

На правах рукопису

Резинкін Олег Лукьянович

ДОСЛІДЖЕННЯ ТА КОМП'ЮТЕРНЕ МОДЕЛЮВАННЯ  
ВПЛИВУ СИЛЬНИХ ЕЛЕКТРИЧНИХ ПОЛІВ  
НА ДЕСТРУКЦІЙНІ ПРОЦЕСИ В ІЗОЛЯЦІЇ

05.09.13 - техніка сильних електричних та  
магнітних полів.

Автореферат дисертації на здобуття вченого ступеня  
кандидата технічних наук

Харків-1993

Дисертація в рукопис.

Робота виконана у Науково-дослідному проектно-конструкторському інституті "Молнія" при Харківському політехнічному інституті.

Науковий керівник - кандидат технічних наук, професор  
Конотоп Владлен Вікторович

Офіційні опоненти : доктор технічних наук, професор  
Михайлов Валерій Михайлович;  
кандидат технічних наук,  
Тітов Михайло Миколайович.

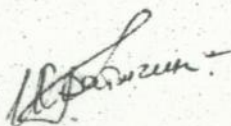
Провідна організація - Інститут імпульсних процесів та  
технологій АН України (м. Миколаїв).

Захист відбудеться "18" 03 1994 р. на засіданні спеціалізованої ради Д 02.09.02 у Харківському політехнічному інституті (310002, Харків, ГСП, вул. Фрунзе, 21).

З дисертацією можна ознайомитись у бібліотеці Харківського політехнічного інституту

Автореферат розісланий "16" 02 . 1994 р.

Вчений секретар  
спеціалізованої вченої ради



Батигін Д.В.

ЛНБ України ім.В.Стефаніка



00801471 (L)

ЛНБ ім. В. Стефаніка  
АН України

### ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

**АКТУАЛЬНІСТЬ ТЕМИ:** Електрична ізоляція в одній з найважливіших частин конденсаторів, формулчих ліній, кабелів та інших елементів високовольтної техніки. Конструкція ізоляції суттєво впливає на працездатність, питомі характеристики та ресурс високовольтних пристроїв. Надійність ізоляції конденсаторів є найважливішою характеристикою, яка обмежує підвищення їх запасасомої енергії. Прагнення до зниження індуктивності та опору резистивної фази пробом твердотільних розрядників приводить до необхідності мінімізації відстані між їх електродами та, як наслідок, до зростання ймовірності їх спонтанного вмикання у разі відмови ізоляції. Жорсткі вимоги до вагогабаритних характеристик бортового обладнання літальних апаратів, рухомих засобів та портативної апаратури призводять до необхідності оптимізації ізоляції їх елементів.

Експериментальне дослідження впливу конструкції ізоляції та форми діючої на неї напруги на питомі та експлуатаційні характеристики того чи іншого високовольтного елемента пов'язане з проведенням тривалих випробувань та великими витратами коштів.

Розвиток обчислювальної техніки в останні роки надав можливість комп'ютерного моделювання електрофізичних процесів, які мають місце в ізоляційних системах при дії на них напруги. Розробка комп'ютерної моделі процесів, що призводять до електричного пробому діелектриків, дозволяє прогнозувати час безвідмовного використання та надійність ізоляції, а також одержувати рекомендації щодо її конструкції та вибору матеріалів до застосування у складі нових зразків високовольтних пристроїв.

**МЕТА РОБОТИ.** Дослідження та комп'ютерне моделювання процесів, що призводять до електричного пробому твердої та комбінованої ізоляції під впливом сильних електричних полів, для забезпечення прогнозування місця пробому та часу життя ізоляційних конструкцій.

**НАУКОВА НОВИЗНА РОБОТИ.** Розроблена методика моделювання процесу електричного старіння твердої та комбінованої ізоляції, основана на чисельнім аналізі розподілу напруженості електричного поля в ізоляційному проміжку та використанні експериментальних статистичних функцій розподілів часу життя мікрооб'ємів присутніх у ньому діелектричних матеріалів. Ця методика дозволяє прогнозувати розвиток у часі та просторі деградаційних процесів,

які відбуваються в ізоляції під впливом сильних електричних полів.

Розроблена методика проведення автоматизованих експериментальних досліджень функції розподілу густини ймовірності часу життя локальних об'ємів ізоляційних матеріалів при різних значеннях напруженості електричного поля.

Одержані результати експериментальних досліджень функцій розподілу густини ймовірності часу життя просоченого конденсаторного паперу у об'ємах  $10^{-12}\text{м}^3$  -  $10^{-17}\text{м}^3$ .

Проведене чисельне моделювання ефекту впливу кількості шарів паперу на ймовірність розвитку пробоя під обкладинками та на зякраїні конденсаторних секцій.

**ПРАКТИЧНЕ ЗНАЧЕННЯ.** Внаслідок проведених досліджень розроблений прикладний пакет програм для IBM-сумісних комп'ютерів. Застосування цього пакету в інженерній практиці дозволяє прогнозувати поведінку ізоляції відомих та знов розроблених елементів високовольтної техніки у різноманітних режимах їх експлуатації. Розроблена методика проведення експериментальних досліджень, яка дозволяє визначати надійнісні властивості мікрооб'ємів діелектричних матеріалів.

**РЕАЛІЗАЦІЯ РЕЗУЛЬТАТІВ РОБОТИ.** Розроблений пакет прикладних програм вжито в Інституті імпульсних процесів та технологій АН України (М. Миколаїв) при виборі конструкції конденсаторних секцій.

**АПРОВАЦІЯ РОБОТИ.** Результати дисертаційної роботи доповідалися та обговорювалися на 6-ій всеукраїнській науково-технічній нараді "Підвищення якості та покращення техніко-економічних показників силових конденсаторів, та комплектних конденсаторних установок" (Серпухов, 1991); 5-ій науково-технічній конференції "Електричний розряд у рідині та його застосування у промисловості" (Миколаїв, 1992); Російській науково-технічній конференції з фізики діелектриків з міжнародною участю "Діелектрики-93" (С-Петербург, 1993); VI-ій науковій школі "Фізика імпульсних дій на конденсовані середовища" (Миколаїв, 1993).

**ПУБЛІКАЦІЇ.** Основний зміст дисертації відображено у 5 друкованих працях.

**СТРУКТУРА ТА ОБ'ЄМ ДИСЕРТАЦІЇ.** Робота складається з вступу, 4<sup>х</sup> розділів та висновку,

## ЗМІСТ РОБОТИ

У ВСТУПНІЙ ЧАСТИНІ показана актуальність теми дисертаційної роботи, її наукова новизна та практичне значення, сформульована мета роботи та коротко розкритий її основний зміст.

У ПЕРШОМУ РОЗДІЛІ розкритий стан проблеми дослідження надійності ізоляції елементів високовольтної техніки.

Велика цінність та тривалість ресурсних випробувань високовольтної ізоляції призводить до необхідності створення методик апріорної оцінки її працездатності на етапі розробки. Відомі високовольтні пристрої, для яких номінальний ресурс повинен складати декілька років. В цьому випадку безпосередні експерименти по знаходженню ресурсу та надійності ізоляції при нормальному режимі експлуатації практично неможливі, і незапобіжним є перехід до прискорених методів випробувань. Однак цінність таких випробувань вкрай висока. Крім того, зміна режиму роботи ізоляції може призвести до того, що в процесі її старіння домінуючу роль будуть відігравати не ті явища, які визначають ресурс та надійність при нормальній експлуатації.

У ряді робіт відзначається, що суттєвий вплив на старіння ізоляції має наявність зон локального посилення напруженості електричного поля. Як причини, що призводять до наявності таких зон, вказуються токопровідні вклучення, закраїни конденсаторних секцій, мікротріщини у твердій ізоляції, перехідні процеси перерозподілу зарядів у комбінованих діелектриках та інше. Розрахунок розподілу напруженості електричного поля в ізоляційному проміжку дозволяє виявити найбільш напружені області ізоляції та виробити рекомендації до зниження у них значення електричного поля.

Найбільше розповсюдження у практиці розрахунку електричних полів мають такі чисельні методи: метод скінчених різниць, метод скінчених елементів, метод інтегральних рівнянь, метод еквівалентних зарядів, метод релаксації. Область найбільш ефективного вживання кожного з вищеперелічених методів визначається особливостями досліджуваних систем, а також метод проведення розрахунків.

В останні роки спостерігається різке збільшення інтересу до досліджень нового класу фізичних об'єктів - фрактальних кластерів

(або фракталів). Топологія та динаміка розвитку просторових структур, утворених під дією часткових розрядів, може бути описана та змодельована за допомогою цих фізичних об'єктів. Використання математичного апарату фрактальної геометрії дозволяє кількісно описати просторову структуру та динаміку розвитку фракталів, глибше зрозуміти фізичні явища, що призводять до їх виникнення.

Із літератури відомі чисельні моделі, які описують розвиток у діелектриках фрактальних утворень. До основи такого моделювання покладено роздріблення усього об'єму діелектрика на окремі ячейки та вивчення стохастичного процесу приєднання до кластера чи агрегата провідних часток. Однак за цими моделями процеси виникнення та розвитку тріангів розглядаються без зв'язку із дійсним часовим масштабом і властивостями реальних діелектриків.

Для вивчення розвитку дефектних утворень у діелектриках під час їх електричного старіння у дійсному масштабі часу пропонується розробити комп'ютерну модель, основу на чисельнім аналізі розподілу напруженості електричного поля в ізоляційному проміжку та застосуванні експериментальних статистичних функцій розподілу часу життя мікрооб'ємів діелектриків.

Оскільки провідним фактором, діючим на електричну ізоляцію під час її експлуатації є напруженість прикладеного електричного поля  $E$ , необхідно розрахувати  $E$  в усіх точках замкнутої області, в якій проводиться моделювання. При цьому потрібно врахувати властивості шарованого діелектричного середовища із вмістом провідних включень, а також перехідний процес перерозподілу зарядів на межах розділу середовищ. Виходячи із усього викладеного для рішення задач моделювання доцільним уявляється застосування метода скінчених різниць.

Відомі із літератури залежності часу до пробоя діелектриків від рівня напруженості електричного поля одержані головним чином для багат шарової ізоляції з площею  $10^2 - 10^6 \text{ м}^2$ . Для роботи комп'ютерної моделі необхідно як вихідні дані застосовувати статистичні функції розподілу часу життя електроізоляційних матеріалів одержані для об'ємів, близьких до розмірів ячеек розрахункової сітки. Враховуючи значний статистичний розкид величин часу життя мікрооб'ємів ізоляційних матеріалів і необхідність одержання даних для широкого спектру напруженостей електричного поля, був розроблений експериментальний стенд, який

дозволив провести випробування в автоматичному режимі.

Із врахуванням усіх названих проблем, у першому розділі сформульовані основні задачі, що мають бути розв'язані в запропонованій роботі.

У ДРУГОМУ РОЗДІЛІ описаний розрахунок розподілу електричного поля в шарованій ізоляції із провідними та непровідними включеннями, який враховує перехідний процес перерозподілу зарядів на межах розділу середовищ. З метою формалізації задачі моделювання електрофізичних процесів, які проходять у товщі діелектрика, на розрахункову область нанесена прямокутна сітка таким чином, щоб її вузли були розташовані на межах розділу середовищ. Властивості діелектрика у межах кожної з ячеек вважаються однорідними. Будемо далі називати ячейки цієї сітки, а також саму цю сітку "фізичними". Габарити "фізичних" ячеек вздовж горизонтальної та вертикальної осей складають відповідно  $\delta X$  і  $\delta Y$ .

У зв'язку з тим, що при розрахунку розподілу напруженості електричного поля був застосований метод скінчених різниць, на область моделювання нанесена ще одна прямокутна сітка, така ж чи більш дрібна, ніж "фізична", крок якої ( $\Delta X_1$ ,  $\Delta Y_1$ ) знаходиться виходячи з потрібної точності розрахунку. Далі будемо називати цю розрахункову сітку "математичною". Вузли "фізичної" розрахункової сітки розташовані на перехресті діагоналей "математичних" ячеек.

У межах кожної з  $N \times M$  ячеек "математичної" сітки напруженість електричного поля  $E$  вважається однаковою. "Фізична" сітка створить  $L \times P$  ячеек, у межах кожної з котрих властивості середовища вважаються однорідними, а напруженість електричного поля  $E$  усереднюється по всім "математичним" ячейкам.

Розглянемо найбільш загальний випадок, коли ізоляція складається із декількох типів діелектриків з різними значеннями діелектричної проникності та питомої провідності. З причини недосконалості існуючих ізоляційних матеріалів у них присутні провідні та непровідні включення. Як показують численні дослідження, важливу роль у старінні ізоляції відіграють процеси на краю обкладинок. Тому, розглядаючи розподіл електричного поля, необхідно брати до уваги вплив крайового ефекту.

При дослідженні динаміки таких електрофізичних процесів як ріст дендритів, а також накопичення продуктів часткових розрядів у товщі діелектрику треба брати до уваги перехідний процес

перерозподілу зарядів у неоднорідних діелектричних середовищах із скінченною питомою провідністю.

Для кожного вузла розрахункової сітки був записаний перший закон Максвелла, від обох частин якого була взята дивергенція та проведене інтегрування по об'єму ячейки та по часу. Тоді за теоремою Гаусса остаточно було одержане таке рівняння:

$$\oint_{\text{в}} \epsilon E_n ds + \iint_{\text{Ов}} J_n ds dt = 0, \quad (1)$$

де  $S$  - поверхня, охоплюєча ячейку; індекс  $n$  позначає проекцію вектора на нормаль до поверхні  $S$ ;  $\epsilon$  - діелектрична проникність середовища;  $J$  - густина струму.

Останнє рівняння було зведено до скалярного шляхом вираження напруженості електричного поля  $\vec{E}$  через потенціали  $\phi_{i,j}$  у вузлах розрахункової сітки. Остаточно (1) було записане у різничному вигляді для елементарної ячейки в момент часу  $t_k$ :

$$A_x \phi_{i,j} + A_y \phi_{i,j} = f_{i,j}, \quad (2)$$

$$\begin{aligned} \text{де } A_x \phi_{i,j} &= \phi_{i-1,j} A X_{i,j} - \phi_{i,j} (A X_{i,j} + B X_{i,j}) + \phi_{i+1,j} B X_{i,j}; \\ A_y \phi_{i,j} &= \phi_{i,j-1} A Y_{i,j} - \phi_{i,j} (A Y_{i,j} + B Y_{i,j}) + \phi_{i,j+1} B Y_{i,j}; \\ A X_{i,j}, B X_{i,j}, A Y_{i,j}, B Y_{i,j} &- \text{прогонічні} \end{aligned}$$

коефіцієнти;  $f_{i,j}$  - права частина, пропорційна заряду, що міститься у ячейці в момент часу  $t_k$ .

Рівняння (2) вирішувалось ітераційним методом змінних напрямків на кожному кроці по часу. Описана схема рішення двовимірного рівняння була реалізована у вигляді програми для IBM PC на алгоритмічній мові FORTRAN-77.

При практичному використанні ітераційного методу змінних напрямків важливою проблемою є вибір ітераційного параметру  $F_{IT}$ , який забезпечує максимальну швидкість збіжності. Шляхом математичних експериментів було встановлено, що при порівняно однорідних величинах прогонічних коефіцієнтів ( $\alpha = k_{\text{пр. max}} / k_{\text{пр. min}} < 500$ , де  $k_{\text{пр. max}}$ ,  $k_{\text{пр. min}}$  - максимальне й мінімальне значення прогонічних коефіцієнтів відповідно)  $F_{IT}$  треба визначити за формулою:  $F_{IT} = \sqrt{k_{\text{пр. min}} \cdot k_{\text{пр. max}}}$ . Якщо  $500 < \alpha < 1500$ ,

тоді  $F_{IT} = k_{\text{пр.мах}}/100$ . При  $\alpha > 1500$   $F_{IT} = 25 \cdot k_{\text{пр.мін}}$ . Визначення величини ітераційного параметру  $F_{IT}$  здійснюється у програмі розрахунку поля автоматично у залежності від значень  $k_{\text{пр.мах}}$  та  $k_{\text{пр.мін}}$ .

При визначенні кроків роздріблення області, що досліджується, забезпечуючих задану точність розрахунку напруженості електричного поля, було проведене порівняння результатів розрахунку рівней модуля напруженості електричного поля  $|E|$ , одержаних при різному числі розділень шару ізоляції на "математичні" ячейки. Величини  $E$  вважалися однаковими, якщо їх відносні відхилення  $\xi$  в кожній із "фізичних" ячеек не перебільшували 10%. Розміри "фізичних" ячеек уздовж осі  $OY$  дорівнюють товщині одного шару.

У результаті порівняння величин напруженості електричного поля у "фізичних" ячейках, на котрі розділений шарований діелектрик із провідними включеннями, при однократнім, двократнім та чотирьохкратнім розділі включення на "математичні" ячейки було встановлено, що двократній розділ забезпечує задану точність розрахунку. Математичні експерименти також показали, що кількість кроків по осі  $OY$  у зоні, що межує із торцем електроду, не повинна бути меншою ніж 3+4.

Електричне поле діелектрика, який містить пробиті мікрооб'єми, не є плоскопаралельним, і для рішення такої задачі потрібна її постановка у тривимірному вигляді.

Була розглянута система плоских обкладинок, між якими розташовано однорідне діелектричне середовище, що містить об'ємні провідні включення. Вихідні рівняння аналогічні приведеним раніш (див. (2)). При рішенні цього рівняння, як і у двовимірнім випадку, був використаний метод змінних напрямків. Той же підхід, що і для двовимірних задач, був використаний для рішення тривимірної задачі. Перехід від  $k$ -ої ітерації до  $(k+1)$ -ої ітерації здійснювався за допомогою послідовного застосування метода прогонки по напрямках  $X, Y$  та  $Z$  для трьохточечних рівнянь. Описана схема рішення тривимірного рівняння була реалізована у вигляді програми для IBM PC на мові FORTRAN-77.

Для оцінки похибки розрахунків розподілу напруженості електричного поля, виконаних у двовимірній та тривимірній постановці, було проведене тестування розроблених програм. Результати тестування показали співпадання одержаних значень  $E$  а

відомими рішеннями у межах потрібної для комп'ютерного моделювання точності (до 9%).

Для оцінки ступеня впливу об'ємної конфігурації провідних тіл на розподіл напруженості електричного поля у діелектрику була проведена серія розрахунків на IBM PC. Ці математичні експерименти проводилися для системи, яка складається з двох плоских електродів, між якими розташований однорідний діелектрик з провідними вклученнями. Головною метою цих обчислень було знаходження похибки розрахування розподілу напруженості електричного поля, виконаного у двовимірній постановці, при різних конфігураціях, розташованих у діелектриці провідних тіл.

Було проведене дослідження розподілу напруженості електричного поля в ізоляції конденсаторного типу, яка вміщує провідні вклучення, що заповнюють по товщині увесь шар. Це дослідження показало, що внаслідок усереднення модуля  $E$  по досить великій "фізичній" ячійці похибка розрахунку електричного поля, виконаного у плоскопаралельному наближенні, не перевищує 10% і є достатньою для інженерних обчислень.

Розроблена програма знайшла практичне використання для обчислення розподілу електричного поля у конденсаторних секціях різних конфігурацій, запропанованих фахівцями по розробці імпульсних конденсаторів з Інституту імпульсних процесів та технологій АН України (м. Миколаїв). Метою цього розрахунку було порівняння характеристик електричного поля у випадках різних варіантів конструкції секцій.

У ТРЕТЬОМУ РОЗДІЛІ описані експериментальні дослідження електричного старіння діелектричних матеріалів.

Комп'ютерна модель деструкційних процесів в ізоляції у якості вихідних даних потребує залежності параметрів статистичних розподілів ресурсів діелектричних матеріалів від рівня прикладеного до них електричного поля.

Для того, щоб ці залежності могли бути коректно використані комп'ютерною моделлю, вони повинні бути одержані для об'ємів діелектриків, які мають той же порядок, що і ячійки розрахункової сітки, яка використовується при моделюванні. Таким чином, для рішення поставленої задачі необхідним є проведення дослідів статистичних функцій ресурсу локальних зон діелектриків, які мають характерні розміри порядку одиниць - десятків мікрон.

Дослідження на зразках таких малих розмірів дозволяє виділити вплив факторів, що обумовлені хіміко-фізичними властивостями діелектриків на фоні впливу токопровідних включень та інших дефектів, присутніх у шарах комбінованої ізоляції.

З метою здобуття необхідних для роботи комп'ютерної моделі характеристик електроізоляційних матеріалів була розроблена експериментальна методика та стенд, що дозволив її реалізувати. Ця методика дозволяє проводити автоматизовані експериментальні дослідження функції розподілу густини ймовірності часу життя локальних областей ізоляційних матеріалів.

Дослідження проводилися на поодиноких шарах конденсаторного паперу, просочених конденсаторним та касторовим маслами. У якості високовольтних електродів були застосовані поперечні зрізи тридцяти мідних обмоткових проводів діаметром  $20 + 60$  мкм, залитих епоксидним компаундом. Конструкція стенду дозволяє при необхідності легко замінити систему електродів на іншу з іншим діаметром електродів. Заземлений електрод був зроблений з алюмінієвої фольги товщиною 10 мкм. Зразки досліджуваного діелектрика виконані у вигляді рулонів, розташованих у герметичних заповнених просочуючою рідиною касетах.

Попередня серія експериментів показала великий розкид значень ресурсу мікрооб'єктів конденсаторних паперів. Крім того, зразки діелектрика не повинні мати контакту із атмосферою, бо присутні у повітрі водяні пари знижують його ізоляційні властивості. Таким чином, виникає необхідність автоматизації процесу випробувань.

Автоматизуються такі процеси: заміна діелектрика, переключення високої напруги з одного електроду на інший, керування осцилографом, вмикання та вимкання високої напруги, керування випробувальною напругою у відповідності із заданим законом його змінення, вимірювання значень часу життя ізоляції із занесенням їх до пам'яті комп'ютера, а також первинна обробка отриманих даних.

Одним із найбільш розповсюджених методів отримання кривих життя ізоляції є проведення випробувань при прикладанні до зразків постійної напруги. При цих випробуваннях частина зразків пробивається ще до того, як напруга досягне випробувальної, а інша частина протягом інтервалу часу у який проводиться експеримент не пробивається зовсім. Внаслідок цього визначення статистичних

функцій розподілу часу життя ізоляції на їх початковій та кінцевій ділянках стає практично неможливим. Таким чином, скласти цілісну картину поведінки мікрооб'ємів діелектрика в електричному полі не вдається.

Застосування методики Старра та Ендікотта дозволяє використовувати експериментальні дані, отримані внаслідок дії на зразки ізоляції наростаючої напруги, для побудування кривих життя при різноманітних значеннях постійної напруги. Згідно із цією методикою, внаслідок незалежності пошкоджень ізоляції, накопичених при прикладанні постійної та наростаючої напруги, зв'язок між відповідними пробивними напругами та часом до пробую для будь-якого квантиля має вигляд:

$$V_0^n t_0 = \frac{V_p^n t_p}{n + 1} \quad (3)$$

де  $V_0$  - пробивна напруга у експерименті з постійною напругою;

$V_p$  - пробивна напруга при рівномірно зростаючій напрузі на зразку;

$t_0$  - час до пробую при постійній напрузі;

$t_p$  - час до пробую при рівномірно наростаючій напрузі;

$n$  - показник ступеня, який являє собою характеристику ізоляційного матеріалу.

Тоді за відомими  $V_p$  та  $t_p$ , маючи певі  $V_0$ , можливо збудувати криві життя ізоляції, відповідні різноманітним рівням напруженості електричного поля. Значення коефіцієнта  $n$  можна здобути, замінивши у (3) ліву частину, відповідну постійній напрузі, виразом, ідентичним правій частині, але здобути при іншій швидкості збільшення напруги. Остаточо здобудемо  $n$  у вигляді:

$$n = \frac{\ln t_{p2} - \ln t_{p1}}{\ln V_{p1} - \ln V_{p2}} \quad (4)$$

де індекси 1 та 2 відповідають значенням, здобути при різних швидкостях зростання напруги.

У межах даної роботи було проведене експериментальне дослідження функції розподілу густини ймовірності ресурсу локальних об'ємів різноманітних ізоляційних матеріалів під час

впливу на них електричного поля. Випробування провадилися на таких ізоляційних матеріалах:

конденсаторний папер КОН-2-10;

конденсаторний папер НИКОН 2-0.005-280 ТУ ОП 13-0281041-120-90;

конденсаторний папер НИКОН 3-0.003 ТУ ОП 13-0281041-84-89.

У якості просочувальної рідини для паперу КОН-2-10 вживалося конденсаторне масло; інші діелектрики були із касторовим просоченням.

Напруга на об'єкті випробувань змінювалася за лінійно наростаючим законом.

За допомогою залежності (3) був здійснений перехід від результатів випробувань наростаючою напругою до даних відповідних експериментам із незмінною напругою. Показник ступеня  $n$  у формулі (3) є стала величина для певного діелектрика, якщо у досліджуваному діапазоні напруженостей поля ( $E = 200-350$  кВ/мм) процеси, що мають місце при старінні діелектрика однакові. Розрахунок  $n$  за формулою (4) для гамм квантилей по експериментально одержаним виборкам при випробуваннях ідентичних зразків в умовах різної швидкості наростання напруги показав, що при збільшенні квантиля величина  $n$  знижується. Наприклад, при двох швидкостях зростання - 5В/с та 10В/с - значення  $n$  знизилося з 6,66 для 5% квантиля до 3,01 для 95% квантиля. Таким чином, для переходу від результатів експериментальних досліджень при наростаючій напрузі до даних по часу життя при постійній напрузі перерозрахунок треба виконувати для кожного квантилю особисто за знайденим для нього рівнем  $n$ . Така процедура була реалізована у вигляді підпрограми і застосована у складі комп'ютерної моделі процесів електричного старіння ізоляції.

При дії на тверду ізоляцію змінної у часі великої напруги в ній відбувається розвиток утворень, які мають яскраво виражений фрактальний характер - дендритів. Дендрити починають рости з областей із локальним підсиленням напруженості електричного поля (з мікровиступів на електродах, з провідних включень і т.і.) та можуть перекривати значну частину ізоляційних проміжків, знижуючи цим електричну міцність та ресурс ізоляції. Топологія та динаміка розвитку дендритів залежать від електричних та ресурсних характеристик діелектрика, від конфігурації електродної системи, а

також від форми та амплітуди діючої напруги.

Для вивчення характеристик розвитку дендритів у просторі та часі та для оцінки їх впливу на розподіл електричного поля в ізоляції був розроблений експериментальний стенд, який дозволив проводити оптичну реєстрацію фаз зростання дендритів у поліетилені під час його електричного старіння.

Проведені спостереження дозволили зареєструвати власне випромінювання, виходяче з каналів дендриту у вигляді почергових спалахів його гілок. Певно, порожнисті канали, що утворюють дендрит періодично заповнюються плазмою, та їх електричний опір стає суттєво (не менш ніж на декілька порядків) меншим, ніж у поліетилену. Таким чином дендрит повинен суттєво спотворювати електричне поле у проміжку між електродами.

Дослідження динаміки росту тріангів в поліетиленовій ізоляції в системі голка-площина дозволили одержати експериментальні залежності довжини домінуючої гілки  $l$  та фрактальної вимірності  $D$ , дендритів від часу. В умовах проведення цих дослідів швидкість просування домінуючої гілки дендриту до протилежного електроду безперервно падає. Водночас стається зростання  $D$ , що свідчить про переважний розвиток пагонів, які не належать до домінуючої гілки. Обидва ці явища стимулюють одне одного і, як свідчать результати обчислень за допомогою розробленої програми розрахунку розподілу напруженості електричного поля, призводять до зниження максимальної напруженості електричного поля у проміжку та до зростання коефіцієнту використання ізоляції порівняно із їх початковими значеннями.

У ЧЕТВЕРТОМУ РОЗДІЛІ описані методика та алгоритм чисельного моделювання розвитку фрактального кластеру, утвореного ділянками ізоляції, зруйнованими у результаті її старіння під впливом електричного поля.

Процес моделювання починається із завдання вихідних даних, які являють собою значення відносної діелектричної проникності ( $\epsilon_{i,j,k}$ ) та питомої провідності ( $\gamma_{i,j,k}$ ) елементарних явечек, де  $i=1,2,\dots,N$ ;  $j=1,2,\dots,M$ ,  $k=1,2,\dots,K$ . Крім того вводяться значення  $\eta$  та  $\delta$ , експериментально одержані у розглядаемому діапазоні електричних полів для кожного із діелектричних матеріалів, застосованих при конструюванні ізоляції. Для моделювання випадковим чином розподілених властивостей конкретного зразка

ізоляції, кожній з ячеек за допомогою генератору квазівипадкових чисел, рівномірно розподілених на інтервалі  $(0,1)$ , ставиться у відповідність випадкове число  $F$ . Потім робиться розрахунок напруженості електричного поля у досліджуваній області, який бере до уваги крайовий ефект та перехідний процес перерозподілу зарядів на межах розділу середовищ.

Після завершення розрахунку поля для кожної з ячеек за допомогою функцій, зворотніх експериментально знайденим ресурсним характеристикам мікрооб'єктів застосованих діелектриків, при розрахованому значенні напруженості електричного поля визначається ресурс  $T_{i,j}$ . При цьому у якості стартових при знаходженні  $T_{i,j}$  вживаються згадані вище числа  $F$ . Далі робиться пошук ячейки, яка відповідає мінімальному значенню добутку  $T_{i,j} \cdot \Pi_{i,j,k}$ , де  $\Pi_{i,j,k}$  - масив поправочних коефіцієнтів, введений з метою обліку ефекта змінення ресурсу елементарних ячеек завдяки впливу на них електричного поля у час, попередній  $k$  - му часовому шару ( $k=0,1,2,\dots$ ). Значення  $\Pi_{i,j,k}$  характеризують рівень виробки ресурсу кожної елементарної ячейки і обчислюється по рекурентній формулі:

$$\Pi_{i,j,k} = \Pi_{i,j,(k-1)} \left( 1 - \frac{T_{ш,k}}{T_{\max_{i,j}} \cdot \Pi_{i,j,(k-1)}} \right),$$

де  $\Pi_{i,j,0} = 1$ ;  $T_{ш,k} = \min [ T_{i,j} \cdot \Pi_{i,j,k} ]$  - величина часового кроку;  $T_{\max_{i,j}}$  - ресурс елементарної ячейки, яка не зазнала впливу електричного поля.

Ячейки, відповідні мінімальному значенню  $T_{i,j} \cdot \Pi_{i,j,k}$ , вважаються пробитими і притаманні їм значення  $\epsilon_{i,j,k}$ ,  $\gamma_{i,j,k}$  замінюються на величини, характерні для провідних тіл.

Потім, згідно зі спеціально розробленим та реалізованим на IBM PC алгоритмом програма перевіряє, чи є провідний шлях, який з'єднує електроди розрахункової системи. У разі, якщо такий шлях знайдено, розрахунок припиняється, і текучий час  $t = \sum T_{ш,k}$  вважається часом життя ізоляційного проміжку у цілому. Якщо ж замикання електродів не виявлено, програма переходить до дослідження стану системи на наступному часовому шарі. З цією метою знову створюються усі перелічені операції, починаючи з розрахунку розподілу напруженості електричного поля у проміжку з прийняттям до уваги знов з'явившихся провідних вклучень та нового

значення напруги на електродах.

Внаслідок того, що кількість пошкоджених ячеек з кожним новим виконанням описаного алгоритму зростає, через деяке число кроків по часу в ізоляційнім проміжку з'являється провідний шлях, який замикає електроди системи. Сума величин усіх розрахованих до цього моменту часових кроків моделює час життя досліджуваної системи у проведеному чисельному експерименті. Розроблена програма, роблячи багаторазове виконання таких чисельних експериментів, дозволяє побудувати функції розподілу часу життя для моделюемого ізоляційного проміжка, дослідити просторові розподіли ймовірності пробоя, знайти слабкі місця ізоляції, тощо.

Для перевірки достовірності опису розробленою комп'ютерною моделлю процесів електричного старіння діелектриків був проведений ряд чисельних експериментів щодо моделювання розвитку деструкційних процесів в ізоляції під дією сильних електричних полів. Результати моделювання були порівняні із відомими з літератури даними. Була проведена серія розрахунків часу життя чотирьох, шести та восьми шарів просоченого конденсаторного паперу, розташованого між плоскими обкладками та в зоні закраїни конденсаторної секції. У якості вихідних даних для роботи моделі були використані результати експериментів на мікрооб'ємах паперу КОН-2-10, просоченого конденсаторним маслом.

Розрахунок часу до пробоя для кожної з кількостей шарів ізоляції  $N$  проводиться 80 - 110 разів при різних наборах стартових чисел  $P$ , які характеризують розподілені випадковим чином властивості діелектричного матеріалу. В результаті були розраховані розподіли ймовірностей часів до пробоя сублокальних зон, які містять та не містять закраїну, при різних  $N$ . Для переходу від ймовірностних розподілів часів життя сублокальних зон до ймовірностних розподілів часів життя реальних систем був застосований закон перетворення масштабу. Для визначення місця пробоя по відомим розподілам часу життя для закраїни і для зони під обкладками була розроблена програма для IBM PC. Ця програма заснована на застосуванні метода Монте-Карло. У програмі для закраїни та зони під обкладками генерується пара випадкових чисел  $P_1$  та  $P_2$ , рівномірно розподілених на інтервалі  $[0,1]$ . Ці числа використовуються як стартові при двократному запуску генератора, що має вигляд розподілу Вейбулла або суми двох

Вейбулловських розподілів. При першому запуску генератора параметри розподілу Вейбулла відповідають закраїні та заданій величині  $N$ , при другому запуску - зоні під обкладинками та заданій величині  $N$ . В результаті одержуємо часи життя зразків для закраїни  $t_z$  та зони під обкладинками  $t_{об}$ . У програмі реалізовано алгоритм підрахунку числа пробойів на закраїні і під обкладинками за наступним принципом: коли  $t_z < t_{об}$  вважається, що пробой має місце на закраїні, коли ж  $t_{об} < t_z$ , то - навпаки. Алгоритм повторюється, починаючи з генерування чисел  $F_1$  та  $F_2$ , доки  $L$  (при розрахунках  $L$  було прийнято 50) раз підряд кількість процентів пробойів на закраїні та в зоні під обкладинками не перестане змінюватися у межах заданої точності.

Порівняння розрахованої кількості пробойів під обкладинками та на закраїні з відомими експериментальними даними показало їхній збіг у межах 10% похибки.

#### ОСНОВНІ РЕЗУЛЬТАТИ РОБОТИ

1. Розроблена та програмно реалізована методика комп'ютерного моделювання електричного старіння ізоляції, заснована на чисельному аналізі розподілу напруженості електричного поля в ізоляційному проміжку та застосуванні експериментальних кривих життя мікрооб'єктів діелектричних матеріалів. Модель дозволяє досліджувати динаміку та просторовий розподіл передпробійних процесів, беручи до уваги наявність у досліджуваній області провідних включень довільної просторової конфігурації, скінченної величини питомої провідності діелектричних матеріалів, перехідного процесу перерозподілу зарядів на межах розділу середовищ, а також кривих ефектів. Модель придатна для застосування у випадку змінних у часі питомої провідності та діелектричної проникності входящих до складу ізоляції діелектриків, а також при довільній формі напруги на електродах.

2. Розроблена методика, яка дозволяє проводити автоматизовані експериментальні дослідження функції розподілу густини ймовірності часу життя локальних областей ізоляційних матеріалів.

3. З метою отримання вихідних даних для роботи комп'ютерної моделі електрофізичних процесів, які мають місце у твердій ізоляції під впливом сильних електричних полів, експериментально

визначені статистичні функції розподілу ресурсу поодиноких шарів просочених конденсаторних паперів при об'ємах зразків порядку  $10^{-15} \text{ м}^3 - 10^{-12} \text{ м}^3$ .

4. Проведене чисельне моделювання ефекту впливу кількості шарів паперу на розподіл місць пробоя конденсаторних секцій. Порівняння результатів розрахунку кількості пробоя під обкладками та на закраїні конденсаторних секцій, з експериментальними даними показало їхній збіг у межах похибки 10%.

Розроблена комп'ютерна програма моделювання розвитку дендритів, що призводять до електричного пробоя твердої та комбінованої ізоляції, дозволяє створити автоматизоване робітниче місце для розробки ізоляційних конструкцій високовольтних пристроїв. При цьому різко зменшується об'єм експериментів, їхні строки та коштовні витрати при знаходженні ресурсу та надійності високовольтної ізоляції за рахунок переходу від випробувань на натурних зразках до роботи з локальними об'ємами діелектриків. Результати експериментів на мікрооб'ємах ізоляції є універсальними, залежними лише від сорту діелектрика, тому вони можуть бути застосовані для моделювання процесів пробоя довільної ізоляційної конструкції, у якій використано даний матеріал. Таким чином, стає можливим суттєве зменшення коштовності та строків розробки нових зразків високовольтної техніки. Багаторазово ( у циклі ) проводячи комп'ютерне моделювання та змінюючи при цьому конструкційні параметри ізоляції можливо проводити оптимізацію конструкції по її ресурсу, надійності та вагогабаритним показникам.

Основний зміст дисертації опублікований у слідуючих роботах:

1. Резинкин О. Л. Математическая модель электрических процессов в комбинированных диэлектриках.- в кн. тез. докл. 6-ого всесоюз. науч.-техн. совещ. "Повышение качества и улучшение технико-экономических показателей силовых конденсаторов и комплектных конденсаторных установок". Серпухов, 1991.

2. Конотоп В. В., Резинкин О. Л., Резинкина М. М. Компьютерная модель пробоя комбинированного диэлектрика.- В. кн. тез. докл. 5-ой науч.-техн. конф. "Электрический разряд в жидкости и его применение в промышленности". Николаев, 1992, с.22.

3. Долбин А.В., Конотоп В.В., Резинкин О.Л., Резинкина М.М. Получение кривых жизни твердой изоляции из опытов с нарастающим

напряжением. - В кн. тез. докл. VI-научной школы " Физика импульсных воздействий на конденсированные среды". Николаев, 1993, 229с.

4. Гадаскин С.Г., Долбин А.С., Конотоп В.В., Резинкин О.Л. Экспериментальное исследование динамики роста дендритов в полиэтиленовой изоляции.- В кн. тез. докл. Российской науч.-техн. конф. по физике диэлектриков с международным участием "Диэлектрики-93". С-Петербург, 1993.

5. Конотоп В.В., Резинкин О.Л., Резинкина М.М. Исследование влияния дендритов на распределение электрического поля в полиэтиленовой изоляции.- В кн. тез. докл. Российской науч.-техн. конф. по физике диэлектриков с международным участием "Диэлектрики-93". С-Петербург, 1993.

Роботи /2/ - /5/ виконані у співавторстві. Особистий вклад у ці роботи полягає у розробці основних положень математичних моделей та методик проведення експериментальних досліджень, отриманні експериментальних даних по часам життя ізоляції, створенні розрахункових програм для IBM PC, проведенні чисельних експериментів на IBM PC, та аналізі одержаних результатів.



AB 29.221

**AB 29.221**