

НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ
«ХАРКІВСЬКИЙ ПОЛІТЕХНІЧНИЙ ІНСТИТУТ»

Безпрозваних Ганна Вікторівна

УДК 621.319.4

**МОНІТОРИНГ СТАРІННЯ БАГАТОЖИЛЬНИХ КАБЕЛІВ АЕС:
ТЕОРЕТИЧНІ ОСНОВИ І МЕТОДИ СКАНУВАННЯ ІЗОЛЯЦІЇ
ЕЛЕКТРИЧНИМ ПОЛЕМ**

Спеціальність 05.09.13 – техніка сильних електричних
та магнітних полів

Автореферат дисертації на здобуття наукового ступеня
доктора технічних наук

Харків – 2009

Дисертацією є рукопис

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

Науковий консультант: доктор технічних наук, професор

Набока Борис Григорович,
Національний технічний університет
«Харківський політехнічний інститут», м. Харків
професор кафедри електроізоляційної
та кабельної техніки

Офіційні опоненти:

Член-кор. НАН України, доктор технічних наук,
професор

Щерба Анатолій Андрійович,
Інститут електродинаміки НАН України, м. Київ,
завідувач відділу електроживлення технологічних
систем

доктор технічних наук, професор

Бржезицький Володимир Олександрович,
Національний технічний університет України
«Київський політехнічний інститут», м. Київ,
завідувач кафедри техніки та електрофізики високих
напруг

доктор технічних наук, старший науковий
співробітник

Резинкіна Марина Михайлівна,
Науково-технічний центр магнетизму технічних
об'єктів НАН України, м. Харків,
головний науковий співробітник

Захист відбудеться «_4_» лютого _____ 2010 р. о 12 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 «_26_» грудня _____ 2009 р.

Вчений секретар
спеціалізованої вченої ради

Юр'єва О.Ю.

ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

Актуальність теми. Силові та контрольні кабелі відіграють важливу роль в забезпеченні надійної та безпечної експлуатації енергоблоків АЕС. Це стосується насамперед кабелів систем безпеки та систем, важливих для безпеки, які повинні працювати не тільки за нормальних умов експлуатації, а також в умовах так званої максимальної проектної аварії (МПА), коли внаслідок витікання радіоактивної води першого контуру охолодження реактора температура в гермозоні зростає до 150 °С, тиск водяної пари – до 5 атм, а додаткова поглинута доза радіації кабелів швидко досягає величини 30 Мрад (як за весь попередній тридцятирічний період нормальної експлуатації). Кабелі повинні зберегти працездатність також і в після аварійний період (тривалістю до одного року), поки будуть ліквідовуватися наслідки МПА.

Можливість попадання в умови дії перегрітої водяної пари висуває жорсткі умови щодо теплостійкості та герметичності захисних оболонок, кінцевих муфт та ізоляції жил кабелів. Кабелі гермозон АЕС, виготовлені 30 – 35 років тому, не мають подовжньої герметизації. В разі втрати герметичності водяна пара попаде у внутрішній простір кабелів. При цьому можливе зростання струмів витоку аж до появи численних замикань між жилами кабелів, якщо внаслідок старіння ізоляції в ній утворилися дендрити та тріщини, а у міжфазному просторі – низькомолекулярні продукти (НМП) розпаду ізоляції. Вказані ознаки старіння ізоляції зазвичай не виявляються при традиційних випробуваннях під час планово-профілактичних робіт.

Сучасний стан проблеми моніторингу старіння кабелів АЕС характеризується використанням руйнівних методів: подачею високої випробувальної електричної напруги та відбором зразків для лабораторних обстежень. Методи, які основані на відборах мікропроб зразків ізоляції жил та матеріалів захисних оболонок, дають лише локальні оцінки стану та справедливі тільки в обмеженій області довжин кабелів. Існуючі методи неруйнівних електричних випробувань малоінформативні (як метод дуже низьких частот), недостатньо обґрунтовані (як метод відновлюваної напруги) або громіздкі в реалізації (як резонансні методи).

Необхідні спеціальні дослідження електричної ізоляції силових та контрольних кабелів, пов'язані з варіацією (скануванням) електричного поля, що склало напрямок дисертаційної роботи.

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами. Дисертація виконана у рамках наукового напрямку кафедри електроізоляційної та кабельної техніки Національного технічного університету «ХПІ». Здобувач, як відповідальний виконавець, брала участь по дослідженню технічного стану кабелів АЕС: госпдоговори «Обстеження технічного стану кабелів КПЕТІнг енергоблоку №4 ВП ЗАЕС з ціллю продовження строку експлуатації», «Проведення обстеження та оцінка технічного стану зразків кабелів енергоблоку №1 ВП ЗАЕС», «Обстеження технічного стану кабелів енергоблоку №1 ВП РАЕС

з метою продовження строку експлуатації»; «Проведення обстеження та оцінка технічного стану зразків кабелів енергоблоку №2 ВП РАЕС в лабораторних умовах»; «Обстеження технічного стану кабелів енергоблоку №2 ВП ХАЕС», «Розробка робочих програм обстеження технічного стану кабелів енергоблоків №1 та №2 ВП РАЕС», «Розробка методик обстеження технічного стану кабелів неруйнівними методами» (СертЦентр АСУ Держцентру якості Державного комітету ядерного регулювання України, м. Харків). Здобувач була виконавцем в держбюджетній темі МОН України «Розробка теоретичних засад визначення технічного стану твердої ізоляції» (ДР № 0108U006119) та госпдоговірній темі по розробці робочого проекту установки для вимірювання характеристик часткових розрядів в кабелях (ВАТ «Південкабель», м. Харків).

Метою роботи є розробка та обґрунтування методів моніторингу старіння багатожильних кабелів АЕС шляхом зондування їхньої ізоляції варіативним (скануючим) електричним полем.

Електричне поле змінюється за величиною (сканування за амплітудою) до виникнення об'ємних зарядів або часткових розрядів; по поперечному перетину кабелю – сканування за областю локалізації; частоті – сканування за частотою; по тривалості дії – сканування у часі. Явища, що при цьому виникають – часткові розряди (для яких визначається напруга початку та частота); дисипація енергії електричного поля (яка визначається за тангенсом кута діелектричних втрат $\text{tg}\delta$); утворення об'ємних та поверхневих зарядів (які оцінюються за величиною відновлюваної електричної напруги U_v) – дозволяють виявити *неоднорідності* структури ізоляції, які виникли внаслідок її старіння.

Для досягнення поставленої мети в роботі поставлені такі задачі.

1. Виконати аналіз можливостей виявлення та розпізнавання повітряних вкраплень в твердій ізоляції шляхом збудження в них часткових розрядів (ЧР). Вказати спосіб визначення дефектної ізоляції за допомогою порівняння сімейств диференційних амплітудних спектрів часткових розрядів, отриманих при різних напругах і представлених у подвійному логарифмічному масштабі.

2. Знайти напруженості електричного поля та напруги початку ЧР в багатожильних кабелях в залежності від схеми обстеження, наявності тріщин в ізоляції, способу скрутки – щільної одно направленої або вільної різнонаправленої.

3. Визначити долі електричної енергії, що накопичується в ізоляції жил, міжфазному просторі та в діелектричних захисних оболонках кабелів. Дисипація енергії змінного електричного поля пропорційна накопиченій енергії. Тому знання останньої дасть можливість визначити очікувані рівні $\text{tg}\delta$ при концентрації зондувального електричного поля в різних ділянках перетину кабелю. Порівняння $\text{tg}\delta$ сусідніх ділянок дасть можливість виявити неоднорідності його поперечної структури, обумовлені утворенням і накопиченням низькомолекулярних продуктів розпаду ізоляції.

4. Розробити методи прямих та сукупних вимірювань параметрів сімейств часткових погонних ємностей і відповідних їм тангенсів кутів діелектричних втрат для множини ізоляційних проміжків багатожильних кабелів.

5. Обґрунтувати послідовно- паралельну модель ізоляційних проміжків багатожильних кабелів, що відповідає експериментальним кривим кінетики накопичення і релаксації об'ємних зарядів та виникнення відновлюваної напруги.

6. Запропонувати метод виявлення зістареної ізоляції за величиною трибо-електричного потенціалу, що виникає при охолодженні кабелів.

Об'єкт дослідження – процеси старіння ізоляції та захисних діелектричних оболонок кабелів АЕС внаслідок тривалої дії підвищеної температури, проникаючого випромінювання, електричного поля, кисню, водяної пари.

Предмет дослідження – способи моніторингу старіння кабелів АЕС, що спираються на скануванні ізоляції електричним полем через варіації його величини, області локалізації, частоти, часу дії.

Методи дослідження: а) теоретичні – аналіз параметрів повітряних крапель в ізоляції за інтегральними рівняннями Вольтерра першого роду для частоти ЧР, що вимірюється при варіаціях величини випробувальної електричної напруги; аналіз електричного поля в малих ізоляційних проміжках багатожильних кабелів на основі застосування інтегральних рівнянь Фредгольма першого і другого роду та методу Крилова-Боголюбова; визначення інтегральних характеристик кусочно-однорідної ізоляції, а саме електричної енергії, що накопичується окремо в ізоляції жил, міжфазному просторі, діелектричній захисній оболонці; аналіз послідовно-паралельних схем заміщення ізоляційних проміжків для нестационарних режимів накопичення та дисипації об'ємних зарядів і виникнення відтворюваної напруги ;

б) експериментальні – аналіз диференційних амплітудних спектрів ЧР в різних функціональних шкалах; спостереження за зміною властивостей зразків кабелів протягом прискореного термо-радіаційного старіння в лабораторних умовах; порівняння з результатами досліджень, виконаних в умовах експлуатації; встановлення ознак досягнення граничного технічного стану за результатами електричних досліджень.

Наукова новизна отриманих результатів полягає у такому.

1. Вперше розроблено метод моніторингу старіння ізоляції шляхом локалізації зондувального електричного поля діапазону звукових частот та порівняння діелектричних втрат в різних ділянках поперечного перерізу багатожильних кабелів.

2. Вперше розроблено метод виділення поодиноці параметрів ізоляційних проміжків віддалених одна від одної жил багатожильних кабелів за результатами сукупних вимірювань, що призводять до розв'язку погано обумовлених систем лінійних алгебраїчних рівнянь.

3. Вперше запропоновано метод оцінки розрядних характеристик та накопиченої енергії багато електродних систем з кусочно-однорідною ізоляцією та діелектричними клинами, утвореними циліндричними поверхнями ізолюваних жил, що торкаються одна одну.

4. Отримав подальший розвиток метод моніторингу старіння ізоляції за диференційними амплітудними спектрами часткових розрядів. Метод дозволяє

розпізнати вироби з підвищеним вмістом повітряних крапель в умовах, коли застосування аналізу на основі інтегральних рівнянь Вольтерра стає неможливим внаслідок інтерференції сигналів численних ЧР.

5. Отримало подальший розвиток обґрунтування методу відновлюваної електричної напруги та вперше запропоновано сукупність трьох параметрів – амплітуди, моменту максимуму та сталої часу саморозряду – для виявлення зістареної ізоляції кабелів.

6. Вперше запропоновано параметр старіння R_{20}/R_{2500} , що відображає нелінійність опору електричної ізоляції. Чим старіша ізоляція, тим швидше падає її опір з ростом електричної напруги.

7. Вперше запропоновано метод визначення окисленої поверхні ізоляції шляхом спостереження за термо-трибо-електричним потенціалом, що виникає при охолодженні кабелю.

Практичне значення одержаних результатів роботи : Розроблені теоретичні основи та методи сканування ізоляції електричним полем для моніторингу старіння багатожильних кабелів використані в СертЦентрі АСУ Держцентру якості Державного комітету ядерного регулювання України (м. Харків) при створенні методик обстеження технічного стану кабелів АЕС неруйнівними електричними методами: силових з поліетиленовою, паперово-масляною та полівінілхлоридною (ПВХ) ізоляцією; контрольних з термопластичною, термореактивною поліетиленовою ізоляцією та ПВХ ізоляцією. На основі виконаних обстежень розроблені методичні документи, які затверджені НАЕК «Енергоатом»: «Програма проведення обстеження технічного стану типового обладнання АЕС. Продовження строку експлуатації. Кабель вимірювальний терморадіаційностійкий, який не розповсюджує горіння типу КПЕТІнг.ПМ –Т.0.03.094-02. Київ, НАЕК «Енергоатом». 2002 р. ». Результати роботи також знайшли відображення в Робочих програмах обстеження технічного стану кабелів Рівненської та Хмельницької АЕС.

За розробленими методами корпорацією STEKS (м. Харків) виконані діагностичні обстеження силових кабелів «Полтавобленерго» на напругу 6 кВ для визначення можливостей подальшої експлуатації зістареної паперово-масляної ізоляції. Застосовані схеми сукупних вимірювань діелектричних втрат фазної та поясної ізоляції кабелів при випробувальній напрузі від 1 до 8 кВ. За результатами обстежень визначені кабелі з високою якістю ізоляції та кабелі, які частково зістарені. Дослідження дозволили запобігти необґрунтованій заміні двох силових кабелів довжиною 8 км.

Матеріали дисертаційної роботи використовуються в навчальних курсах «Методи випробувань електричної ізоляції», «Діагностика кабелів кабельних інформаційних мереж», «Кабелі зв'язку», при виконанні науково-дослідних робіт студентів, дипломному проектуванні спеціалістів та магістрів кафедри електроізоляційної та кабельної техніки НТУ «ХП».

Особистий внесок здобувача. Основні наукові результати отримані здобувачем самостійно: Теоретично обґрунтовані моделі для аналізу діелектричних втрат в багатожильних кабелях, особливістю яких є врахування

енергії, накопиченої окремо в ізоляції жил та міжфазному просторі. Обґрунтовані моделі для аналізу напруги початку часткових розрядів у багатожилевих кабелях через визначення падіння напруги на ділянках силових ліній в проміжках між ізольованими жилами та порівняння його з пробивною напругою за Пашеном. Запропонований метод сукупних вимірювань параметрів ізоляційних проміжків багатожилевих кабелів та перевизначені системи лінійних алгебраїчних рівнянь для часткових погонних ємностей і тангенсів кутів діелектричних втрат. Дані рекомендації щодо розв'язку погано обумовлених систем високого порядку (понад триста рівнянь). Запропоновані способи відбору планів мінімальної кількості дослідів, достатніх для знаходження параметрів за результатами сукупних вимірювань C і $\text{tg}\delta$ всіх ізоляційних проміжків кабелів. Запропоновані $C\text{-tg}\delta$ -і діаграми для наглядного зображення та зручного аналізу результатів обстежень багатожилевих кабелів. Визначені найбільш ймовірні області накопичення низькомолекулярних продуктів (НМП) розпаду ізоляції в багатожилевих кабелях – зони контакту ізольованих жил. Встановлені кореляційні залежності між трьома параметрами кривих відновлюваної напруги: амплітудою (U_m/E), моментом максимуму (t_m) і сталою часу саморозряду (θ). Обґрунтовано критичні рівні вказаних параметрів, після досягнення яких старіння ізоляції прискорюється. Запропоновано параметр нелінійності опору ізоляції R_{20}/R_{2500} та показано, що для більш зістарених ділянок кабелю (для поясної ізоляції) характерні більші значення вказаного параметру. Запропонований спосіб оцінки стану поверхні ізольованих жил за величиною термо-трибо-електричного потенціалу, що виникає при охолодженні кабелю та довгий час утримується на жилі.

Апробація роботи. Результати роботи доповідались на : Третя Міжнародна конференція «Электрическая изоляция – 2002» (м. Санкт-Петербург, Російська Федерація, 2002р.); Міжнародна конференція «Конструкційна міцність матеріалів і ресурс обладнання АЕС – Ресурс-2003» (м. Київ, 2003 р.); Семінар МАГАТЕ «Management by the senescence and extension of term of NPP-s exploitation term» (м. Кузнецовськ, 2003 р.); «Проблемы совершенствования электрических машин и аппаратов» (Siema '2005) (м. Харків, 2005р.); XIII Міжнародна науково-практична конференція «Информационные технологии: наука, техника, технология, образование, здоровье» (м. Харків, 2005 р.); «Нові розробки в області електричної ізоляції» (Харків, 2005р.); III-я Міжнародна конференція по оптоелектронним технологіям «PHOTONICS – ODS' 2005» (м. Вінниця, 2005 р.); Семінар МАГАТЕ по оцінці «Програми Управління Старінням Кабельної продукції АЕС» (м. Кузнецівськ, 2006 р.); Семінар МАГАТЕ по старінню кабелів АЕС (м. Вена, Австрія; 2006 р.); Четверта Міжнародна конференція «Электрическая изоляция – 2006» (м. Санкт-Петербург, Російська Федерація, 2006р.); X Міжнародна конференція «Безопасность АЭС и подготовка кадров – 2007» (м. Обнинськ, Російська Федерація, 2007 р.); Міжнародна конференція «Продление срока эксплуатации энергоблоков АЭС. Оценка технического состояния и управление старением оборудования и кабельных изделий» (м. Київ, 2007 р.); Expert Mission on Life Time Management of the Reactor Pressure Vessel (RPV) and Workshop on

Cable Aging for Rivne Nuclear Power Plant Unit (м. Кузнецовськ, 2007 р.); OECD–NEA SCAP Project (Париж, Франція, 2008 р); Семінар по Програмі управління старінням кабелів АЕС (м. Харків, 2008 р.); «Проблемы совершенствования электрических машин и аппаратов» (Siema '2008) (м. Харків, 2008р);. IAEA Consultants' Meeting on Cable Ageing in Nuclear Power Plants (Париж, Франція, 2009 р).

Публікації. Результати роботи відображені в 43-х публікаціях, серед них 31 стаття в фахових наукових виданнях ВАК України; 1 авторське свідоцтво.

Структура та обсяг дисертації. Дисертація складається зі вступу, шести розділів оригінальних досліджень, висновків, додатків. Вона містить 357 стор., з них 16 рисунків та 3 таблиці на окремих аркушах, список використаних джерел з 250 найменувань на 28 сторінках, 5 додатків на 38 сторінках.

ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ

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

В першому розділі показано, що моніторинг старіння кабелів АЕС спирається на комплекс випробувань зразків кабелів в лабораторних умовах та в умовах експлуатації. Проблемою є обґрунтування показників граничного стану, які залежать від типу діелектрика, конструкції кабелю та режиму експлуатації.

Найбільш розвинуті лабораторні методи контролю старіння ізоляції кабелів АЕС – фізико-механічні, фізичні, теплофізичні. Вони виконуються, в основному, на зразках матеріалів, вилучених з кабелів, тому широко не застосовують електричні методи досліджень.

Теплове та радіаційне старіння різних матеріалів виконується в лабораторних умовах *окремо* одне від одного. В дійсності в експлуатації йдуть більш складні та взаємопов'язані процеси: а) взаємодія продуктів розпаду різних компонентів ізоляції кабелів (наприклад, допоміжної ПВХ оболонки і ізоляції жил із зшитого ПЕ – в кабелях КПоСГ); б) каталітична дія міді жил на процеси окислення ізоляції; в) взаємодія з вуглекислим газом повітря, що призводить до появи окислів міді; г) утворення жирних кислот при радіолізі ізоляції (що призводить до корозії мідних екранів кабелів КПЭТИ, якщо мідь не захищена шаром олов'яного припою) та ін.

Тому лабораторні випробування матеріалів слід доповнювати випробуваннями цілих зразків кабелів, створюючи умови, наближені до експлуатаційних в нормальних умовах та в умовах максимальної проектної аварії (МПА).

Базові лабораторні методи оцінки стану матеріалів слід доповнювати спеціальними методами моніторингу кабелів *у цілому*, враховуючи наявність у останніх розвинутої системи електродів (жил та екранів), що дозволяє створювати сильне електричне поле та спостерігати явища електричної природи:

а) збудження часткових розрядів (ЧР) – явища, надзвичайно чутливого до виникнення та розвитку повітряних крапель в ізоляції, до змін її поверхневого

опору внаслідок окислення поверхні та осідання на ній низькомолекулярних продуктів розпаду ізоляції, гігроскопічного зволоження при втраті цілісності захисних оболонок;

б) створення тепловиділення в ізоляції на змінній напрузі звукової частоти та узгодження вимірювань з локалізацією електричного поля в різних ділянках кабелю для виявлення нерівномірності тепловиділення, обумовлених старінням ізоляції;

в) зондування ізоляції методом формування об'ємних та поверхневих електричних зарядів з подальшим спостереженням за їхньою релаксацією;

г) спостереження за розвитком нелінійних властивостей опору ізоляції внаслідок накопичення в ній низькомолекулярних домішок, здатних дисоціювати на іони в сильному електричному полі;

д) спостереження за поверхневими зарядами, що з'являються внаслідок явища трибоелектризації під час охолодження кабелів.

При електричних обстеженнях кабелів необхідно виділяти *окремо* характеристики різних компонентів ізоляції (фазної та поясної ізоляції – в силових кабелях, ізоляції жил та внутрішніх захисних оболонок – в контрольних кабелях). Відмінності властивостей однотипних компонентів ізоляції слід вважати як ознаку старіння, що з'являються під час тривалої експлуатації кабелів.

У другому розділі показано, що методи сканування по електричній напрузі, розроблені для просоченої ізоляції, виявляються малоефективними для непросочених багатожильних кабелів. У просоченій ізоляції повітряне вкраплення – рідке явище, виявлення якого важливе з точки зору вилучення потенційно ненадійних виробів. У непросякнутій ізоляції повітряні вкраплення – нормальне явище. Їх настільки багато, що при збільшенні напруги частота ЧР спочатку зростає, а в подальшому навіть зменшується (рис.1). Такий характер зміни частоти ЧР не дозволяє повною мірою застосувати методи розпізнавання вкраплень за товщиною та площею, щоб зрозуміти їхню природу та області локалізації. Внаслідок цього доводиться обмежуватися порівняльним аналізом диференційних амплітудних спектрів ЧР, отриманих при різних електричних напругах і представлених в напівлогарифмічному (рис.2а) або подвійному логарифмічному (рис.2б) масштабах.

В якісній просоченій ізоляції повітряні вкраплення являють собою поодинокі статичні дефекти, які при випробувальних напругах повністю активізуються як за товщиною, так і за площею. Визначення розмірів вкраплень дозволяє однозначно оцінити їхню небезпечність.

В багатожильних непросочених кабелях повітряні зазори мають клиноподібну форму. Пробій починається не в області найменших зазорів (поблизу зони контакту ізолюваних жил), а дещо далі – по тому відрізьку силової лінії, падіння електричної напруги на якому раніше всього досягає пробивного. Накопичення ж низькомолекулярних продуктів (НМП) розпаду ізоляції йде в першу чергу саме в області контакту ізолюваних жил – в мікрокапілярі, утвореному циліндричними поверхнями, що торкаються одна одної. Тому

виявлення НМП за характеристиками ЧР можливе, але якщо після активізації ЧР напругу дещо зменшити, щоб наблизити зону ЧР до місця накопичення НМП.

В третьому розділі виконано аналіз електричного поля багатожилних кабелів, головним чином, у мікронних зазорах між ізоляціями жил (рис.3 а, б). Для підвищення точності розрахунків поля саме в цих областях застосовано три мережі вузлів: основні – на межах ізоляції; допоміжні – поміж основними; просторові – в товщині ізоляції жил (рис.3 б).

Густина поверхневих зарядів σ на межах діелектриків знаходиться в результаті розв'язку системи лінійних алгебраїчних рівнянь (СЛАР) методу вторинних джерел:

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

$$a_{ij} = \left\{ \begin{array}{l} \frac{\Delta l_j}{2\pi\epsilon_0} \ln \frac{r_0}{r_{ij}} \quad \forall i \neq j \\ \frac{\Delta l_j}{2\pi\epsilon_0} \ln \frac{r_0}{\Delta l_j / (2e)} \quad \forall i = j \end{array} \right\} \quad \left. \begin{array}{l} i = 1 \div N_e \\ \\ \\ \end{array} \right\} \quad , \quad (2)$$

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

де $\overline{\sigma}$ – матриця-стовпчик невідомих розрахункових густин вторинних зарядів; \overline{U} – матриця-стовпчик, перші N_e членів якої дорівнюють заданим потенціалам вузлів, що лежать на електродах, а решта – нульові; \overline{A} – квадратна матриця коефіцієнтів, елементи якої a_{ij} знаходяться за формулами, що витікають з інтегральних рівнянь Фредгольма першого роду для вузлів на електродах та другого роду – для вузлів на межах діелектриків; i – номер вузла, в якому розраховують характеристики поля; j – номер вузла, в якому знаходиться вторинний заряд; r_{ij} – відстань до точки i від точки j ; r_0 – відстань від точки i до достатньо віддаленої точки, потенціал якої можна вважати нульовим (приймається $r_0 = 1$ м); Δl_j – ширина смужок елементарних лінійних зарядів на поверхнях жил та ізоляції; \mathbf{n}_i – одиничний вектор нормалі до межі розподілу середовищ в точці i ; $\cos(\overline{\mathbf{r}_{ij}}, \overline{\mathbf{n}_i})$ – косинус кута між векторами \mathbf{n}_i і \mathbf{r}_{ij} ; $\beta = \frac{\epsilon_2 - \epsilon_1}{\epsilon_2 + \epsilon_1}$ –

параметр, який пов'язаний з різницею діелектричних проникностей в напрямку нормалі до границі розподілу середовищ; ϵ_2 , ϵ_1 – відносні діелектричні проникності середовищ в точці i ; ϵ_0 – електрична стала; N_e – кількість вузлів, що лежать на електродах; N_d – кількість вузлів, що лежать на межах діелектриків; $N = N_e + N_d$ – загальна кількість вузлів. Індекс j^* стосується допоміжних вузлів,

за допомогою яких точніше знаходяться коефіцієнти СЛАР (1) для близьких один від одного вузлів (метод Боголюбова-Крилова).

Розрахунки показують, що напруженість електричного поля в зазорі товщиною 1 мкм між ізолюваними поліетиленом жилами досягає 1,8 МВ/м при напрузі 1 кВ (рис.4). Цього недостатньо для пробою зазору, пробивна напруженість якого майже на порядок вища, але цілком досить, щоб сприяти втягуванню в зазор НМП. Для визначення напруги початку ЧР знаходиться відрізок силової лінії, падіння напруги на якому раніше всього досягне пробивного.

Компоненти вектора напруженості електричного поля в довільній точці з координатами (x_k, y_k) знаходяться шляхом суперпозиції полів окремих лінійних зарядів:

$$\begin{cases} E_{xk} = \frac{1}{2\pi\epsilon_0} \sum_{j=1}^{j=N} \frac{\sigma_j}{r_{kj}} \cdot \frac{x_k - x_j}{r_{kj}} \cdot \Delta l_j \\ E_{yk} = \frac{1}{2\pi\epsilon_0} \sum_{j=1}^{j=N} \frac{\sigma_j}{r_{kj}} \cdot \frac{y_k - y_j}{r_{kj}} \cdot \Delta l_j \end{cases} \quad , \quad (3)$$

Рух до наступної точки (x_{k+1}, y_{k+1}) вздовж силової лінії відбувається по дотичній. Для цього застосовуються формули, що витікають з методу Рунге-Кутта:

$$\begin{cases} x_{k+1} = x_k + \Delta l \cdot \cos(\alpha_k) \\ y_{k+1} = y_k + \Delta l \cdot \sin(\alpha_k) \end{cases} \quad , \quad (4)$$

де Δl – крок руху вздовж силової лінії (приріст криволінійної координати); α_k – кут між вектором дотичної до силової лінії та одиничним вектором осі абсцис

$$\alpha_k = (\alpha_{k1} + 2\alpha_{k2} + 2\alpha_{k3} + \alpha_{k4}) / 6;$$

$\alpha_{k1} - \alpha_{k4}$ – кути дотичних до силової лінії, які визначаються на початку, в середині та кінці кожного k -го кроку Δl :

$$\begin{cases} \alpha_{k1} = \arctg \frac{E_y(x_k, y_k)}{E_x(x_k, y_k)} \\ \alpha_{k2} = \arctg \frac{E_y(x_k + 0.5\Delta l \cdot \cos \alpha_{k1}, y_k + 0.5\Delta l \cdot \sin \alpha_{k1})}{E_x(x_k + 0.5\Delta l \cdot \cos \alpha_{k1}, y_k + 0.5\Delta l \cdot \sin \alpha_{k1})} \\ \alpha_{k3} = \arctg \frac{E_y(x_k + 0.5\Delta l \cdot \cos \alpha_{k2}, y_k + 0.5\Delta l \cdot \sin \alpha_{k2})}{E_x(x_k + 0.5\Delta l \cdot \cos \alpha_{k2}, y_k + 0.5\Delta l \cdot \sin \alpha_{k2})} \\ \alpha_{k4} = \arctg \frac{E_y(x_k + \Delta l \cdot \cos \alpha_{k3}, y_k + \Delta l \cdot \sin \alpha_{k3})}{E_x(x_k + \Delta l \cdot \cos \alpha_{k3}, y_k + \Delta l \cdot \sin \alpha_{k3})} \end{cases} \quad , \quad (5)$$

За допомогою (3) – (5) визначаються траєкторії силових ліній та падіння напруги вздовж них (рис.5). Порівнюючи падіння напруги з пробивним за кривою Пашена, знаходиться напруга початку ЧР (рис.6).

Крива $U(SL)$, побудована для потенціалу жили 4 кВ, майже торкається кривої Пашена в зоні товщини повітряних проміжків 0,2 мм (рис.6). При напрузі, дещо більшій ніж 4,2 кВ, криві почнуть торкатися. Це означає, що напруга початку ЧР для даного кабелю (переріз жил 2,5 мм², ПЕ ізоляція) складає близько 4,2 кВ.

При обстеженні кабелів з кількістю жил 3 і більше, завжди знайдуться силові лінії, що проходять дотичними до області контакту ізолюваних жил (як, наприклад, лінія 1 на рис.5). Значить, зондувальне поле попадає в область накопичення НМП, і останні можуть бути помічені за характеристиками ЧР або тепловиділенню.

При наявності тріщин в ізоляції (рис.7) напруженість на поверхні голої жили зростає (криві 1 та 2 рис.7 в), але виявляється меншою, ніж на поверхні цілої ізоляції (крива 3 рис.7 в). Проте дослід показує, що напруга початку ЧР в кабелях з тріщинами в ізоляції виявляється майже вдвічі нижчою, ніж у нового кабелю (рис.1).

Протиріччя стає зрозумілим, якщо врахувати гігроскопічні властивості тріщин в ізоляції: при товщині менше 0,1 мкм вони адсорбують водяну пару з повітря і виявляються повністю заповнені водою. Це призводить до зростання напруженості електричного поля напроти тріщин, внаслідок чого напруга початку ЧР зменшується.

C–tgδ діаграма і діелектричне сканування ізоляційних проміжків багатожильних кабелів.

Якби всі ізоляційні проміжки багатожильних кабелів мали однорідні властивості, то незалежно від схеми обстежень мали б одну й ту саму величину тангенсу кута діелектричних втрат $tg\delta$, хоча часткові погонні ємності були б різними.

Дослід же показує, що в дійсності $tg\delta$ сильно відрізняється в залежності від того, в якій частині внутрішнього простору кабелю створено електричне поле (рис.8). На рисунку, названому $C–tg\delta$ діаграмою, показані значення двох параметрів ізоляційних проміжків – погонної ємності C (вісь абсцис) і $tg\delta$ (вісь ординат).

Вимірювання виконуються в звуковому діапазоні частот: 100 Гц; 1 кГц та 10 кГц. Застосовується схема обстеження, за якою поле спочатку зосереджується в центрі кабелю, а потім поступово зміщується на периферію. При цьому погонні ємності дослідів спочатку зростають, а потім – зменшуються. Як видно з діаграми, в периферійних ділянках кабелю, що близько 25 років відпрацював в гермопроходці, діелектричні втрати по периферії значно вищі, ніж у центрі: в 2 рази – на частоті 100 Гц, і більше, ніж в 10 раз – на частоті 10 кГц.

Таке враження, що НМП, що утворювалися в результаті деструкції ізоляції, мігрували в дещо прохолоднішу частину кабелю – ближче до оболонки.

На рис.9 представлені розрахункові дані для долі енергії, що накопичується в ізоляції жил η_i в залежності від погонної ємності досліду. Ця доля найбільша для випадку, коли поле зосереджується в центрі кабелю $\eta_i \approx 0,75$. А далі вона зменшується – до 0,6. Отже зростання $\operatorname{tg}\delta$ по мірі просування поля на периферію (рис.8) зумовлене втратами не в ізоляції, а в міжфазному просторі. Але за нормальних умов там повинне бути повітря, діелектричні втрати якого майже нульові. Значить, фактично у міжфазному просторі знаходиться не тільки повітря, але й сторонні речовини, що інтенсивно розсіюють енергію змінного електричного поля. Очевидно, що цими речовинами можуть бути НМП, що утворюються внаслідок деструкції ізоляції.

Найбільш ймовірною областю накопичення НМП в багатожильному кабелі є область контакту ізолюваних жил (рис.10 а). При адсорбції певної кількості НМП тут утворюється криволінійна поверхня (меніск), яка сприяє поглинанню парів. Така ж роль сильного електричного поля на поверхні меніску. По мірі заповнення капіляра продуктами розпаду ізоляції напруженість на поверхні меніска зменшується (рис.10 б), поглинальна здатність капіляра також спадає. Процес накопичення НМП припиняється.

У розділі 4 розроблено методи прямих та сукупних визначень електричної ємності та тангенсу кута діелектричних втрат всіх ізоляційних проміжків багатожильних кабелів (як для жил, близько розташованих одна до одної, так і для віддалених жил): Між n жилами кабелю утворюється $N = \frac{n \cdot (n-1)}{2}$ ізоляційних проміжків. Кабель підключається до вимірювача імітансу (комплексного опору) за допомогою багатоканального комутатора. Цей пристрій дає можливість кожній жилі підключатися до однієї або іншої клеми вимірювача, або – заземлятися.

Метод сукупних обстежень розглянуто на прикладі 6-полюсника – 5-жильного екранованого кабелю (рис. 11).

В таблиці 1 наведено всі можливі варіанти підключення такого об'єкту до 2-х полюсного приладу. З 31-го варіанту досить вибрати 15 для визначення властивостей всіх 15 ізоляційних проміжків 6-полюсника.

Так, в разі досліду за номером 31 (останній стовпчик таблиці 1) за результатами вимірювань маємо сукупну погонну ємність

$$C_{e1} = C_{16} + C_{26} + C_{36} + C_{46} + C_{56}.$$

Решта часткових погонних ємностей між полюсами в цьому досліді не приймають участь і тому не впливають на результати вимірювань.

Сукупний тангенс кута діелектричних втрат $\operatorname{tg}\delta_{e1}$ за результатами вимірювань при паралельному з'єднанні часткових ємностей дорівнює середнє зваженому значенню тангенсів кутів діелектричних втрат всіх складових з відповідними ваговими коефіцієнтами

$$\operatorname{tg}_{e1} = \frac{C_{16}}{C_{e1}} \operatorname{tg}_{16} + \frac{C_{26}}{C_{e1}} \operatorname{tg}_{26} + \frac{C_{36}}{C_{e1}} \operatorname{tg}_{36} + \frac{C_{46}}{C_{e1}} \operatorname{tg}_{46} + \frac{C_{56}}{C_{e1}} \operatorname{tg}_{56} .$$

Таблиця 1

Можливі варіанти підключення 6-полюсника до 2-х клемного приладу
Номер варіанта

№ полюса	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31
1	1	0	1	0	1	0	1	0	1	0	1	0	1	0	1	0	1	0	1	0	1	0	1	0	1	0	1	0	1	0	1
2	0	1	1	0	0	1	1	0	0	1	1	0	0	1	1	0	0	1	1	0	0	1	1	0	0	1	1	0	0	1	1
3	0	0	0	1	1	1	1	0	0	0	0	1	1	1	1	0	0	0	0	1	1	1	1	0	0	0	0	1	1	1	1
4	0	0	0	0	0	0	0	1	1	1	1	1	1	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	1	1	1	1	1	1
5	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
6	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

Тоді, для вибраних довільним чином дослідів, наприклад, 31, 15, 7, 3, 2, 1, 4, 8, 16, 18, 19, 23, 22, 20 та 21-го невідомі часткові погонні ємності C_{12} ; C_{13} ; ..., C_{56} та відповідні їм тангенси кутів діелектричних втрат $\text{tg}\delta_{12}$, $\text{tg}\delta_{13}$, ..., $\text{tg}\delta_{56}$ знайдуться в результаті розв'язку СЛАР відповідно (6) та (7):

Результати вимірювань знаходяться в правих частинах СЛАР, а невідомі параметри проміжків – в матрицях-стовпчиках лівих частин (6) і (7).

, (6), (7).

В матричній формі СЛАР (6), (7) записуються так:

$$A \cdot C_x = C_e ;$$

$$ATG \cdot TG_x = TG_e .$$

Подібні СЛАР, як правило, погано обумовлені. Тому для розв'язку застосовується регуляризація за Тихоновим О.М.:

$$(A' \cdot A + \alpha I) \cdot X \approx A' \cdot C_e ; \tag{8}$$

$$(ATG' \cdot ATG + \alpha I) \cdot TG_x \approx ATG' \cdot TG_e . \tag{9}$$

Таким чином, замість вихідних СЛАР (6), (7) застосовуються регуляризовані (8), (9). В результаті вдається отримувати розв'язки СЛАР високого порядку N (аж до $N = 374$, що достатньо для аналізу результатів досліджень кабелів з 27 жилами – рис.12).

В правій частині рис.12 – область погонних ємностей понад 120 пФ/м – сукупні ємності проміжків, отримані при підключенні до приладу ряду проміжків паралельно (власне вихідні експериментальні дані, представлені також і на рис.8). В центрі – область погонних ємностей біля 120 пФ/м (обведена прямокутником) – характеристики ізоляції кожної з жил окремо, знайдені за схемами «жила – проти всіх інших». Нарешті, в лівій частині рис.12 – область ємностей, менших 40 пФ/м – часткові ємності між окремими

жилами, знайдені в результаті розв'язку СЛАР (мета досліджень). Параметри саме цих малих часткових ємностей відображають характер розподілу НМП по перерізу кабелю.

Як видно, НМП зосереджені, в основному, в зонах контакту між сусідніми ізольованими жилами, бо для більших часткових ємностей (близько розташованих жил) маємо більший рівень $\text{tg}\delta$. Решта внутрішнього простору кабелю вільна від НМП, там – повітря. Тому для віддалених жил (часткові погонні ємності між якими найменші) спостерігається відповідно і менші рівні $\text{tg}\delta$, що характерно для задовільного стану ізоляції і захисних оболонок кабелів. [Зауважимо, що кореляційна залежність $\text{tg}\delta(C)$ стає від'ємною (тобто для менших часткових погонних ємностей спостерігається більший рівень $\text{tg}\delta$), якщо в кабель попадає водяна пара або вода].

На рис.13 – 15 наведені дані дефектного кабелю КПоСГ. В першому квадранті рис.13 – основна $C\text{-tg}\delta$ діаграма, в двох інших – допоміжні діаграми $C-i$ та $i\text{-tg}\delta$, що використовуються для інтерпретації основної діаграми. Номер i відповідає: жилам першого повиву (1 – 4); жилам другого повиву (5 – 14); свинцевій оболонці кабелю (15). На діаграмі чітко спостерігається зростання $\text{tg}\delta$ для менших часткових погонних ємностей (порівняйте область $j-t$ відносно $i-j$), що свідчить про наявність у вільному просторі (а не тільки в зонах контакту жил) низькомолекулярних продуктів розпаду ізоляції. На фото видно зелені окисли міді, що крізь тріщини в ізоляції заповнили частину вільного простору кабелю. Наявність окислів призводить до росту втрат на частоті 100 Гц при підвищенні температури (рис.14).

Різке (до 20 – 50 %) збільшення $\text{tg}\delta_{100\text{Гц}}$ для малих часткових погонних ємностей є ознакою сильного старіння ізоляції (рис.15).

Тріщини в ізоляції зістареного кабелю мають здатність до гігроскопічного поглинання водяної пари з атмосфери. В результаті $\text{tg}\delta$ міжфазного простору суттєво зростає: порівняйте на рис.16а $\text{tg}\delta$ області $i-j$ (зони контакту ізольованих жил) з областю $i-S$ (зони характеристик власне ізоляції жил). В кабелі з цілою ізоляцією таке явище не спостерігається: рівень $\text{tg}\delta$ області $i-j$ (рис.16б, крива 2) не перевищує базовий рівень області $i-S$. Це означає, що в області контакту суцільних ізольованих жил накопичення водяної пари не відбулося.

Отже, порівняння $\text{tg}\delta$ областей $i-j$ та $i-S$ дозволяє виявити кабелі з тріщинами в ізоляції. Для цього треба лише, щоб вони деякий час побули в атмосфері, насиченій водяними парами. Зауважимо, що в гермозоні АЕС відносна вологість повітря сягає 98%, температура - до 60 °С, а тривалість перебування там достатня, щоб водяна пара пройшла через захисні полімерні оболонки або кінцеві муфти кабелів.

У розділі 5 розвинуто метод оцінки стану ізоляції кабелів за параметрами відновлюваної електричної напруги.

Ізоляція представлена послідовно-паралельною схемою (рис.17), в якій елементи C_1, R_1, C_{11}, R_{11} відображають незістарений шар, а C_2, R_2 – дефектний (зістарений). Зауважимо, що властивості дефектного шару недоступні для безпосереднього контролю, адже послідовно з ним включений здоровий шар

ізоляції, який приховує дефект. З часом опір R_2 дефектного шару стає все меншим, але загальний опір ізоляції залишається досить високим завдяки здоровому шару ізоляції.

Методом же відновлюваної електричної напруги дрейф параметрів дефектного шару вдається спостерігати. Кабель тривалий час заряджається від джерела постійної напруги E , при цьому на дефектах ізоляції (пастках), а також поверхнях розмежування ізоляції накопичується об'ємний заряд (ОЗ). Далі йде короткий розряд кабелю, за час якого вільні заряди на електродах встигають нейтралізуватися, а ОЗ в товщині діелектрика – ні. Після зняття закорочувального проводу ОЗ звільнюються з пасток, і на кабелі з'являється напруга – так звана *відновлювана електрична напруга* U_v . Чим вона вища, тим більша неоднорідність ізоляції, тим гірша її якість.

Аналіз послідовно-паралельної схеми рис.17 показує, що у міру зменшення опору дефектного шару амплітуда U_v – зростає, а максимум U_v спостерігається все раніше (момент максимуму t_m монотонно зменшується). Але, коли t_m стає менше 12 с, амплітуда U_v починає падати. Такий же характер зміни U_v спостерігається також і експериментально – рис.18, рис.19. Це пов'язано з частковою розрядкою релаксаційної ємності C_{11} за незмінний час розрядки t_r (який, зазвичай, приймається рівним 2 с). Щоб уникнути хибної оцінки стану ізоляції, в таких випадках слід зменшувати час розрядки t_r : з 2 с до 0,5 с і навіть менше. Інакше кабель №4 на рис.18 можна хибно сприйняти, як цілком нормальний.

Хибних оцінок стану ізоляції кабелів можна уникнути, якщо крім традиційного параметру – амплітуди U_v – врахувати також і момент максимуму t_m , який в ході старіння ізоляції зменшується монотонно .

В області моментів t_m , менших за 12 с, спостерігається різке зменшення як амплітуди U_v , так і сталої часу саморозряду TET (рис.19). Тому значення параметру $t_m = 12$ с слід вважати *критичним*. Після досягнення цього значення старіння ізоляції прискорюється, що видно з прискореного зменшення TET .

Пропонується також враховувати третій параметр кривих відновлюваної напруги – *сталу часу* TET ділянки саморозряду, тобто крутизну «хвостів» кривих $U_v(t)$. Стала часу пов'язана з ємністю кабелю C та опором ізоляції R : $TET = R \cdot C$. Визначивши з нахилу «хвостів» кривих $U_v(t)$ сталу часу, можемо знайти опір R за відомою ємністю ізоляції. Особливістю знайденого таким чином опору є те, що він визначається при досить низьких залишкових напругах на ізоляції – близько 20 В (тому його позначено надалі як R_{20}). При низьких напругах не відбувається активації домішок в ізоляції, що виникли внаслідок її старіння. При високих напругах, навіть при 2500 В, навпаки, домішки дисоціюють на іони, внаслідок чого опір різко зменшується. Тому відношення електричних опорів R_{20}/R_{2500} , що фактично відображає нелінійні властивості ізоляції, пропонується використовувати в якості міри зістареності ізоляції (табл. 2).

Таблиця 2

**Параметри ізоляційних проміжків кабелів з паперово-масляною ізоляцією
при низькій та високій напругах**

Зразок кабелю	Схема обстеження	Ємність C , пФ на частоті 100 Гц	Стала часу саморозряду θ , с	Опір R_{20} , ГОм	Опір R_{2500} , ГОм	R_{20}/R_{2500}
1	A-S	1582,0	1037,3	656	148	4,43
	B-S	1582,2	1131,3	715	155	4,61
	C-S	1577,5	1388,9	880	156	5,64
	ABC-O	2637,5	2137,2	810	91	8,90
2	A-S	859,0	1170,4	1363	138	9,9
	B-S	889,5	1036,8	1166	143	8,2
	C-S	886,6	1257,4	1418	133	10,7
	ABC-O	1673,0	1888,0	1129	78	14,5
3	A-S	1040,78	839,48	807	144	5,60
	B-S	1076,88	1253,1	1164	150	7,76
	C-S	1027,19	1212,8	1181	158	7,47
	ABC-O	2023,8	2101,2	1038	71,1	14,6
4	A-S	798,88	1263,0	1581	131	12,1
	B-S	812,17	1027,3	1265	121	10,5
	C-S	805,81	1034,2	1283	129	10,0
	ABC-O	773,59	1423,0	1840	79	23,4

У розділі 6 запропоновано використовувати трибоелектричний потенціал для оцінки старіння полімерної ізоляції кабелів. Природа трибоелектрики в кабелях пов'язана з приповерхневими шарами полімерної ізоляції. Оскільки вони окислюються в першу чергу, трибоелектричний потенціал повинен змінюватися в ході старіння ізоляції. Це підтверджено експериментально – рис.20. Після охолодження кабелів (наприклад, при виводі енергоблоків на планово-профілактичні роботи – ППР) на жилах з'являється напруга. Вона обумовлена електризацією внаслідок тертя ізоляції жил одна об одну – термо-трибоелектричний ефект. Як видно з рис.20, термо-трибо-електричний потенціал пов'язаний зі старінням ізоляції: він зростає в міру окислення поверхні ізоляції (порівняйте криві 1,2,3).

Встановлено, що потенціал зберігається кілька діб, завдяки чому за його величиною зістарені кабелі можуть бути виявлені деякий час після охолодження енергоблоків. Для цього слід порівнювати потенціали резервних жил кабелів, які залишаються не підключеними до кінцевих роз'єднувачів.

Як видно з рис.20, заряди, що виникли в результаті електризації поверхні ізоляції, затримуються тривалий час без істотного зниження щільності. При електричній ємності пар 100 пФ/м і термо-трибо-електричному потенціалі 100 В

для зістарених кабелів щільність електричного заряду досягає 10 нКл/м. Цього достатньо для виникнення ЧР.

Електричні розряди, які виникають при охолодженні кабелів, можуть також бути зареєстрованими за допомогою розвинутої техніки вимірювання часткових розрядів або акустичної емісії.

ВИСНОВКИ.

В роботі вирішена важлива науково-прикладна проблема моніторингу старіння багатожильних кабелів енергоблоків АЕС шляхом сканування ізоляції електричним полем. При скануванні електричним полем (шляхом варіації його величини, області локалізації в просторі або у часі) досягається виявлення неоднорідностей ізоляції, в тому числі і тих, які виникли в результаті її старіння. Загальною рисою розроблених нових методів моніторингу старіння є порівняння властивостей ізоляції при скануванні електричного поля.

1. Отримала подальший розвиток теорія розпізнавання повітряних вкраплень в твердій ізоляції шляхом сканування за напругою. Час обстежень ізоляції повинен бути скороченим для зменшення дисперсії характеристик ЧР. Виникаючи при цьому високочастотні флуктуації частоти ЧР великої амплітуди слід згладжувати, використовуючи для порівняння характеристик ширину сімейства ДАС при декількох значеннях напруги, що зростає.

2. На основі аналізу електричного поля визначені умови виникнення ЧР в багатожильних кабелях – напруга початку ЧР. Показано, що в кабелях з щільною скруткою напруга початку ЧР визначається шляхом побудови траєкторій силових ліній в повітряних зазорах між ізольованими жилами та визначення падіння напруги на них. Умовою виникнення ЧР є досягнення падіння напруги на ділянці силової лінії в повітряному зазорі значення пробивної напруги останньої. В багатожильних кабелях з вільною скруткою розрахунок базується на максимальній напруженості поля на поверхні ізоляції. Умовою виникнення ЧР є досягнення критичного рівня напруженості, який дорівнює 2,1 МВ/м. Виявлення тріщин в ізоляції за характеристиками ЧР можливо тільки в разі грубих дефектів.

3. Виконані оцінки накопиченої енергії багато електродних систем з кусочно-однорідною ізоляцією та діелектричними клинами, що утворені циліндричними поверхнями ізольованих жил та торкаються одна однієї. При цьому в екранованих кабелях частка енергії, що накопичується в міжфазному просторі, більше, ніж в неекранованих. Це полегшує виявлення продуктів розпаду ізоляції за умов, якщо захисні оболонки виконані з неполярних матеріалів (П, Пв).

4. Розроблено перспективний метод моніторингу багатожильних кабелів за контролем міжфазного простору, в якому накопичуються низькомолекулярні продукти розпаду органічної ізоляції. Встановлено, що нерівномірність розподілу тепловиділення по перерізу кабелів не пов'язана зі зміною щільності енергії в ізоляції жил при зміні схеми обстеження: при будь-якій схемі доля енергії, що накопичується в ізоляції жил, змінюється мало – не більше, ніж у 1,3 – 1,7 рази. Багаторазова зміна потужності втрат (від 2 до 10 разів), яка спостерігається на

практиці, обумовлена появою НМП розпаду ізоляції в результаті її теплового або радіаційного старіння.

5. Обґрунтовано два методи вимірювання тангенсу кута діелектричних втрат малих погонних ємностей міжфазного простору багатожильних кабелів. Прямі вимірювання втрат (з використанням 3-х зажимних приладів) не рекомендується в зв'язку з високою ймовірністю перенавантаження приладу ємнісними струмами паразитних ланцюгів. Сукупні вимірювання (з використанням 2-х зажимних приладів) рекомендуються виконувати по так званим «складним» схемам, коли група рядом розташованих жил утворює «ядро», а одна із жил – «плаваюча» – вибирається із числа тих, що не задіяні в «ядрі». Складна конфігурація зондувального електричного поля, що при цьому виникає, містить значну тангенціальну складову напруженості поля на границях розподілу середовищ, котра і обумовлює втрати в прошарках поверхневих забруднень. Завдяки несиметричній конфігурації поля вдається помітити НМП розпаду ізоляції – ознаки її старіння.

6. Системи лінійних алгебраїчних рівнянь, до яких зводиться аналіз результатів досліджень багатожильних кабелів методом сукупних вимірювань, являються погано обумовленими. Тому їх численний розв'язок виконується з використанням регуляризації за Тихоновим А.Н. Зі всіх можливих планів обслідування багатожильних кабелів можна відібрати такі, які призводять до добре обумовлених СЛАУ. Для цього використовується або прямий перебір всіх варіантів (до 5-ти полюсника включно), або вібирковий аналіз (починаючи з 6-ти полюсника). В порівнянні з планами повних обстежень, які призводять до перевизначених СЛАУ, оптимальні плани дозволяють суттєво зменшити обсяги досліджень (не менше, ніж в 1,5 – 2 рази).

7. Для силових кабелів з паперово-масляною ізоляцією обґрунтована двохшарова модель зістареної ізоляції: один шар – незістарена ізоляція, другий, який включено послідовно, – зістарений. На основі моделювання встановлено, що в процесі старіння ізоляції відновлювана напруга спочатку зростає, а потім – зменшується, що співпадає з експериментальними даними. Показано, що найбільш інформативним параметром технічного стану ізоляції є момент досягнення максимуму t_m . Отримані кореляційні залежності між параметрами кривих відновлюваної напруги: амплітудою U_m/E , моментом максимуму t_m та сталою часу саморозряду дозволяють оцінити граничні рівні цих параметрів, по досягненні яких старіння ізоляції прискорюється. Встановлено, що для більш зістарених ділянок ізоляції кабелю (поясної ізоляції) характерні більші значення параметра нелінійності опору ізоляції R_{20}/R_{2500} .

8. Встановлена швидка релаксація поверхневих зарядів, що виникають внаслідок явища трибоелектрики при охолодженні багатожильних кабелів (сканування за температурою), що є результатом зниження поверхневого опору в разі окислення поверхні або просочення пари в внутрішній простір кабелів крізь мікротріщини захисних оболонок.

9. Ознаки нормального стану ізоляції визначені на основі тривалих ресурсних випробувань зразків, які виконані на кафедрі «Електроізоляційна та

кабельна техніка» НТУ «ХПІ» в період з 2001 до 2008 р. для всіх основних типів кабелів енергоблоків Запорізької, Рівненської, Південноукраїнської та Хмельницької АЕС: з паперово-масляною, поліетиленовою, полівінілхлоридною, кремнійорганічною та фторопластовою ізоляцією.

10. Сукупність теоретичних та експериментальних розробок дозволяє визначити критерії досягнення граничного стану ізоляції кабелів. Вони використовуються при аналізі результатів обстежень кабелів в умовах експлуатації та обґрунтуванні необхідності завчасної заміни тих з них, технічний стан яких став критичним. Одним з практичних результатів даної роботи є не тільки заміна значної частини кабелів на окремих енергоблоках Національній атомній енергетичній компанії (НАЕК) «Енергоатом», але і рішення щодо планомірної модернізації діагностичного обладнання електроцехів АЕС.

СПИСОК ОПУБЛІКОВАНИХ ПРАЦЬ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

1. Беспрозванных А.В. Методика измерения дифференциальных амплитудных спектров импульсов частичных разрядов / Б.Г. Набока, А.В. Беспрозванных, В.Я. Гладченко // *Электричество*. – М. – 1990. – № 11. – С. 71 – 74.

Здобувачем обґрунтовано час вимірювання диференційних амплітудних спектрів (ДАС) імпульсів ЧР.

2. Беспрозванных А.В. Диагностика высоковольтной изоляции с помощью многоканальных анализаторов / Б.Г. Набока, А.В. Беспрозванных, В.Я. Гладченко // *Электричество*. – М. – 1991. – № 5. – С. 5 – 9.

Здобувачем проведено обробку ДАС імпульсів ЧР.

3. Беспрозванных А.В. Измерение акустических шумов и тепловыделений при испытании высоковольтной изоляции / Б.Г. Набока, А.В. Беспрозванных, В.Я. Гладченко // *Новые разработки в области электрической изоляции: сборник статей*. – Л., Энергоатомиздат, 1991. – С. 33 – 35. *Здобувачем виконано оцінку якості високовольтної ізоляції за результатами обстежень.*

4. Беспрозванных А.В. К определению оптимальной запрессовки и полимеризации тонкослойной изоляции / Набока Б.Г., Беспрозванных А.В., Гладченко В.Я. [и др.] // *Збірник наукових праць Харківського державного політехнічного університету*. – Харків: ХДПУ. – 1997. – Ч 5. – С. 275 – 278. *Здобувачем встановлено умови оптимальної запрессовки та полімеризації тонкослойної ізоляції.*

5. Беспрозванных А.В. Влияние внутренних термомеханических напряжений на ресурс твердой тонкослойной изоляции / А.В. Беспрозванных, Б.Г. Набока, О.В.Васильева // *Збірник наукових праць Харківського державного політехнічного університету*. – Харків: ХДПУ. – 1998 – Вып.6, часть 1. – С. 540 – 542. *Здобувачем встановлено кореляційний зв'язок між термомеханічною напругою та ресурсом твердої ізоляції.*

6. Сравнительный анализ экструдированной высоковольтной полиэтиленовой изоляции / А.В.Беспрозванных, О.В.Васильева, В.Я.Гладченко [и др.] // *Вестник Харьковского государственного политехнического университета*. – Харьков:

ХГПУ. – 1999. – Вып.69. – С. 38 – 45. *Здобувачем виконано аналіз інфрачервоних спектрів поліетиленової ізоляції.*

7. Беспрозванных А.В. Влияние геометрии секторной жилы на сечение и распределение поля силового кабеля / Б.Г.Набока, А.В.Беспрозванных, О.В.Васильева // Вестник Харьковского государственного политехнического университета. – Харьков: ХГПУ. – 1999. – Вып.64. – С. 33 – 41. *Здобувачем проведено аналіз впливу геометрії секторної жили на розподіл напруженості електричного поля.*

8. Беспрозванных А.В. Статистический анализ результатов входного контроля композиций кабельного полиэтилена / Б.Г.Набока, А.В.Беспрозванных, О.В.Васильева // Вестник Харьковского государственного политехнического университета. – Харьков: ХГПУ. – 2000. – Вып.108. – С. 3 – 6. *Здобувачем запропоновано проводити порівняльний аналіз матеріалів за інтегральними функціями розподілу в області малих ймовірностей.*

9. Беспрозванных А.В. Акустическая эмиссия как мера монолитности витковой и межслоевой изоляции катушек/ Б.Г. Набока, А.В. Беспрозванных, Г.Б.Набока // Вестник Харьковского государственного политехнического университета. – Харьков: ХГПУ. – 2000. – Вып.127. – С. 6 – 9. *Здобувачем запропоновано використовувати сигнали акустичної емісії в якості міри зістареності ізоляції.*

10. Техническая диагностика изоляции контрольных кабелей КПЭТИ / Беспрозванных А.В., Васильева О.В., Набока Б.Г. [и др.] // Вісник Національного технічного університету «ХПІ». – Харків: НТУ «ХПІ». – 2001. – Вып.5. – С. 16 – 20. *Здобувачем виконано обслідування опору ізоляції кабелів із зшитим поліетиленом.*

11. Беспрозванных А.В. Корреляционные характеристики изоляции жил состаренных кабелей / Б.Г Набока, А.В. Беспрозванных, В.Я.Гладченко // Вісник Національного технічного університету «ХПІ». – Харків: НТУ «ХПІ». – 2002. – Вып.9, т.3. – С. 61 – 65. *Здобувачем встановлено зв'язок електричних характеристик ізоляції жил зістарених кабелів.*

12. Беспрозванных А.В. Контроль параметров изоляции трехфазных кабелей методом косвенных измерений / Б.Г.Набока, А.В. Беспрозванных, С.В.Рудаков // Вісник Національного технічного університету «ХПІ». – Харків: НТУ «ХПІ». – 2002. – № 7. – С. 103 – 108.

Здобувачем проведено електричні обстеження силових кабелів.

13. Беспрозванных А.В. Анализ устойчивости методик восстановления параметров схемы замещения трехфазного кабеля по результатам косвенных измерений / Б.Г.Набока, А.В.Беспрозванных, С.В. Рудаков // Системи обробки інформації: збірник наукових праць Харківського університету Повітряних Сил (ХВУ). – Харків: ХВУ. – 2002. – Вип.4(20). – С. 192 – 197. *Здобувачем обґрунтовано параметр регуляризації, який забезпечує відновлення параметрів схеми з найменшою похибкою.*

14. Беспрозванных А.В. Медленные процессы в твердом диэлектрике и оптимальная температура полимеризации / Б.Г. Набока, В.Я. Гладченко, А.В.

Беспрозванных // Электричество. – М. – 2003. – № 5. – С. 51 – 54. *Здобувачем встановлено зв'язок між повільними процесами та оптимальною температурою полімеризації ізоляції.*

15. Беспрозванных А.В. Влияние ионизирующего излучения на емкость и тангенс угла диэлектрических потерь сетевых кабелей / А.В. Беспрозванных, Е.В. Морозова, А.Н.Соколенко // Вісник Національного технічного університету «ХПІ». – Харків: НТУ «ХПІ». – 2003. – Вып.9, т.4.– С. 3 – 8. *Здобувачем обґрунтовано вплив дози іонізуючого випромінювання на власні електричні параметри зразків 8-ми жильних мережевих кабелів.*

16. Наблюдение процессов старения изоляции многожильных кабелей по корреляционной связи электрических характеристик ее соседних участков / Б.Г. Набока, А.В.Беспрозванных, А.С. Штангей [и др.] // Надійність і довговічність машин і споруд. – Київ. – 2004. – №2 (23).– С. 93 – 98. *Здобувачем встановлено вплив старіння ізоляції на параметри ізоляційних проміжків багатожильних кабелів.*

17. Беспрозванных А.В. Дрейф диэлектрических потерь радиационно-состаренных сетевых кабелей / А.В. Беспрозванных, Е.В. Морозова, А.Н.Соколенко // Вісник Національного технічного університету «ХПІ». – Харків: НТУ «ХПІ». – 2004. – №22.– С. 3 – 6. *Здобувачем проведено обслідування діелектричних втрат кабелів до та після впливу радіації.*

18. Постоянные времена частичных емкостей силовых кабелей как индикатор процессов старения изоляции / Б.Г.Набока, А.В.Беспрозванных, О.В. Васильева [и др.] // Вісник Національного технічного університету «ХПІ». – Харків: НТУ «ХПІ». – 2004. – Вып. 7. – С. 49 – 56.

Здобувачем запропоновано використовувати сталі часу часткових ємностей силових кабелів в якості міри зістареності ізоляції.

19. Беспрозванных А.В. Оценка ресурса коаксиальных силовых проводов по потере массы ПВХ-пластикатов / Б.Г. Набока, В.Я. Гладченко, А.В. Беспрозванных // Збірник наукових праць Кіровоградського державного технічного університету. – Кіровоград: ДТУ – 2004. – Вип.15. – С. 24 – 28. *Здобувачем проведено аналіз ємності та діелектричних втрат коаксіального силового проводу під час теплового старіння.*

20. Беспрозванных А.В. Параметры частичных емкостей как индикатор состояния контрольных кабелей АЭС / Б.Г. Набока, А.В.Беспрозванных, А.С. Штангей // Електротехніка і електромеханіка. – Харків. – 2005. – №3. – С. 80 – 82. *Здобувачем виконано обстеження параметрів часткових ємностей зразків контрольних кабелів у вихідному стані та після радіаційно-теплового старіння*

21. Методика прямых измерений параметров частичных емкостей многожильных кабелей / Б.Г. Набока, А.В.Беспрозванных, А.С. Штангей [и др.] // Вісник Національного технічного університету «ХПІ». – Харків: НТУ «ХПІ». – 2005. – Вып.42.– С. 80 – 86.

Здобувачем виконано аналіз причин зміни результатів електричного контролю при використанні триелектродної схеми підключення вимірювача імітансу.

22. Беспрозванных А.В. Проявление нелинейных эффектов в оптических волокнах // *Електротехніка і електромеханіка.* – Харків . – 2005. – № 1. – С.8 – 13.

23. Беспрозванных А.В. Гигроскопическое увлажнение телефонного кабеля с полиэтиленовой оболочкой / А.В.Беспрозванных // *Електротехніка і електромеханіка.* – Харків . – 2005. – №4. – С. 40 – 44.

24. Беспрозванных А.В. Радиационная стойкость кабелей общепромышленного назначения / А.В.Беспрозванных, Б.Г. Набока, Е.В. Морозова // *Електротехніка і електромеханіка.* – Харків . – 2006. – № 3. – С. 82 – 86. *Здобувачем проведено обстеження ємності та тангенсу кута діелектричних втрат ізольованих жил 8-ми жильних мережевих кабелів у вихідному стані та після радіаційного старіння.*

25. Беспрозванных А.В. Старение телекоммуникационных кабелей в процессе эксплуатации в условиях повышенной влажности / А.В.Беспрозванных // *Вісник Національного технічного університету «ХПІ».* – Харків: НТУ «ХПІ». – 2006. – № 28. – С. 3 – 6.

26. Беспрозванных А.В. Проявление общих конструктивных, технологических и эксплуатационных особенностей поперечной структуры кабелей пучковой скрутки при электрических измерениях / А.В.Беспрозванных, Б.Г.Набока, О.И.Ляшенко // *Вісник Національного технічного університету «ХПІ».* – Харків: НТУ «ХПІ». – 2006. – Вып.34. – С. 17 – 27. *Здобувачем проаналізовано інтегральні функції розподілу ємності та діелектричних втрат кабелів пучкової скрутки.*

27. Беспрозванных А.В. Влияние примесей на радиационно-наведенные потери в оптических волокнах / А.В.Беспрозванных, Б.Г. Набока, Е.В.Морозова // *Вісник Національного технічного університету «ХПІ».* – Харків: НТУ «ХПІ». – 2006. – Вып.7. – С. 53 – 58.

Здобувачем встановлено вплив домішок на втрати в оптичних волокнах.

28. Беспрозванных А.В. Анализ матрицы коммутации при восстановлении частичных емкостей и тангенса угла диэлектрических потерь многожильных кабелей методом совокупных измерений / А.В.Беспрозванных // *Електротехніка і електромеханіка.* – Харків . – 2007. – №1. – С. 62 – 66.

29. Беспрозванных А.В. Сравнительный анализ поперечной структуры незаполненных и заполненных телефонных кабелей по результатам прямых измерений емкости и тангенса угла диэлектрических потерь / А.В.Беспрозванных // *Електротехніка і електромеханіка.* – Харків . – 2007. – №5. – С. 61 – 65.

30. Беспрозванных А.В. Диэлектрическое сканирование поперечной структуры многожильных кабелей методом совокупных измерений // *Технічна електродинаміка.* – Київ. – 2008. – № 3. – С. 30 – 37.

31. Беспрозванных А.В. Влияние диссипации энергии в приповерхностных слоях изоляции жил на диэлектрические потери в кабелях / А.В.Беспрозванных, Б.Г. Набока // *Електротехніка і електромеханіка.* – Харків . – 2008. – № 5 – С. 82 – 86. *Здобувачем виконано аналіз причин різниці втрат енергії при різних схемах обстеження багатожильних кабелів.*

32. А. с. №1577524 SU A1 5G01R31/14. Способ неразрушающего контроля конденсаторов с твердым диэлектриком / Набока Б.Г, Беспрозванных А.В., Гладченко В.Я., Малахов В.А.(СССР) – N4460048/24.21; заявл.31.05. 88; опубл. 8.03. 90. *Здобувачем обґрунтовано використання ДАС імпульсів часткових розрядів для оцінки якості ізоляції.*

33. Беспрозванных А.В. Диагностика высоковольтных конденсаторов со слюдобумажноэпоксидным диэлектриком по характеристикам импульсов частичных разрядов / А.В. Беспрозванных, Б.Г. Набока // Вісник Харківського політехнічного інституту. – Харків: ХПІ. – 1988. – Вып.15, № 251. – С. 39 – 42.

Здобувачем запропоновано використовувати ДАС імпульсів ЧР для оцінки якості твердої ізоляції.

34. Besprozvannykh A.V. High-voltage insulation diagnostics using multichannel analyzers / B.G. Naboka, A.V.Besprozvannykh, V.Y.Gladchenko // JPRS-UEE-92-001. – Science & Technology. Central Eurasia: Electronics & Electrical Engineering. – 3 February. 1992. – P. 6. *Здобувачем обґрунтовано час вимірювання ДАС імпульсів ЧР.*

35. Беспрозванных А.В. Влияние увлажнения диэлектрика на амплитудно-частотные характеристики полимерных кабелей / А.В. Беспрозванных, Е.В. Ржевская, Б.Г. Набока // Збірник наукових праць Харківського державного політехнічного університету. – Харків: ХДПУ. – 1999. – Вып.7, часть 3. – С. 177 – 181. *Здобувачем виконано аналіз впливу вологості на амплітудно-частотні характеристики кабелів із полімерною ізоляцією.*

36. Беспрозванных А.В. Анализ структуры слюдосодержащей изоляции по $C-tg\delta$ диаграмме процесса полимеризации / Б.Г.Набока, А.В.Беспрозванных, Абдель- Насер // Диэлектрики – 93: Российская научн.-техн. конф. по физике диэлектриков с междунар. участием 22 – 24 июня 1993 г.: тезисы докладов. – СПб. – Ч.1. – С. 168 – 169.

Здобувачем запропоновано схему заміщення багатокомпонентної ізоляції.

37. Беспрозванных А.В. Признак старения диэлектрика – близость характеристик изоляции соседних жил / Б.Г. Набока, А.В. Беспрозванных, В.Я. Гладченко // Электрическая изоляция – 2002: третья междунар. науч. – техн. конф., 18–21 июня 2002 г.: Труды конференции. – СПб., 2002. – С. 240 – 242.

Здобувачем встановлено непрямі ознаки старіння ізоляції кабелів.

38. Беспрозванных А.В. Оценка технического состояния многожильных кабелей АЭС по параметрам частичных емкостей / Б.Г. Набока, А.В.Беспрозванных, Г.Н.Чертков [и др.] // Измерения важные для безопасности в реакторах: междунар. симпозиум, 25 – 27 окт. 2005 г.: тезисы докл. – Смолице, Словакия, 2005. – С. IX – 1/10 – 10/10.

Здобувачем обґрунтовано оптимальні схеми підключення багатожильних кабелів при використанні двохелектродної схеми вимірювача імітансу.

39. Besprozvannykh A.V. Evaluation of availability index of product many conductor of cables APS on parameters of partial capacities / B.G. Naboka, A.V.Besprozvannich, G.N.Chertkov [and all] // Safety related measurement in reactors:international

symposium, 25 – 27 oct. 2005: 5-th meeting. – Smolenice, Slovak republic, 2005. – Pp. IX – 1/7 – 7/7.

Здобувачем обґрунтовано оптимальні схеми підключення багатожильних кабелів при використанні двохелектродної схеми вимірювача імітансу.

40. Bezprozvnych A.V. Influence of radiation on properties of materials and losses of optical cables / A.V.Bezprozvnych // PHOTONICS – ODS 2005. – 2005: 27 – 28 April, 2005 III International conference on optoelectronic information technologies: abstracts. – Vinnytsia, 2005. – p. 137.

41. Беспрозванных А.В. Методика оценки технического состояния кабелей по параметрам межфазного пространства / А.В.Беспрозванных, Б.Г. Набока // Электрическая изоляция – 2006: четвертая междунар. науч. – техн. конф. , 16–19 мая 2006 г.: Труды конференции. – СПб., 2006. – С. 190–192.

Здобувачем встановлено вплив стану міжфазного простору на діелектричні втрати та електричну ємність.

42. Беспрозванных А.В. Диэлектрическое сканирование поперечной структуры многожильных кабелей АЭС методом совокупных измерений // А.В.Беспрозванных // Безопасность АЭС и подготовка кадров – 2007: X-я междунар. конф. , 1 – 4 октября 2007 г.: тезисы докладов. – Обнинск, 2007. – С. 125 – 126.

43. Besprozvnych A.V. Dielectric scanning of cross-section structure of multicore cables of the atomic power station by the method of cumulative measurements / A.V. Besprozvnych // NPP safety and personnel training – 2007: X international conference, 1 – 4 October 2007: abstracts. – Obninsk, 2007. – pp. 81 – 82.

Анотації

Беспрозванных Г.В. Моніторинг старіння багатожильних кабелів АЕС: теоретичні основи і методи сканування ізоляції електричним полем. – Рукопис.

Дисертація на здобуття наукового ступеня доктора технічних наук за спеціальністю 05.09.13 – Техніка сильних електричних та магнітних полів. Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», Харків, 2009.

Багатожильні кабелі особливі тим, що властивості компонентів – ізоляції жил, міжфазного простору, діелектричної захисної оболонки – недоступні для безпосереднього контролю. Встановлено, що параметри C і $\text{tg}\delta$ цих компонентів кабелю з часом змінюються, що дає можливість використати їх для моніторингу процесів старіння. Основний метод моніторингу багатожильних кабелів полягає в контролі $\text{tg}\delta$ міжфазного простору, де накопичуються низькомолекулярні продукти розпаду органічної ізоляції. Запропоновано методи визначення C і $\text{tg}\delta$ за результатами прямих або сукупних вимірювань, виконаних в діапазоні звукових частот.

Обґрунтована можливість застосування для моніторингу старіння також характеристик часткових розрядів (ЧР) – напруги початку ЧР та їхньої частоти.

На основі аналізу електричного поля розглянуті умови виникнення часткових розрядів в багатожильних кабелях. Для порівняння характеристик ЧР запропоновано використовувати ширину сімейства диференційних амплітудних спектрів, отриманих при кількох значеннях напруги, що зростає.

Досліджені зміни параметрів відновлюваної напруги силових та контрольних кабелів в ході старіння. Встановлені кореляційні залежності між трьома параметрами відновлюваної напруги – амплітудою U_m/E , моментом максимуму t_m та сталою часу саморозряду θ . Запропоновано також використовувати в якості міри зістареності кабелів відношення опорів при низькій та високій напругах – R_{20}/R_{2500} .

Показана можливість контролю стану поверхні полімерної ізоляції жил за величиною термо-трибо-електричного потенціалу.

Ключові слова: моделювання та дослідження електророзрядних процесів; електротехнічні системи, багатожильні кабелі, часткові розряди, ємність і тангенс кута діелектричних втрат, відновлювана електрична напруга, термо-трибо-електричний потенціал.

Bezprozvannich A.V. The Monitoring of Multicore NPP's Cables Aging: The Theoretical Bases and Methods of Insulation Scanning by the Electrical Field. - 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, 2009.

Multicore cables are especial that properties of their components – the cores insulation, interphase space and dielectric protective jacket – are inaccessible to the direct control. It is revealed, that parameters C and $\text{tg}\delta$ of these components are vary changes during aging that enables to use them for ageing monitoring. The basic method of monitoring of multicore cables will consist in the control $\text{tg}\delta$ interphase space where low-molecular products of decomposition of organic isolation collect. Methods of definition C and $\text{tg}\delta$ by results of the direct or cumulative measurements executed in a range of sound frequencies are offered.

The opportunity of application for monitoring ageing also characteristics of partial discharges (PD) – voltage of beginning PD and their frequencies is proved. On the basis of the analysis of an electric field conditions of occurrence PD in multicore cables are considered. For comparison of characteristics PD it is offered to use width of family of the differential peak spectra received at several growing values of a voltage.

Laws of changes of parameters of a recovered voltage of power and control cables are investigated during ageing. Correlation dependences between three parameters of curves of a restored voltage – amplitude U_m/E , the moment of a maximum t_m and a constant of time of the self-category θ are established. It is offered to use also the relation of resistance on a low and high voltage – R_{20}/R_{2500} as measure aging isolation.

The opportunity of revealing aged surfaces of polymeric insulation on value of thermo-tribo-electrical potential is shown.

Key words: modeling and research of electro digit processes; electrotechnic systems, multicore cables, partial discharges, capacity and dissipation factor, recovering electrical voltage, thermo-tribo-electrical potential.

Беспрозванных А.В. Мониторинг старения многожильных кабелей АЭС: теоретические основы и методы сканирования изоляции электрическим полем. – Рукопись.

Диссертация на соискание ученой степени доктора технических наук по специальности 05.09.13 – Техника сильных электрических и магнитных полей. Национальный технический университет «Харьковский политехнический институт», Харьков, 2009.

Многожильные кабели – контрольные с числом жил до 36, силовые с 3-мя жилами в общей металлической оболочке – особенны тем, что свойства изоляции жил недоступны для непосредственного контроля. До сих пор задача определения характеристик по отдельности – изоляции жил, межфазного пространства, диэлектрической защитной оболочки – даже не ставилась. Как было установлено по результатам ускоренных ресурсных испытаний образцов, тангенс угла диэлектрических потерь $\text{tg}\delta$ этих компонентов сильно изменяется в процессе старения. Поэтому он может быть эффективным параметром мониторинга старения кабелей.

Основной метод мониторинга многожильных кабелей состоит в контроле $\text{tg}\delta$ межфазного пространства, где накапливаются низкомолекулярные продукты разложения органической изоляции. Пока этот параметр не превышает определенных пределов (их оценка выполнена на основе ускоренного старения образцов), техническое состояние кабелей считается удовлетворительным.

Обосновано два метода измерения $\text{tg}\delta$ весьма малых погонных емкостей (около 1 пФ/м) межфазного пространства – прямой метод и метод совокупных измерений. Последний основан на использовании систем уравнений: нелинейных – при измерениях без закорачивания свободных промежутков; линейных – при закорачивании. Так, для 27-жильного кабеля имеется 378 частичных емкостей. Соответственно, для нахождения параметров C и $\text{tg}\delta$ всех изоляционных промежутков кабеля число опытов должно быть не менее 378.

Результаты определения параметров промежутков представляются в виде $C\text{-tg}\delta\text{-}i$ диаграммы, на которой наглядно видны аномалии, обусловленные грубыми дефектами кабелей: трещинами изоляции, продуктами распада изоляции, продуктами окисления жил.

Важный косвенный показатель поверхностного сопротивления изоляции – частота частичных разрядов (ЧР). Чем сильнее состарена изоляция, тем меньшее у нее поверхностное сопротивление, тем быстрее растекаются поверхностные заряды, тем выше частота ЧР. На основе анализа электрического поля рассмотрены условия возникновения ЧР в многожильных кабелях – напряжение начала ЧР. Для сравнения характеристик ЧР предложено использовать ширину семейства дифференциальных амплитудных спектров, полученного при нескольких возрастающих значениях напряжения. Большей ширине соответствует

изоляция более высокого качества, т.к. в некачественной изоляции уже при начальном напряжении сразу загорается много воздушных включений. Поэтому при дальнейшем росте напряжения относительный прирост частоты ЧР уже небольшой. Более того, может даже наблюдаться уменьшение частоты ЧР, обусловленное наложением множества импульсов, расширением вследствие этого их длительности и поглощением в фильтрах высокой частоты схемы регистрации ЧР.

Анализ кривых восстанавливающегося напряжения рекомендовано для мониторинга как силовых, так и контрольных кабелей. Изоляцию можно представить в виде двух слоев – нормального и окисленного (дефектного). Уменьшение сопротивления дефектного слоя в процессе дальнейшего старения кабеля приводит к монотонному уменьшению момента t_m достижения максимума восстанавливающегося напряжения. Амплитуда же восстанавливающегося напряжения U_{vm} при этом меняется немонотонно: сначала – увеличивается, а при временах t_m , меньших 12 с, – начинает уменьшаться. Причина – постоянная величина времени разряда изоляции (2 с), вследствие чего для сильно состаренных кабелей начинает разряжаться не только геометрическая, но и релаксационная емкость изоляции.

Установлены корреляционные зависимости между тремя параметрами кривых восстанавливающегося напряжения – амплитудой U_m/E , моментом максимума t_m и постоянной времени саморазряда θ .

Предлагается также использовать четвертый параметр кривой восстанавливающегося напряжения – сопротивление изоляции при весьма малых остаточных напряжениях, порядка 20 В – R_{20} . При низких напряжениях не происходит активации примесей в изоляции, которые возникают в результате ее старения. При высоких напряжениях – даже при 2500 В – наоборот, примеси диссоциируют на ионы, в результате чего сопротивление изоляции снижается. Поэтому отношение сопротивлений R_{20}/R_{2500} , которое фактически отражает нелинейные свойства изоляции, предлагается использовать в качестве меры состаренности кабелей.

Чем сильнее окислена поверхность изоляции, тем выше термо-трибо-электрический потенциал, возникающий при нагреве или охлаждении кабеля. Важно, что этот потенциал длительное время удерживается после охлаждения кабеля, вследствие чего его можно заметить даже после вывода энергоблока в режим планово-предупредительного ремонта.

Ключевые слова: моделирование и исследование электроразрядных процессов; электротехнические системы, многожильные кабели, частичные разряды, емкость и тангенс угла диэлектрических потерь, восстанавливающееся электрическое напряжение, термо-трибо-электрический потенциал.