної та поясної ізоляції трифазних силових кабелів окремо, що спирається на вимірювання сукупних характеристик паперово-просоченої ізоляції та рішення системи лінійних алгебраїчних рівнянь для знаходження індивідуальних характеристик ізоляції.

3. Виконати експериментальну перевірку похибки методу контролю за тангенсом кута діелектричних втрат фазної та поясної ізоляції шляхом розрахунку коефіцієнтів варіації відновлювальних значень в залежності від помилок сукупних результатів контролю.

4. Встановити критичні значення тангенсу кута діелектричних втрат фазної та поясної ізоляції окремо, які співвідносяться з критичним значенням числа подвійних згинів, на основі кореляційного та регресійного аналізу між утомленою міцністю кабельного паперу та тангенсом кута діелектричних втрат паперово-просоченої ізоляції силових кабелів.

5. Експериментально перевірити можливість виявлення природи дефектів кабельних ліній з паперово-просоченою ізоляцією в експлуатації з використанням методів контролю за тангенсом кута діелектричних втрат та сталою часу саморозряду.

*Об'єкт дослідження* – «старіння» силових кабелів з паперово-просоченою ізоляцією АЕС та енергомереж.

*Предмет дослідження* – параметри технічного стану паперово-просоченої ізоляції силових кабелів за утомленою міцністю кабельного паперу та тангенсом кута діелектричних втрат індивідуальних характеристик фазної та поясної ізоляції.

**Методи дослідження:** теоретичні – фізико-хімічні, фізико-статистичні та механічні методи контролю старіння паперово-просоченої ізоляції силових кабелів; методи механіки руйнування кабельного паперу; прямі та сукупні методи обстежень силових кабелів в захисній металевій оболонці за тангенсом кута діелектричних втрат; метод вторинних джерел для численного розрахунку електростатичного поля силового кабелю для визначення енергії, що накопичується в фазній та поясній ізоляції; метод електротеплових аналогій; експериментальні – статистичні методи обробки результатів контролю; інтегральні функції розподілу числа подвійних згинів кабельного паперу; непараметричні методи статистичного аналізу утомленої міцності кабельного паперу в процесі теплового старіння на основі критерію Тьюкі; методи кореляційного та регресійного аналізу залежностей між числом подвійних згинів

та тангенсом кута діелектричних втрат.

**Наукова новизна одержаних результатів:**

1. *Вперше* запропоновано метод контролю старіння фазної та поясної ізоляції паперово-просоченої ізоляції силових кабелів за числом подвійних згинів кабельного паперу, що відображає довготривалу механічну міцність. В міру старіння паперу зростає його жорсткість (модуль пружності), це призводить до різкого зменшення числа подвійних згинів, що забезпечує високу чутливість методу контролю.

2. *Вперше* експериментально встановлено, що крива статистичної щільності розподілу числа подвійних згинів незістареної кабельної ізоляції не є симетричною унімодальною. Найвищий максимум, що спостерігається, відповідає рівню довговічності, тобто чітко вираженому значенню числа подвійних згинів, біля якого групуються виміряні значення. Цей максимум пов'язаний з дискретною структурою кабельного паперу.

3. *Вперше* експериментально встановлено, що для вкрай зістарених кабелів рівні довговічності вироджуються. На варіаційних діаграмах числа подвійних згинів для поясної ізоляції спостерігається злам. Крива статистичної щільності розподілу числа подвійних згинів представляється сумою двох експонент для поясної ізоляції та постійної складової для фазної.

4. *Вперше* запропоновано метод контролю старіння паперової просоченої ізоляції силових кабелів за тангенсом кута діелектричних втрат індивідуальних характеристик фазної та поясної ізоляції, який ґрунтується на сукупних вимірюваннях діелектричних параметрів паперово-просоченої ізоляції та розв'язку системи лінійних алгебраїчних рівнянь для знаходження індивідуальних характеристик компонентів ізоляції.

5. *Вперше* запропоновано метод неруйнівного контролю силових кабелів за тангенсом кута діелектричних втрат та сталою часу саморозряду паперово-просоченої ізоляції, що дозволяє виявити природу дефекту кабельної лінії.

**Практичне значення одержаних результатів роботи** для електроенергетичної галузі полягає в розробці високочутливих методів контролю старіння паперово-просоченої ізоляції силових кабелів середньої напруги. Використання руйнівних механічних та неруйнівних електричних методів контролю з використанням сучасних цифрових приладів дозволило підвищити достовірність контролю силових кабелів середньої напруги в експлуатації. На основі встановленої кореляційної залежності між механічним ресурсом та тангенсом кута діелектричних втрат індивідуальних характеристик фазної та поясної ізоляції розроблено обґрунтовані критерії оцінки технічного стану силових кабелів. Використання цих критеріїв дозволяє методами неруйнівного контролю оцінити технічний стан паперово-просоченої ізоляції та прогнозувати залишковий ресурс кабелів в експлуатації.

Результати дисертаційної роботи впроваджено в Сертифікаційному центрі АСУ Державного центру регулювання якості поставок та послуг Державної інспекції ядерного регулювання України (м. Харків) при оцінці технічного стану силових кабелів напругою 1 – 6 кВ атомних електричних станцій, в ТОВ «Стекс»

(м. Харків) при діагностичних обстеженнях силових кабелів енергомереж напругою 6 – 10 кВ.

Результати дисертаційної роботи використано в навчальному процесі кафедри «Електроізоляційна та кабельна техніка» НТУ «ХПІ» при підготовці лабораторного практикуму для студентів з учбової дисципліни «Методи випробувань електричної ізоляції», при викладанні учбової дисципліни «Контроль та діагностика електричної ізоляції».

**Особистий внесок здобувача.** Основні наукові результати отримані здобувачем самостійно. Виконано обґрунтування та практична перевірка методу контролю старіння фазної та поясної ізоляції за числом подвійних згинів з визначенням критичних значень граничного стану кабельного паперу силових кабелів напругою 1 – 10 кВ. Показано, що результати вимірювань числа подвійних згинів представляються логарифмічно-нормальним законом. Виконано оцінки похибки методу контролю старіння фазної та поясної ізоляції за тангенсом кута діелектричних втрат на основі розрахунку коефіцієнту варіації  $\text{tg}\delta$  в залежності від помилок вихідних даних. Встановлено кореляційну залежність між утомленою міцністю кабельного паперу та тангенсом кута діелектричних втрат фазної та поясної ізоляції. Отримано рівняння лінійної та експоненціальної парної регресії між числом подвійних згинів кабельного паперу та  $\text{tg}\delta$  фазної і поясної ізоляції при значенні довірчої вірогідності  $p = 0,95$ . Встановлено ознаки дефектів кабельних ліній за тангенсом кута діелектричних втрат та сталою часу саморозряду.

**Апробація роботи.** Результати роботи доповідались на: Міжнародній конференції «Подовження строку експлуатації енергоблоків АЕС. Оцінка технічного стану та управління старінням обладнання та кабельних виробів» (Київ, 2007 р.); Міжнародних симпозіумах «Проблеми удосконалення електричних машин та апаратів. Теорія та практика. SIEMA» (Харків, НТУ «ХПІ», 2006 – 2011 р.р.), XIV – XIX Міжнародних науково-практичних конференціях «Інформаційні технології: наука, техніка, технологія, освіта, здоров'я (Харків, 2006 – 2011 р.р.); VI-й науково-технічній конференції «Стан електричних мереж обленерго та основні напрямки підвищення їх ефективності. Зменшення втрат електроенергії в електромережах» (сmt. Корейз, АР Крим, 2009 р.); IV-й Міжнародній науково-технічній конференції «Проблеми забезпечення безпеки інформаційних систем та систем управління АЕС» (Харків, 2010 р.).

**Публікації.** Результати роботи відображені в 14-х публікаціях, серед них 10 статей в фахових наукових виданнях України.

**Структура дисертації.** Дисертація складається зі вступу, п'яти розділів, висновків, списку використаних джерел, додатків. Повний обсяг дисертації становить 185 стор., з них: 16 рисунків та 3 таблиці на 19 окремих аркушах 38 рисунків та 23 таблиці по тексту, список використаних джерел зі 108 найменувань на 12 сторінках, 3 додатки на 18 сторінках.

## ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ

У вступі обґрунтовано актуальність теми, сформульовані мета та задачі досліджень, показана наукова новизна та практична цінність одержаних

результатів.

**В першому розділі** виконано аналіз регламентованих методів випробувань та сучасних неруйнівних методів контролю та діагностики, які не травмують ізоляцію. Випробування кабелів підвищеною постійною напругою не дозволяє оцінити ступінь старіння паперово-просоченої ізоляції (ППІ). Для кабелів з ППІ напругою вище 1 кВ опір ізоляції не нормується, що також ускладнює оцінку стану ізоляції. Методи контролю силових кабелів за характеристиками часткових розрядів, що розроблені ведучими європейськими фірмами, спираються на значну базу даних вимірювань та мають критерії по оцінці результатів діагностики. Контроль силових кабелів напругою до 10 кВ забезпечує виявлення наповнених газом повітряних прошарків, які утворилися в результаті витікання просочувальної рідини в процесі довготривалої експлуатації кабелів. Але зволожені ділянки кабелю, місця з вуглецевими прошарками кабельного паперу не фіксуються цим методом.

Методи контролю за тангенсом кута діелектричних втрат, які застосовують, не дозволяють в повній мірі отримати індивідуальні характеристики фазної та поясної ізоляції окремо. Середньозважені значення тангенсу кута діелектричних втрат, які отримують, не відображають реальні значення втрат в кожній складовій ППІ. Адже останні можуть сильно відрізнятись за рахунок нерівномірного процесу старіння ізоляції по перетину кабелю.

При експлуатації в силових кабелях середньої напруги спостерігається в основному теплове старіння паперово-просоченої ізоляції. Це призводить до зниження ступеня полімеризації кабельного паперу – природного полімеру. А це, в свою чергу, позначається на механічній міцності кабельного паперу та тангенсі кута діелектричних втрат ППІ.

Виникає необхідність в розробці методів контролю старіння паперово-просоченої ізоляції за числом подвійних згинів та тангенсом кута діелектричних втрат фазної та поясної ізоляції.

**В другому розділі** досліджено метод контролю старіння паперово-просоченої ізоляції за числом подвійних згинів кабельного паперу фазної та поясної ізоляції. Дана фізична інтерпретація та виконано обґрунтування методу контролю. Число подвійних згинів не залежить від товщини кабельного паперу, що дозволяє застосовувати цей параметр в якості діагностичного для силових кабелів напругою від 1 до 10 кВ. При випробуваннях на число подвійних згинів  $N$  до зламу смужки ізоляційного паперу напруга згину  $\sigma_{изг}$  пропорційна модулю пружності. Останній зростає в процесі старіння, а параметр  $N$  різко зменшується. Це свідчить про дуже високу чутливість числа подвійних згинів до старіння кабельного паперу. За результатами контролю встановлено, що в початковому, незістареному стані, число подвійних згинів кабельного паперу вище 2000, в зістареному – менше 100 на рівні 50% вірогідності (рис. 1).

На основі побудови емпіричної функції розподілу числа подвійних згинів  $N$  (рис. 1) можна знайти не тільки середнє значення на рівні 50 % вірогідності, але і рідкі значення  $N$  на рівні довірчої вірогідності 0,1 та менше. Це необхідно для розрахунку показників надійності виконаних оцінок технічного стану ізоляції.

Встановлено, що характеристики кабельного паперу поясної ізоляції (рис. 1, крива 2) гірше фазної (рис. 1, крива 1). Отже, в процесі експлуатації силових кабелів з паперово-просоченою ізоляцією поясна ізоляція в більшу міру стариться в порівнянні з фазною. Це підтверджується результатами додаткового теплового старіння зразків кабелів в лабораторних умовах (рис. 1, криві 1' та 2').

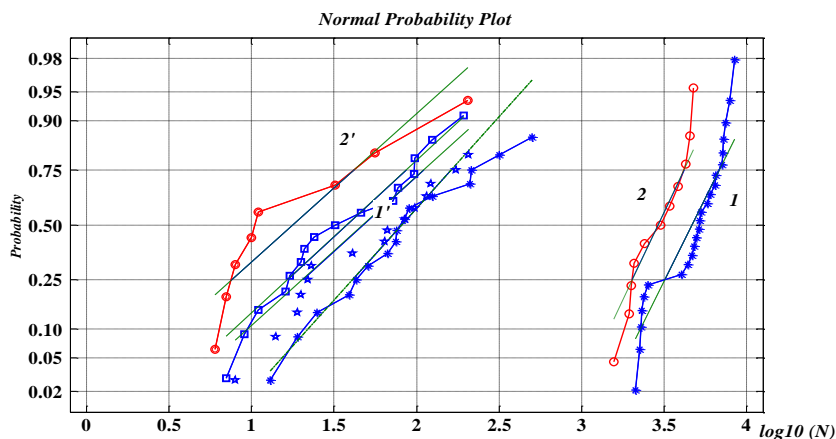


Рис. 1. Інтегральні функції розподілу утомленої міцності на злам смужок поясної та фазної ізоляції силових кабелів ААШВ різного ступеня зістареності

Крива статистичної щільності розподілу числа подвійних згинів кабельної ізоляції незістарених кабелів не є симетричною унімодальною (рис. 2а, праворуч). Максимум, що спостерігається, пов'язано з дискретністю структури тонкого кабельного паперу, і відповідає рівню довговічності. Для товстих зразків кабельного паперу товщиною міліметрового діапазону рівні міцності не спостерігаються. Для них характерна картина унімодального симетричного розподілу, яка обумовлена тільки статистичними факторами. Довготривала дія

термомеханічних напруг в умовах одночасної дії теплового поля призводить до механічного старіння паперово-просоченої ізоляції та утворенню мікро дефектів в кабельному папері. Ресурс  $\tau$  кабельного паперу силових кабелів в результаті механічного старіння визначається як (формула Журкова):

$$\tau = A \cdot e^{\frac{W - \gamma\sigma}{kT}}, \quad (1)$$

де  $A$  – емпіричний коефіцієнт;  $W$  – енергія активації процесу механічної деструкції;  $\gamma$  –

структурно-чутливий коефіцієнт;  $\sigma$  – механічна напруга в діелектрику;  $k$  – постійна Больцмана;  $T$  – абсолютна температура.

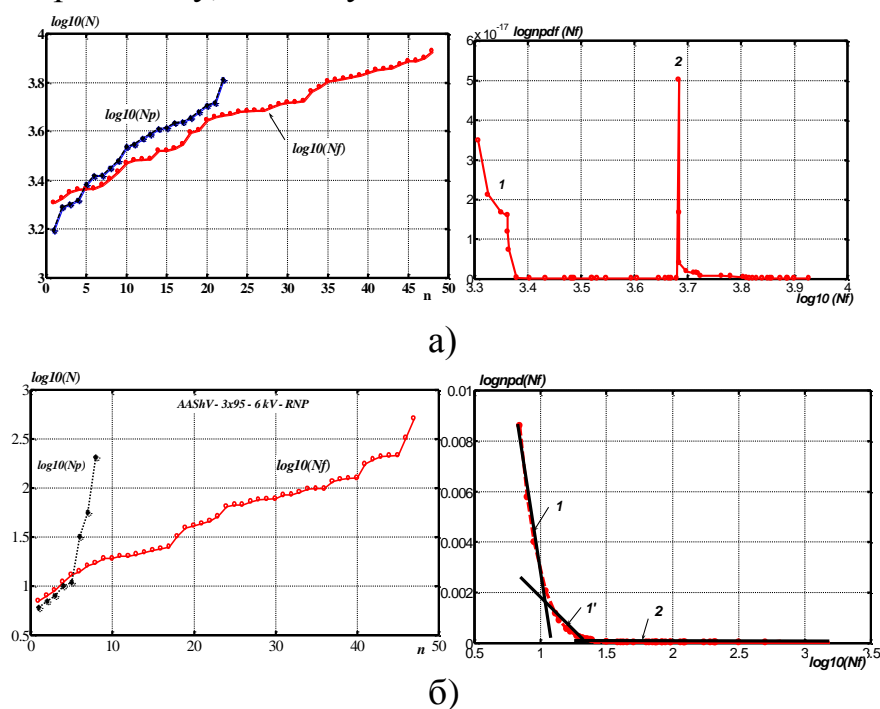


Рис. 2. Варіаційні діаграми (зліва) та криві статистичних функцій розподілу (праворуч) незістареного (а) та зістареного (б) кабелю ААШВ 3×150-10 кВ



Дія механічних напруг зводиться до зменшення енергії активації процесу деструкції, в результаті чого інтенсивність старіння зростає. Для зістарених кабелів рівень довговічності (механічного ресурсу) вироджується (порівняйте рис. 2а та 2б). Крива статистичної щільності розподілу утомленої міцності зістарених кабелів розкладається на дві експоненти для поясної ізоляції (праворуч рис. 2б, 1 та 1') та постійну складову для фазної (праворуч рис. 2б, 2). На варіаційних діаграмах числа подвійних згинів для поясної ізоляції спостерігається злам (рис. 2б, зліва). Цей злам відповідає граничному стану кабельної паперової ізоляції за механічними показниками. Таким чином, критичне значення числа подвійних згинів  $N_{кр}$  кабельного паперу дорівнює 10: при менших значеннях механічний ресурс силових кабелів з паперово-просоченою ізоляцією вичерпано:

У розділі 3 розвинуто метод контролю старіння індивідуальних характеристик фазної та поясної ізоляції за тангенсом кута діелектричних втрат.

Для трьохжильного силового кабелю в металевій оболонці схеми вимірювань тангенсу кута діелектричних втрат можуть бути різними:

а) А-S; В-S; С-S – «жила – проти двох інших та оболонки» – схема **I** (рис. 3а);  
 б) А,В,С-О – «три жили разом – проти оболонки» – схема **II** (рис. 3б);  
 в) А-В; В-С; С-А – одна з фаз відносно іншої – схема **III** (проміжна схема, за якою отримують характеристики між фазного простору). [Символ S означає з'єднання разом усіх вільних клем кабелю]. Різні схеми вимірювань призводять до концентрації електричного поля в різних ділянках кабелю. Це видно з розгорток напруженості електричного поля (рис. 3).

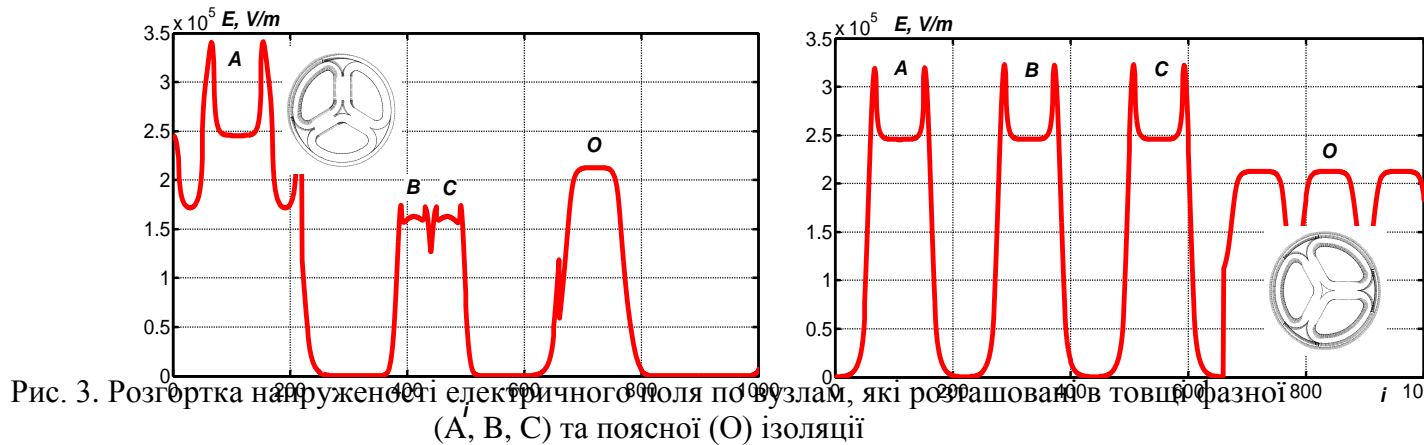


Рис. 3. Розгортка напруженості електричного поля по вузлам, які розраховані в товщі фазної (А, В, С) та поясної (О) ізоляції

При вимірюваннях за схемою **I** електричне поле зосереджено в основному в ізоляції потенційної фази (фаза А, рис. 3а). В ізоляції заземлених фаз (В та С) напруженість поля менше. При вимірюваннях за схемою **II** (рис. 3 б) поясна ізоляція навантажена сильніше, ніж за схемою **I** (порівняйте області О рис. 3б та рис. 3а). Але незалежно від схеми обстеження в силовому кабелі неможливо безпосередньо виміряти тангенс кута діелектричних втрат фазної та поясної ізоляції окремо. Кожне вимірювання представляє собою результат сукупного впливу декількох складових, в результаті спостерігається усереднення характеристик ізоляції: різниця компонентів малопомітна. Ознаки старіння фазної та поясної ізоляції нівелюються.

Контроль кабелів за різними схемами призводить до різної величини енергії  $W$ , що накопичується в фазній та пояській ізоляції, тобто потужності діелектричних втрат  $P$

$$P = W \cdot 2\omega \cdot \operatorname{tg} \delta = P \approx P_A + P_B + P_C + P_O. \quad (2)$$

Визначив частки енергії кожного з компонентів ( $\eta_A, \eta_B, \eta_C, \eta_O$ ) на основі розрахунку електричного поля, отримуємо сукупне значення тангенсу кута діелектричних втрат, що вимірюється

$$\operatorname{tg} \delta = \eta_A \cdot \operatorname{tg} \delta_A + \eta_B \cdot \operatorname{tg} \delta_B + \eta_C \cdot \operatorname{tg} \delta_C + \eta_O \cdot \operatorname{tg} \delta_O, \quad (3)$$

де  $\operatorname{tg} \delta_A, \operatorname{tg} \delta_B, \operatorname{tg} \delta_C, \operatorname{tg} \delta_O$  – індивідуальні характеристики компонентів ізоляції – тангенси кутів діелектричних втрат фазної (A, B, C) та поясної (O) ізоляції.

В виразі (3) чотири невідомих. Для їх знаходження необхідно виконати чотири вимірювання: три (a, b, c) – за схемою **I** (для кожної з фаз окремо) та один (d) – за схемою **II**. Відповідно маємо систему лінійних алгебраїчних рівнянь (СЛАР) 4-го порядку

$$\begin{aligned} \operatorname{tg} \delta_a &= \eta_A^a \cdot \operatorname{tg} \delta_A + \eta_B^a \cdot \operatorname{tg} \delta_B + \eta_C^a \cdot \operatorname{tg} \delta_C + \eta_O^a \cdot \operatorname{tg} \delta_O \\ \operatorname{tg} \delta_b &= \eta_A^b \cdot \operatorname{tg} \delta_A + \eta_B^b \cdot \operatorname{tg} \delta_B + \eta_C^b \cdot \operatorname{tg} \delta_C + \eta_O^b \cdot \operatorname{tg} \delta_O \\ \operatorname{tg} \delta_c &= \eta_A^c \cdot \operatorname{tg} \delta_A + \eta_B^c \cdot \operatorname{tg} \delta_B + \eta_C^c \cdot \operatorname{tg} \delta_C + \eta_O^c \cdot \operatorname{tg} \delta_O, \\ \operatorname{tg} \delta_d &= \eta_A^d \cdot \operatorname{tg} \delta_A + \eta_B^d \cdot \operatorname{tg} \delta_B + \eta_C^d \cdot \operatorname{tg} \delta_C + \eta_O^d \cdot \operatorname{tg} \delta_O \end{aligned} \quad (4)$$

яку можна записати в матричній формі

$$\begin{pmatrix} \eta_A^a & \eta_B^a & \eta_C^a & \eta_O^a \\ \eta_A^b & \eta_B^b & \eta_C^b & \eta_O^b \\ \eta_A^c & \eta_B^c & \eta_C^c & \eta_O^c \\ \eta_A^d & \eta_B^d & \eta_C^d & \eta_O^d \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} \operatorname{tg} \delta_A \\ \operatorname{tg} \delta_B \\ \operatorname{tg} \delta_C \\ \operatorname{tg} \delta_O \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \operatorname{tg} \delta_a \\ \operatorname{tg} \delta_b \\ \operatorname{tg} \delta_c \\ \operatorname{tg} \delta_d \end{pmatrix}, \quad (5)$$

де матриця коефіцієнтів часток енергії кожного з компонентів – невироджена, тобто детермінант не дорівнює нулю.

Після помноження (5) на зворотну матрицю, знаходяться невідомі індивідуальні характеристики ізоляції – тангенси кутів фазної ( $\operatorname{tg} \delta_A, \operatorname{tg} \delta_B, \operatorname{tg} \delta_C$ ) та поясної ( $\operatorname{tg} \delta_O$ ) ізоляції

$$\begin{pmatrix} \operatorname{tg} \delta_A \\ \operatorname{tg} \delta_B \\ \operatorname{tg} \delta_C \\ \operatorname{tg} \delta_O \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \eta_A^a & \eta_B^a & \eta_C^a & \eta_O^a \\ \eta_A^b & \eta_B^b & \eta_C^b & \eta_O^b \\ \eta_A^c & \eta_B^c & \eta_C^c & \eta_O^c \\ \eta_A^d & \eta_B^d & \eta_C^d & \eta_O^d \end{pmatrix}^{-1} \cdot \begin{pmatrix} \operatorname{tg} \delta_a \\ \operatorname{tg} \delta_b \\ \operatorname{tg} \delta_c \\ \operatorname{tg} \delta_d \end{pmatrix}. \quad (6)$$

В таблиці 1 наведено результати вимірювань сукупних тангенсів кута діелектричних втрат та відновлених відповідно за (4) – (6).

### Експериментальні сукупні та відновлені параметри фазної та поясної ізоляції силового кабелю ААШВ 3×150 – 6 кВ

Сукупні втрати (%) в ізоляції, що виміряні при частотах				Відновлювані втрати (%) в компонентах ізоляції за результатами сукупних вимірювань			
Схема обстеження	0,1 кГц	1 кГц	10 кГц	Компонент ізоляції	0,1 кГц	1 кГц	10 кГц
a ( $\text{tg}\delta_a$ )	0,435	0,507	1,089	Фаза А ( $\text{tg}\delta_a$ )	0,4745	0,4927	<b>0,9809</b>
b ( $\text{tg}\delta_b$ )	0,444	0,449	0,818	Фаза В ( $\text{tg}\delta_b$ )	0,4915	0,3831	0,4687
c ( $\text{tg}\delta_c$ )	0,467	0,466	0,838	Фаза С ( $\text{tg}\delta_c$ )	0,5350	0,4152	0,5065
d ( $\text{tg}\delta_o$ )	0,423	0,507	1,088	Поясна ізоляція ( $\text{tg}\delta_o$ )	0,3337	<b>0,8378</b>	<b>2,4994</b>

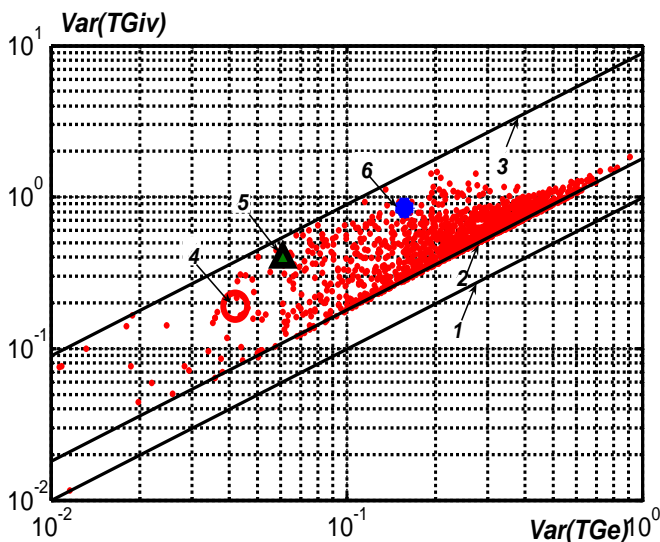
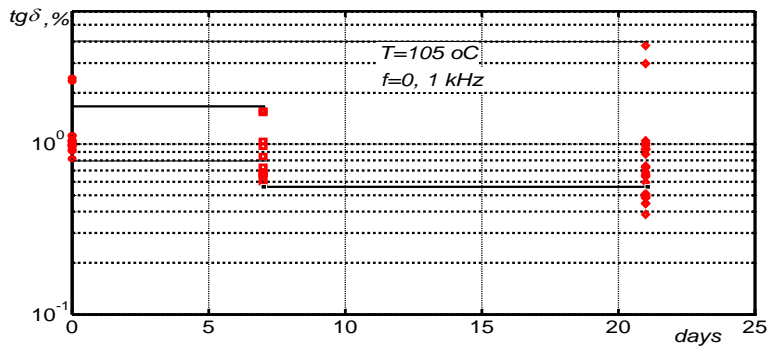


Рис. 4. Залежність коефіцієнту варіації відновлених параметрів фазної та поясної ізоляції від коефіцієнту варіації

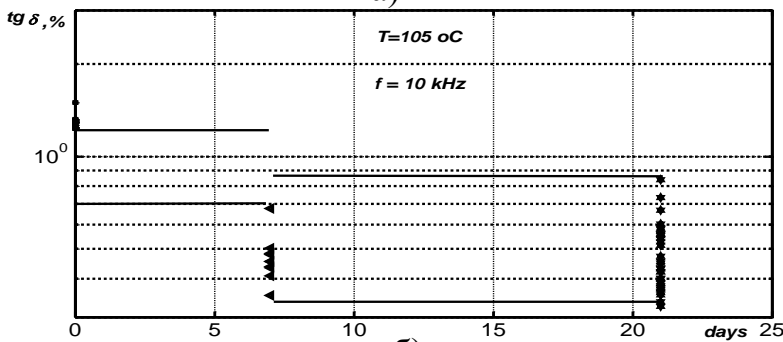
Як видно з таблиці 1, сукупні вимірювання не відображають старіння фазної та поясної ізоляції: тангенси кутів діелектричних втрат, практично, однакові для кожної частоти. Відновлювані індивідуальні втрати сильно відрізняються, що свідчить про нерівномірність старіння різних компонентів ізоляції. Найбільш зістареною є поясна ізоляція: на частоті 10 кГц спостерігається різниця характеристик фазної та поясної ізоляції в 5 разів. Виділяються також підвищені втрати ізоляції фази А, що може бути обумовлено несиметричними режимами експлуатації кабелю. Похибки оцінок індивідуальних характеристик компо-

нентів ізоляції можуть зрости в 1,7– 10 разів в порівнянні з похибкою вихідних даних (рис. 4). Це потребує високої точності вимірювань сукупних значень діелектричних втрат за вказаними схемами. На рис. 4: 1 – лінія рівнозначності характеристик, які порівнюються; 2, 3 – лінія мінімального та максимального зростання коефіцієнту варіації – від 1,7 до 10. Точки 4, 5 та 6 – за експериментальними даними зразка кабелю ААШВ 3×150 6 кВ на частотах 100, 1000 та 10000 Гц відповідно. В разі необхідності знаходження індивідуальних характеристик між фазного простору необхідно провести вимірювання за схемою III, знайти за результатами розрахунку електричного поля частки енергії  $\eta_{A-B}$ ,  $\eta_{B-C}$ ,  $\eta_{C-A}$ , що накопичуються в між фазному просторі, та вирішити СЛАР 7-го порядку.

У розділі 4 виконано оцінку чутливості тангенсу кута діелектричних втрат до теплового старіння паперово-просоченої ізоляції силових кабелів середньої напруги. В силових кабелях середньої напруги переважає теплове старіння.



а)



б)

Рис. 5. Динаміка зміни тангенсу кута діелектричних втрат при теплому старінні зразка силового кабелю АСБ 3×90+1×35 – 1 кВ на частоті 0,1 (а) та 10 кГц (б)

температурі 105 °C еквівалентні року експлуатації кабелю в нормальних умовах. В якості критерію значимості відмінностей  $\text{tg} \delta$  в процесі теплового старіння застосовується непараметричний критерій Тьюкі (Тк) (рис. 5): при  $\text{Tk} > 7$  вибірки відрізняються суттєво при довірчій вірогідності  $p = 95\%$ . (рис. 5) Старіння паперово-просоченої ізоляції кабелів виявляється по збільшенню  $\text{tg} \delta$  на частоті 10 кГц: варіації тангенсу кута діелектричних втрат 3-х – 7-кратні відносно початкового стану. Це є підтвердженням високої чутливості обраного показника в якості діагностичного параметру.

В розділі 5 визначені критерії оцінки технічного стану силових кабелів в експлуатації. Закономірності механічного та теплового старіння силових кабелів з паперово-просоченою ізоляцією (дивись формули (1) та (6)) свідчать про наявність кореляційного зв'язку між механічним ресурсом та тангенсом кута діелектричних втрат. Встановлена від'ємна кореляція між числом подвійних згинів кабельного паперу та тангенсом кута діелектричних втрат фазної та поясної ізоляції. Лінійний парний коефіцієнт кореляції К. Пірсона становить -0,9733 та -0,9800 для фазної та поясної ізоляції відповідно. Знайдені рівняння лінійної (формули 8 та 9, рис. 6) та експоненціальної (формули 10 та 11) парної

Закономірності теплового старіння описуються формулою Арреніуса

$$\tau = A \cdot e^{\frac{W_a}{kT}}, \quad (7)$$

де  $\tau$  – ресурс ізоляції;  $W_a$  – енергія активації теплового старіння.

Коректне прискорення теплового старіння в лабораторних умовах повинно виконуватися при температурах, які відповідають умовам адекватності процесів старіння при нормальній робочій температурі в експлуатації, тобто при однакових енергіях активації. Для кабелів з паперово-просоченою ізоляцією робоча температура становить 65 °C. Три тижня прискореного теплового старіння при

регресії між утомленою міцністю  $N$  кабельного паперу та тангенсом кута діелектричних втрат фазної (8, 10) та поясної (9, 11) ізоляції силових кабелів на частоті 50 Гц при значенні довірчої вірогідності  $p=0,95$

$$\operatorname{tg} \delta_{\phi}^n = 1,2703541 - 0,000340764 * N, \% \quad (8)$$

$$\operatorname{tg} \delta_n^n = 1,2932 - 0,0003 * N, \% \quad (9)$$

$$\operatorname{tg} \delta_{\phi}^{\partial} = 1,3916 \cdot e^{-0,0003N}, \% \quad (10)$$

$$\operatorname{tg} \delta_n^{\partial} = 1,4961 \cdot e^{-0,0005N}, \% \quad (11)$$

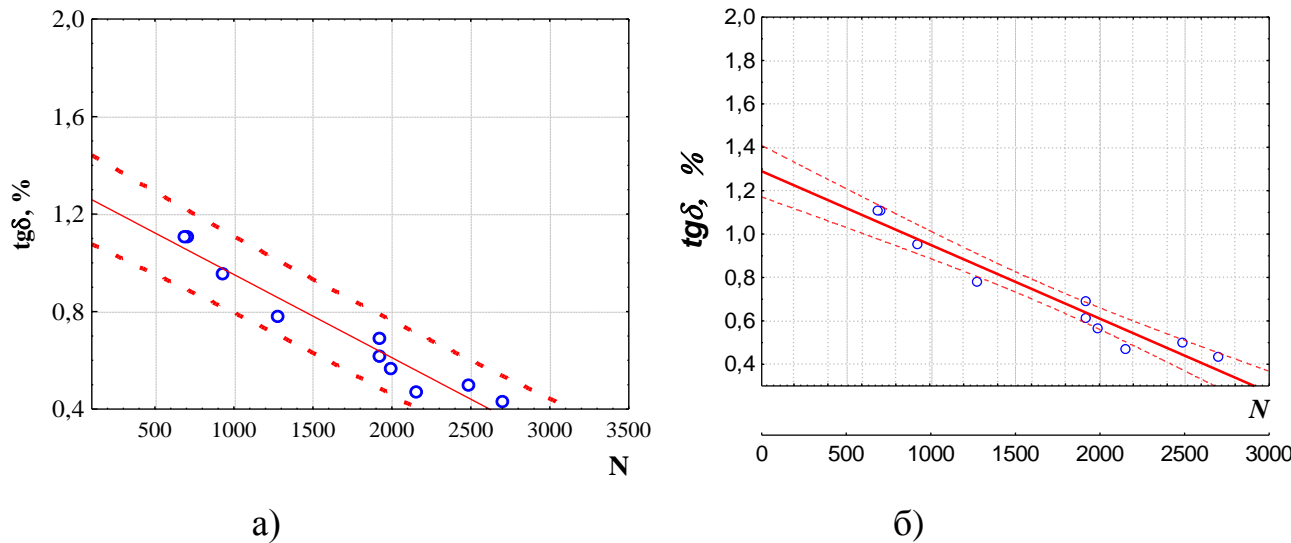


Рис. 6. До визначення критичного значення тангенсу кута діелектричних втрат фазної (а) та поясної (б) ізоляції при наявності лінійної парної регресії між числом подвійних згинів  $N$  та

На основі регресійного аналізу між утомленою міцністю кабельного паперу та тангенсом кута діелектричних втрат фазної та поясної ізоляції встановлено порогові рівні втрат, що характеризують технічний стан силових кабелів середньої напруги з паперово-просоченою ізоляцією: а) 0,4% та менше – нормальний стан ізоляції; б) 0,4 – 0,6% – є початкові ознаки старіння ізоляції; в) 0,6 – 1,0% – помірне старіння ізоляції, яке відповідає вичерпанню  $\frac{3}{4}$  ресурсу за результатами утомлених випробувань кабельного паперу на згин; г) 1,0 – 2% – критичний стан ізоляції, що потребує ремонту кабельної лінії; д) вище 2% – небезпечний стан, що може призвести до теплового пробою кабелю.

В експлуатації питома пошкодження кабельних ліній з кінцевими муфтами становить в середньому від 5 до 7 випадків на 100 км за рік. Для виявлення природи дефекту кабельної лінії запропоновано метод неруйнівного контролю силових кабелів за тангенсом кута діелектричних втрат фазної та сталою часу саморозряду паперово-просоченої ізоляції, що дозволяє виявити природу дефекту кабельної лінії (КЛ). Електричний опір ізоляції  $R$  та електрична ємність  $C$  кабельної лінії залежать від її довжини. Для коректного порівняння результатів контролю кабельних ліній різної довжини запропоновано параметр, котрий не залежить ні від довжини кабелю, ні від геометричних розмірів ізоляції – стала часу саморозряду ізоляції:  $\theta = R \cdot C$ .

На рис. 7 показана схема заміщення кабельної лінії з кінцевими муфтами, в якій враховуються параметри кінцевих муфт та кабелю:  $R_0, C_0$  – опір витoku та власна ємність муфти;  $R_3, C_3$  – опір витoku та електрична ємність кабелю;  $R_1, L_1$  – активний опір та індуктивність половини довжини кабелю;  $R_2, L_2$  – ті ж параметри другої половини кабелю. Якщо опір  $R_0$  однієї із муфт знижено, то цей дефект проявиться при контролі на постійній

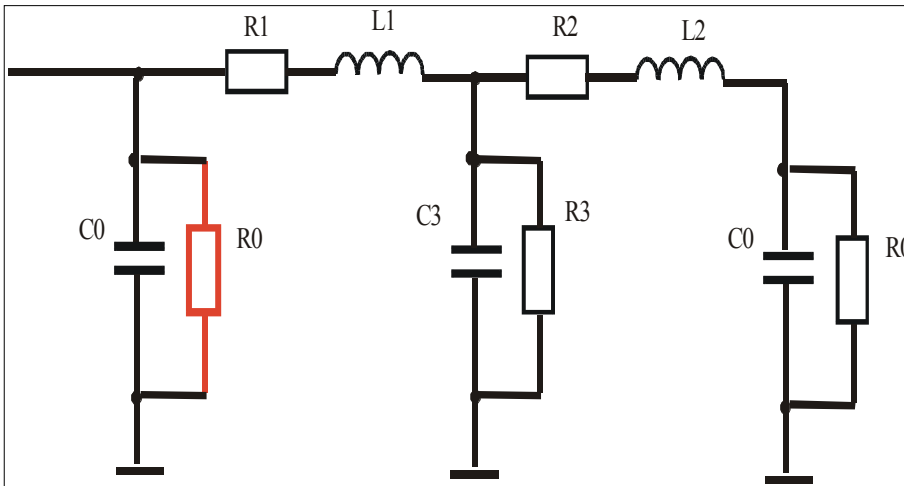


Рис.7. Схема заміщення кабельної лінії

напрузі в зниженому опорі кабельної лінії. Контроль на змінній напрузі може дати цілком прийнятний тангенс кута діелектричних втрат, який визначається зниженим значенням  $R_0$  та відносно великою ємністю  $C_3$  кабелю:  $\text{tg } \delta = \frac{1}{R_0 \cdot \omega C_3}$ .

Так, при  $R_0=10$  МОм та  $C_3=50$  нФ, коли стала часу саморозряду кабельної лінії становить всього 0,5 с ( $\theta=R_0 \cdot C_3 = 10 \cdot 10^6 \cdot 50 \cdot 10^{-9}=0,5$  с), маємо цілком прийнятне значення  $\text{tg } \delta = \frac{1}{10 \cdot 10^6 \cdot 314 \cdot 50 \cdot 10^{-9}} = 0,0064 = 0,64\%$ . Можлива і інша ситуація, коли при високому опорі КЛ рівень  $\text{tg } \delta$  виявиться підвищеним. Цей випадок пов'язаний з загальним старінням ізоляції кабелю, тому що діелектричні втрати в муфті, власна електрична ємність котрої значно менша електричної ємності кабелю, незначні. Таким чином, порівняння результатів контролю на постійній та змінній напрузі дозволяє уточнити характер дефекту. Всі можливі ситуації співвідношень між сталою часу саморозряду ізоляції та тангенсом кута діелектричних втрат наведені в таблиці 2.

Таблиця 2

**Ознаки дефектів елементів кабельних ліній з паперово-просоченою ізоляцією**

$\theta$	$\text{tg } \delta < (0,5 - 0,8)\%$	$\text{tg } \delta > (0,8 - 2) \%$
$\theta < (1 - 10) \text{ с}$	Муфта	Муфта та кабель
$\theta > (10 - 100) \text{ с}$	Нормальний стан	Кабель

**ВИСНОВКИ**

В дисертаційній роботі вирішена науково-практична задача по розробці методів контролю старіння паперово-просоченої ізоляції силових кабелів середньої напруги.



В процесі експлуатації силових кабелів спостерігається старіння ізоляції, що призводить до появи різниці властивостей фазної та поясної ізоляції. Деструкція целюлози та міграція низькомолекулярних полярних продуктів її розпаду з більш нагрітої фазної ізоляції в більш прохолодну поясну ізоляції обумовлює механічне та теплове старіння останньої в більшій мірі. За результатами роботи отримані висновки:

1. Число подвійних згинів кабельного паперу – утомлена міцність – змінюється в процесі експлуатації силових кабелів монотонно: від  $N \geq 2000$  в початковому стані до  $N = 10 - 20$  в стані, котрий відповідає вичерпанню механічного ресурсу кабелів з паперово-просоченою ізоляцією. Визначено, що цей руйнівний параметр дуже чутливий до старіння кабельного паперу, тому метод контролю за числом подвійних згинів має високу чутливість. Встановлені критерії граничного стану паперово-просоченої ізоляції за механічними характеристиками, що визначаються по зменшенню числа подвійних згинів в 200 разів відносно початкового, незістареного, стану. Критичне значення числа подвійних згинів гранично зістареної кабельної ізоляції дорівнює 10.

2. Нерівномірне теплове старіння по перерізу кабелю призводить до різниці в частках енергії, яка накопичується в компонентах ізоляції, тобто в тангенсі кута діелектричних втрат. Але тангенс кута діелектричних втрат фазної та поясної ізоляції недосяжний для вимірювань безпосередньо: характеристики вимірюються в сукупності. Це призводить до усереднення характеристик ізоляції: різниця властивостей компонентів малопомітна. Похибки в оцінці стану ізоляції зростають. Запропоновано індивідуальні характеристики фазної та поясної ізоляції знаходити в результаті рішення системи лінійних алгебраїчних рівнянь 4-го порядку, що дозволяє помітити різницю властивостей компонентів в результаті старіння ізоляції окремо.

3. Експериментально визначено, що похибки оцінок відновлених характеристик фазної та поясної ізоляції зростають в 1,7 – 10 рази в порівнянні з похибками початкових даних. Для підвищення точності методу контролю, що спирається на виділенні із сукупних результатів вимірювань тангенсу кута діелектричних втрат фазної та поясної ізоляції окремо, застосовується чотирьох провідна система підключення об'єкту контролю до вимірювача імітансу, режим накопичення 10-ти результатів вимірювання та їх автоматичного усереднення приладом.

4. Встановлена від'ємна кореляція між числом подвійних згинів та тангенсом кута діелектричних втрат. Коефіцієнти лінійної кореляції дорівнюють -0,9733 та -0,9800 для фазної та поясної ізоляції відповідно. Наявність кореляційного зв'язку між механічними та електричними характеристиками свідчить про можливість неруйнівного контролю за тангенсом кута діелектричних втрат фазної та поясної ізоляції окремо. На підставі лінійного та експоненціального регресійного аналізу при довірчій вірогідності  $p = 0,95$  встановлені критичні значення  $\text{tg}\delta$  для поясної та фазної ізоляції, що відповідають критичному значенню числа подвійних згинів ( $N_{кр} = 10$ ). Для фазної ізоляції: 1,2673 % та 1,3874 %; для поясної ізоляції: 1,2900 % та 1,4886 % у випадку

лінійної та експоненціальної парної регресії відповідно.

5. Контроль за тангенсом кута діелектричних втрат на змінній напрузі дозволяє виявити загальне погіршення стану паперово-просоченої ізоляції, що обумовлено її старінням. Дефекти кабельної лінії, в склад котрої входять також і муфти, неможливо визначити тільки за цим параметром. Контроль кабельних ліній в експлуатації необхідно проводити і на постійній напрузі.

Електричний опір ізоляції та ємність кабельної лінії залежать від її довжини. Для коректного співставлення результатів контролю кабельних ліній різної довжини вводиться параметр, який не залежить ані від довжини кабелю, ані від товщини – стала часу саморозряду ізоляції  $\theta$ . Це об'єктивний показник стану паперово-просоченої ізоляції, котрий не залежить від її геометричних розмірів.

Порівняння результатів контролю на постійній та змінній напрузі дозволяє уточнити характер та природу дефектів. Перші – чутливі до локальних дефектів, якими є муфти; другі – до глобальних дефектів, що обумовлені старінням ізоляції.

6. Результати дисертаційної роботи впроваджено в Сертифікаційному центрі АСУ Державного центру регулювання якості поставок та послуг Державної інспекції ядерного регулювання України (м. Харків) при оцінці технічного стану кабелів АЕС, в ТОВ «Стекс» при діагностичних обстеженнях силових кабелів енергомереж, в навчальному процесі кафедри «Електроізоляційна та кабельна техніка» Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут».

### **СПИСОК ОПУБЛІКОВАНИХ ПРАЦЬ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ**

1. Москвитин Е. С. Оценка технического состояния высоковольтных кабелей с бумажно-масляной изоляцией по числу двойных перегибов / Е. С. Москвитин // Вісник Національного технічного університету «ХПІ». – Харків: НТУ «ХПІ». – №34. – 2006, С. 34 – 40.

2. Москвитин Е. С. Неоднородные кабельные трассы: анализ свойств участков по результатам измерений восстанавливающегося напряжения / Б. Г. Набока, А. В. Беспрозванных, Е. С. Москвитин // Електротехніка і Електромеханіка. – № 6. – 2009 р. – С. 60–69.

*Здобувачем запропоновано визначати характеристики окремо кожної з ділянок неоднорідної кабельної лінії шляхом розкладу на складові.*

3. Москвитин Е. С. Обследование изоляции трехфазных кабелей в металлической оболочке / А. В. Беспрозванных, Б. Г. Набока, Е. С. Москвитин // Электричество. – №1. – 2010. – С. 48 – 54.

*Здобувачем виконано оцінки похибки методу контролю старіння фазної та поясної ізоляції за тангенсом кута діелектричних втрат на основі розрахунку коефіцієнту варіації  $tg\delta$  в залежності від помилок вихідних даних.*

4. Москвитин Е. С. Обоснование электрофизических характеристик полупроводящих экранов силовых кабелей высокого напряжения со сшитой изоляцией / Б. Г. Набока, А. В. Беспрозванных, Е. С. Москвитин // Електротехніка і Електромеханіка. – № 3. – 2010. – С. 44 – 47.

*Здобувачем запропонована схема заміщення ізоляції силових кабелів високої*



напруги.

5. Москвитин Е. С. Техническое состояние кабелей энергоблоков АЭС: силовые кабели с бумажно-масляной изоляцией / Б. Г. Набока, А. В. Беспрозванных, Е. С. Москвитин [и др.] // Проблемы забезпечення безпеки інформаційних і керуючих систем АЕС: збірник наукових праць / під ред. М. А. Ястребенецького. – Одеса: Астропринт, 2010 – С. 262 – 271.

*Здобувачем виконано узагальнення результатів неруйнівного електричного контролю та співставлення їх з результатами руйнівного контролю за числом подвійних згинів кабельного паперу силових кабелів.*

6. Москвитин Е. С. Критерии по тангенсу угла диэлектрических потерь для оценки технического состояния силовых кабелей с бумажно-пропитанной изоляцией в эксплуатации / Б. Г. Набока, А. В. Беспрозванных, Е. С. Москвитин [и др.] // Вісник Національного технічного університету «ХПІ». – Харків: НТУ «ХПІ». – №55. – 2010. – С. 76 – 83.

*Здобувачем встановлено кореляційні залежності між тангенсом кута діелектричних втрат фазної та поясної ізоляції та утомленою міцністю кабельних паперів на злам.*

7. Москвитин Е. С. Контроль процессов старения силовых кабелей с бумажно-пропитанной изоляцией по изменению диэлектрических характеристик изоляционных промежутков / Е. С. Москвитин // Вісник Національного технічного університету «ХПІ». – Харків: НТУ «ХПІ». – №3. – 2011. – С. 95 – 106.

8. Москвитин Е. С. Число двойных перегибов как индикатор степени старения кабельных бумаг / А. В. Беспрозванных, Е. С. Москвитин // Електротехніка і Електромеханіка. – № 3. – 2011 р. – С. 62 – 66.

*Здобувачем виконано вимірювання та статистичну обробку числа подвійних вигинів кабельного паперу зразків силових кабелів в початковому стані та після додаткового теплового старіння.*

9. Москвитин Е. С. Диагностика кабельных линий энергосистем по тангенсу угла диэлектрических потерь и постоянной времени саморазряда бумажно-пропитанной изоляции / Б. Г. Набока, А. В. Беспрозванных, Е. С. Москвитин [и др.] // Електротехніка і Електромеханіка. – № 2. – 2011 р. – С. 65 – 69.

*Здобувачем запропонована класифікація дефектів кабельних ліній за тангенсом кута діелектричних втрат та сталою часу саморозряду.*

10. Москвитин Е. С. Энергосберегающая экологически чистая вакуумная установка для сушки и пропитки кабелей с бумажной изоляцией / Москвитин Е. С., Гурин А. Г., Кутовой В. А. [и др.] // Вісник Національного технічного університету «ХПІ». – Харків: НТУ «ХПІ». – №41. – 2011. – С. 55 – 69.

*Здобувачем обґрунтовані параметри, що контролюються в процесі автоматичного управління процесом сушки та просочення кабелів з паперовою ізоляцією.*

11. Москвитин Е. С. Сложность применения неразрушающих методов

испытания бумажно-масляной изоляции кабелей при диагностике их состояния. / Москвитин Е. С. // Інформаційні технології: наука, техніка, технологія, освіта, здоров'я: Матеріали XVII Міжнародної науково-практичної конференції Ч. I (22–22 травня 2009 р. Харків) / за ред. проф. Товажнянського Л. Л. – Харків: НТУ «ХП», с. 542

12. Карпушенко В. П. Енергозберігаючий екологічно чистий вакуумний комплекс для сушки та просякнення кабелів з паперовою ізоляцією / Карпушенко В. П., Антоненко Ю. А., Кутовий В. А. та ін. // Інформаційні технології: наука, техніка, технологія, освіта, здоров'я: Тези доповідей XIX Міжнародної науково-практичної конференції, Ч. II (01–03 червня 2011 р. Харків) / за ред. проф. Товажнянського Л. Л. – Харків: НТУ «ХП». – с. 205

*Здобувачем запропоновано методи визначення ступені просякнення паперово-просоченої ізоляції кабелів.*

13. Москвитин Е. С. Статистичний розкид числа подвійних згинів кабельного паперу силових кабелів в процесі механічного старіння / Москвитин Е. С. // Інформаційні технології: наука, техніка, технологія, освіта, здоров'я: Тези доповідей XIX міжнародної науково-практичної конференції, Ч. II (01–03 червня 2011 р. Харків) / за ред. проф. Товажнянського Л. Л. – Харків: НТУ «ХП». – с. 215

14. Москвитин Е. С. Вычислительные эксперименты в электроизоляционных и кабельных конструкциях / Беспрозванных А. В. Москвитин Е. С. // Электропанорама. – 2011. – № 10. – ТОВ «Електроінформцентр України». – Київ. – 2009. – С. 30-33

*Здобувачем зроблено розрахунок охолодження у водяній ванні ізолюваної жили кабелю.*

## АНОТАЦІЇ

**Москвітін Є. С. Методи контролю старіння паперово-просоченої ізоляції силових кабелів середньої напруги.** – Рукопис.

Дисертація на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук за спеціальністю 05.11.13 – прилади та методи контролю і визначення складу речовин. Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», Харків, 2012.

В процесі експлуатації силових кабелів спостерігається нерівномірне старіння фазної та поясної ізоляції. Деструкція целюлози та міграція низькомолекулярних полярних продуктів її розпаду з більш нагрітої фазної ізоляції в більш прохолодну поясну ізоляцію обумовлює механічне та теплове старіння останньої в більшій мірі.

Запропоновано метод контролю старіння паперово-просоченої ізоляції силових кабелів за числом подвійних згинів кабельного паперу. Метод контролю має високу чутливість: число подвійних згинів кабельного паперу змінюється в процесі експлуатації силових кабелів монотонно від  $N \geq 2000$  в початковому стані до критичного значення  $N_{кр} = 10$  в стані, котрий відповідає вичерпанню механічного ресурсу кабельного паперу.

Тангенс кутів діелектричних втрат фазної та поясної ізоляції недосяжні для вимірювань безпосередньо. Запропоновано метод контролю старіння паперової просоченої ізоляції силових кабелів за тангенсом кута діелектричних втрат індивідуальних характеристик фазної та поясної ізоляції окремо. Метод ґрунтується на сукупних вимірюваннях діелектричних параметрів паперово-просоченої ізоляції та розв'язку системи лінійних алгебраїчних рівнянь для знаходження індивідуальних характеристик фазної та поясної ізоляції.

Закономірності механічного та теплового старіння силових кабелів середньої напруги свідчать про наявність кореляційного зв'язку між механічним ресурсом та тангенсом кута діелектричних втрат. На підставі лінійного та експоненціального регресійного аналізу при довірчій вірогідності  $p = 0,95$  встановлені критичні значення  $\text{tg}\delta$  для поясної та фазної ізоляції, що відповідають критичному значенню числа подвійних згинів.

Контроль за тангенсом кута діелектричних втрат на змінній напрузі дозволяє виявити загальне погіршення стану паперово-просоченої ізоляції, що обумовлено її старінням. Для класифікації дефектів кабельної лінії, в склад котрої входять муфти, контроль необхідно проводити також і на постійній напрузі. Порівняння результатів контролю на постійній та змінній напрузі дозволяє уточнити характер та природу дефектів.

Розроблені методи контролю дозволяють підвищити достовірність висновків відносно технічного стану паперово-просоченої ізоляції силових кабелів.

**Ключові слова:** методи контролю, старіння паперово-просоченої ізоляції; механічне старіння, теплове старіння, число подвійних згинів, крива статистичної щільності, сукупні вимірювання, тангенс кута діелектричних втрат фазної та поясної ізоляції, похибки оцінок, стала часу саморозряду.

**Москвитин Е. С. Методы контроля старения бумажно-пропитанной изоляции силовых кабелей среднего напряжения.** – Рукопись.

Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 05.11.13 – приборы и методы контроля и определение состава веществ. Национальный технический университет «Харьковский политехнический институт», Харьков, 2012.

В процессе эксплуатации силовых кабелей наблюдается неравномерное старение фазной и поясной изоляции. Деструкция целлюлозы и миграция низкомолекулярных полярных продуктов ее разложения с более нагретой фазной изоляции в более прохладную поясную изоляцию обуславливают механическое и тепловое старение последней в большей степени.

Предложен метод контроля старения бумажно-пропитанной изоляции силовых кабелей по числу двойных перегибов кабельной бумаги. Интегральные функции распределения числа двойных перегибов описываются логарифмически-нормальным законом, причем среднее логарифмическое  $x_0$  уменьшается, а дисперсия  $\sigma_x$  – увеличивается в процессе старения. В процессе эксплуатации и теплового старения наблюдается более интенсивное старение поясной изоляции.

В результате появляется различие в числе двойных перегибов для поясной и фазной изоляции силовых кабелей напряжением 1 – 10 кВ. Метод контроля имеет высокую чувствительность: число двойных перегибов меняется в процессе эксплуатации монотонно от  $N \geq 2000$  в исходном состоянии до критического значения  $N_{кр} = 10$  в состоянии, которое отвечает исчерпанию механического ресурса кабельной бумаги.

Тангенсы углов диэлектрических потерь фазной и поясной изоляции недоступны для непосредственного измерения. Предложен метод контроля старения бумажно-пропитанной изоляции силовых кабелей по тангенсу угла диэлектрических потерь индивидуальных характеристик фазной и поясной изоляции по отдельности. Метод основывается на совокупных измерениях диэлектрических параметров бумажно-пропитанной изоляции и решении системы линейных алгебраических уравнений для определения индивидуальных характеристик фазной и поясной изоляции. Вариации  $\text{tg}\delta$  в процессе теплового старения достигают 3-х – 7-и крат. Это свидетельствует о высокой чувствительности выбранного показателя в качестве диагностического. Нахождение характеристик изоляции по результатам совокупных измерений предъявляет повышенные требования к точности исходных данных, т.к. погрешность оценок, найденных в результате решения СЛАУ, возрастает в 1,7 – 10 раз по сравнению с погрешностью исходных данных. Для повышения точности метода контроля по тангенсу угла диэлектрических потерь необходимо использовать режим накопления результатов измерений.

Закономерности механического и теплового старения силовых кабелей среднего напряжения свидетельствуют о наличии корреляционной связи между механическим ресурсом и тангенсом угла диэлектрических потерь. Наблюдается отрицательная корреляция между тангенсом угла диэлектрических потерь и числом двойных перегибов. Коэффициенты корреляции равны -0,9733 и -0,9800 для фазной и поясной изоляции соответственно. Наличие корреляционной связи между электрическими и механическими характеристиками бумажно-пропитанной изоляции силовых кабелей свидетельствует о возможности их неразрушающего контроля по тангенсу угла диэлектрических потерь фазной и поясной изоляции по отдельности. На основе линейного и экспоненциального регрессионного анализа при доверительной вероятности  $p = 0,95$  установлены критические значения  $\text{tg}\delta$  для поясной и фазной изоляции, отвечающие критическому значению числа двойных перегибов. На основании корреляционной связи между усталостной прочностью бумаги и  $\text{tg}\delta$  определены пороговые значения (уровни) тангенса угла диэлектрических потерь силовых кабелей, характеризующие техническое состояние бумажно-пропитанной изоляции.

Контроль по тангенсу угла диэлектрических потерь на переменном напряжении позволяет выявить общее ухудшение состояния бумажно-пропитанной изоляции, обусловленное ее старением. Для классификации дефектов кабельной линии, в состав которой входят и муфты, контроль необходимо проводить также и на постоянном напряжении. Сопротивление изоляции и емкость кабельной линии зависят от ее длины. Для корректного

сопоставления результатов контроля кабельных линий разных длин вводится параметр, не зависящий ни от длины кабеля, ни от толщины изоляции – постоянная времени саморазряда изоляции  $\theta$ . Это объективный показатель состояния бумажно-пропитанной изоляции, который не зависит от ее геометрических размеров. Сравнивая результаты контроля на постоянном и переменном напряжении, можно уточнить характер и природу дефектов. Первые – чувствительны к локальным дефектам, которые связаны с муфтами, вторые – к глобальным дефектам, которые обусловлены общим старением изоляции. Введенные соотношения между постоянной времени саморазряда изоляции  $\theta$  и тангенсом угла диэлектрических потерь  $\text{tg}\delta$  позволяют установить признаки дефектов элементов кабельных линий в эксплуатации.

Разработанные методы контроля позволяют повысить достоверность вырабатываемых заключений о техническом состоянии бумажно-пропитанной изоляции силовых кабелей энергоблоков АЭС и энергосистем, т.к. алгоритм оценки технического состояния ведется по трем диагностическим параметрам: числу двойных перегибов, тангенсу угла диэлектрических потерь фазной и поясной изоляции по отдельности, постоянной времени саморазряда.

**Ключевые слова:** методы контроля, старение бумажно-пропитанной изоляции; механическое старение, тепловое старение, число двойных перегибов, кривая статистической плотности, совокупные измерения, тангенс угла диэлектрических потерь фазной и поясной изоляции, погрешности оценок, постоянная времени саморазряда изоляции.

**Moskvitin E. S. Methods of controlling ageing the impregnated paper insulation of power cables an average voltage.** – Manuscript.

The thesis is presented for scientific degree of Cand. Tech. Sci. on a specialty 05.11.13 – Devices and a quality monitoring and definition of substances structure. National Technical University «Kharkiv Polytechnic Institute», Kharkiv, 2012.

In exploitation process of power cables is observed non-uniform ageing phase and zone isolation. Destruction cellulose and low-molecular polar products of its decomposition migration from more heated phase insulation to colder zone of insulation causes more mechanical and thermal aging of it.

Proposed a method for controlling aging of power cables impregnated paper insulation by double bends number of a cable paper. The method of controlling has high sensitivity: the double bends number varies in exploitation process monotonically: from  $N \geq 2000$  in an initial state up to critical value  $N_{cr} = 10$  in a state that corresponds to the exhaustion mechanical resource of cable paper.

Dielectric loss tangent phase and zone insulation is unavailable for direct measurement. Proposed method for controlling the power cables impregnated paper insulation aging by individual characteristics dielectric loss tangent phase and zone insulation separately. The method based on cumulative measurements impregnated paper insulation dielectric parameters and solution linear algebraic equations system to determine the individual characteristics of the phase and zone insulation.

A pattern of mechanical and thermal aging medium voltage power cables shows a

correlation between the mechanical resource and the dielectric loss tangent. On the basis of linear and exponential regression the analysis with confidence probability  $p = 0,95$  established critical values of the  $\text{tg}\delta$  for a zone and phase insulation, corresponding the critical value of double bends number ( $N_{cr} = 10$ ).

Control of the dielectric loss tangent at a variable voltage allows revealing the general deterioration of the impregnated paper insulation, caused by its aging. For classification of cable line defects, which consists of structure enters and connectors the control should be carried out also on direct voltage. Comparison of test results on the direct and alternating voltage allows specifying character and nature of defects.

The developed methods of control improve the reliability of conclusion about the technical condition of power cables impregnated paper insulation.

**Key words:** methods to control, aging of impregnated paper insulation, mechanical aging, thermal aging, double bends number, the curve of the statistical density, aggregate measurements, the dielectric loss tangent phase and zone insulation, error of the estimate, self-discharge time constant of the insulation.