

На правах рукопису

Долбін Олександр Вітольдович

ДОСЛІДЖЕННЯ ТА КОМП'ЮТЕРНЕ МОДЕЛЮВАННЯ  
ПРОЦЕСІВ У ПОЛОСТЯХ ТВЕРДОГО ДІЕЛЕКТРИКА  
В СИЛЬНИХ ЕЛЕКТРИЧНИХ ПОЛЯХ  
05.09.13 - техніка сильних електричних  
та магнітних полів

Автореферат дисертації на здобуття наукового ступеня  
кандидата технічних наук

Харків - 1996

Дисертація є рукопис

Робота виконана на кафедрі *ЛННБ України ім.В.Стефаніка*  
Харківського державного політехнічного університету



00757042 (P)

Науковий керівник - кандидат технічних наук, професор  
Конотоп Владлен Вікторович.

Офіційні опоненти : доктор технічних наук, професор  
Кононов Борис Тимофійович;  
кандидат технічних наук, с.н.с.  
Рудаков Валерій Васильович.

Провідне підприємство - Інститут імпульсних  
процесів НАН України  
(м. Миколаїв).

Захист відбудеться "19" грудня 1996р.  
на засіданні спеціалізованої вченої ради Д 02.09.15 у  
Харківському державному політехнічному університеті  
( 310002, м.Харків-2, МСП, вул. Фрунзе 21 ).

З дисертацією можна ознайомитись у бібліотеці універси-  
тету.

Автореферат розісланий "11" листопада 1996р.

Вчений секретар  
спеціалізованої вченої ради  Єгоров Б.О.

## ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

Актуальність проблеми. Основою сучасної електричної ізоляції складають високомолекулярні вуглеводні. Це обумовлено їх високою електричною міцністю, низькою електричною провідністю, високою одноманітністю структури, низькою вартістю та простотою виробництва. Поліетилен (ПЕ) є одним з найбільш розповсюджених твердих полімерних діелектриків. Він має досить високу електричну міцність, легко обробляється і може застосовуватись як у вигляді литих конструкцій, так і у вигляді плівок. Поряд з вищепереліченими якостями слід відзначити, що ПЕ має і деякі вади. Головною з них є та, що внаслідок довгого знаходження його в сильному змінному електричному полі в ньому можуть виникати гіллясті порожнини - дендрити, які розвиваються в місцях локального посилення електричного поля і поступово зростають від одного електрода до іншого. Фізичні процеси, що обумовлюють виникнення і розвиток дендрита досить складні та малодосліджені. Проведення експериментальних досліджень динаміки розвитку дендрита у реальних ізоляційних конструкціях обмежується неможливістю передбачити місце його виникнення та складність неруйнівного контролю його росту.

Розвиток комп'ютерної техніки дає можливість застосовувати для досліджень складних фізичних процесів комп'ютерне моделювання, за допомогою якого можливо детально аналізувати вплив окремих чинників та їх сукупності на динаміку розвитку дендрита в ізоляції, а також знаходити ймовірність виникнення дендрита і часу його розвитку.

У зв'язку з широким розповсюдженням ПЕ дослідження та комп'ютерне моделювання умов його електричного руйнування з метою прогнозування строку служби ізоляційних конструкцій, що містять ПЕ, є актуальним.

Метою роботи є розробка математичної моделі виникнення та наступного розвитку дендритів у поліетилені в сильному електричному полі, яка б дозволяла прогнозувати ймовірність строку служби поліетиленових ізоляційних конструкцій електрофізичних пристроїв. В основі моделі лежать експериментальні дослідження ресурсних характеристик мікрооб'єктів кабельного ПЕ в сильному електричному полі, а також електричної міцності мікроканалів в ПЕ.

Наукова новизна. Розроблена і підтверджена

експериментально математична модель розвитку дендритів у поліетиленовій ізоляції, яка враховує часткові розряди (ЧР) в каналах дендрита, стохастичне руйнування ПЕ, і дозволяє прогнозувати ймовірність появи дендритів і швидкість їх розвитку.

Експериментально отримані статистичні характеристики ресурсної витривалості мікрообсягів кабельного ПЕ в сильному змінному електричному полі промислової частоти напруженності 100...250 кВ/мм, досліджена електрична міцність мікроканалів в ПЕ та фазовий розподіл ЧР у каналах дендрита на різних стадіях його розвитку.

Отримані облікові залежності просторової структури дендрита від напруженності електричного поля.

Практичне значення. Розроблено методику, яка дозволяє прогнозувати ймовірність строку служби поліетиленових ізоляційних конструкцій (кабелів, ізоляторів, тощо). Розроблено також пакет програм для ПЕОМ, який реалізує одержану в роботі методику.

Апробація роботи. Головні результати роботи викладені та обговорені на чотирьох науково-технічних конференціях: "Дизлектрики-93". (С-Петербург, 1993); VI-наукова школа "Фізика імпульсних впливів на конденсовані середовища" (Миколаїв, 1993); "Комп'ютер: наука, техніка, технологія, освіта, здоров'я" (Харків-Мішкольц, 1994); VII-наукова школа "Фізика імпульсних розрядів в конденсованих середовищах" (Миколаїв, 1995); "Комп'ютер: наука, техніка, технологія, освіта, здоров'я" (Харків-Мішкольц, 1995); "Комп'ютер: наука, техніка, технологія, освіта, здоров'я" (Харків-Мішкольц, 1996); а також на міжнародному симпозиумі: "1995 Int. Symp. on Electrical Insulating Materials" (Токуо, 1995).

Публікації. За результатами виконаних досліджень опубліковано 11 друкованих праць.

Структура і обсяг дисертації. Робота складається із вступу, трьох розділів, висновку, переліку літератури з 56 найменувань і вміщує 182 сторінки, 67 малюнків і 2 таблиці.

#### ЗМІСТ РОБОТИ.

У вступі показана актуальність теми дисертаційної ро-

боти, її наукова новизна і практичне значення, сформульована мета роботи та коротко викладений її основний зміст.

В першому розділі на базі літературних джерел здійснено аналіз фізико-хімічних процесів, які сприяють появі та наступному проростанню розвинених порожнин (дендритів) у поліетиленовій ізоляції. Відзначено, що однією з найважливіших задач під час розробки високовольтних конструкцій, які містять поліетиленову ізоляцію, є з'ясування ймовірності появи та швидкості розвитку в ній дендритів. Проведення експериментальних досліджень динаміки розвитку дендритів у реальних ізоляційних конструкціях ускладнено неможливістю локалізації місця появи дендрита та неруйнуючого контролю його розвитку. У зв'язку з цим є актуальною розробка теоретичної моделі руйнування поліетиленової ізоляції під впливом електричного поля, яка б дозволила прогнозувати ймовірність розвитку дендритів в реальних ізоляційних конструкціях і наступного їх пробую.

У більшості публікацій математичні моделі, що описують розвиток в діелектриках передпробойних утворень, розглядають їх відокремлено від часового масштабу. Таке моделювання базується на розподілі всього обсягу діелектрика на окремі чарунки та дослідженні стохастичного процесу приєднання до кластеру або агрегату, що росте, провідячих часток. При цьому старіння ізоляції розглядається узагальнено, без врахування складних фізичних процесів руйнування діелектрика. Це робить такі моделі малопридатними для вивчення більшості важливих випадків, а також вони не здатні досить точно описувати старіння ПЕ та інших полімерних діелектриків, в яких не виникають наугледчені передпробойні канали.

На базі аналізу літературних джерел з'ясовані головні чинники, які повинні враховуватися при розробці моделі розвитку дендритів в поліетиленовій ізоляції: руйнування структури ПЕ під впливом сильного електричного поля з появою мікропорожнин, трьохвимірний характер структури каналів дендрита, що з'являються, їх провідність, часткові розряди (ЧР) в них, а також стохастичний характер процесу руйнування ізоляції.

Виходячи з аналізу літературних джерел зроблено висновок, що для моделювання процесу розвитку дендрита є необхідним розрахунок напруженності електричного поля в усьому ізоляційному обсягу, що розглядається. Для цього обрано метод кінечних різниць у сукупності з методом вторинних джерел.

Зроблено висновок про необхідність отримання додаткових експериментальних даних. Це статистичні функції, що характеризують розподіл часу життя мікрообсягів ПЕ в залежності від рівня напруженності електричного поля; залежності електричної міцності мікроканалів в ПЕ від їхнього діаметру, зсув фази найбільшої інтенсивності ЧР у каналах дендрита по відношенню до напруги, що прикладається.

У другому розділі описана математична модель росту дендрита в обсязі ізоляції, яка базується на знаходженні трьох-вимірного розподілу потенціала електричного поля за довільних змін напруги на електродах з урахуванням змін фізичних параметрів ізоляційного обсягу, перерозподілу заряду в ізоляції.

Для розглядаємого ізоляційного обсягу було записано рівняння неперервності тока:

$$\operatorname{div} \vec{\delta} = 0, \quad (1)$$

де  $\vec{\delta}$  - вектор щільності тока.

Вектор  $\vec{\delta}$  було покладено складаючимся з двох складових:

$$\vec{\delta} = \vec{\delta}_{\text{пр}} + \frac{\partial \vec{D}}{\partial t}, \quad (2)$$

де  $\vec{\delta}_{\text{пр}}$  - вектор токів, обумовлених провідністю матеріала  $\gamma$ ;

$\vec{D}$  - вектор діелектричного зсуву.

Рівняння (1) інтегрувалося по часу, при чому враховувалося, що для розглядаємої задачі, у переважній більшості практично вагомих випадків діаметр каналу дендрита набагато меншій довжини ребра розрахункової сітки. Таким чином, вважаючи діелектричну проникненість ізоляції постійною і використовуючи третє рівняння Максвеллу, рівняння (1) у декартових координатах було надано у наступному вигляді:

$$\frac{\partial^2 \varphi}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \varphi}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 \varphi}{\partial z^2} + \frac{\rho_{\text{вільн}}}{\epsilon_a} = 0, \quad (3)$$

де  $\rho_{\text{вільн}}$  - щільність обсягового заряду,

$\epsilon_a$  - діелектрична проникненість ПЕ.

Скалярний потенціал електричного поля  $\varphi$  було введено при допомозі співвідношення:

$$\vec{E} = - \operatorname{grad} \varphi, \quad (4)$$

де  $\vec{E}$  - напруженість електричного поля.

Використовую закон Ома в диференційній формі, а також співвідношення (4), маємо:

$$\rho_{\text{вільн}} = \int_0^t \left[ \frac{\partial}{\partial x} \left( \gamma \frac{\partial \varphi}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( \gamma \frac{\partial \varphi}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left( \gamma \frac{\partial \varphi}{\partial z} \right) \right] dt \quad (5)$$

Рівняння (3) вирішувалося з врахуванням співвідношення (5) при заданих початкових та граничних умовах.

На обсяг, що розглядається, накладалася прямокутна сітка, яка має  $X \times Y \times Z$  вузлів. Вважалося, що весь обсяговий заряд у системі сконцентровано у вузлах просторової сітки, а руйнування ізоляції (рост дендриту) відбувається уздовж її ребер. При характерних розмірах дендриту 0,5...2 мм характерна довжина прямих відрізків його гілок  $l$  в залежності від різних умов складає 10...100 мкм. Довжина ребра розрахункової сітки приймалась рівною  $l$ , електричні характеристики середовища, а також діаметр каналу дендриту уздовж нього вважались незмінними.

Відповідний різничний аналог для рівняння (3), записаний для елементарної чарунки просторової сітки, має вигляд:

$$k_{i+1,j,k} \varphi_{i+1,j,k} + k_{i-1,j,k} \varphi_{i-1,j,k} + k_{i,j+1,k} \varphi_{i,j+1,k} + k_{i,j-1,k} \varphi_{i,j-1,k} + k_{i,j,k-1} \varphi_{i,j,k-1} + k_{i,j,k+1} \varphi_{i,j,k+1} + k_{i,j,k} \varphi_{i,j,k} = -\rho_{i,j,k} / \epsilon_{i,j,k} \quad (6)$$

де  $\rho_{i,j,k}$  - щільність заряду, сконцентрованого в  $i,j,k$ -тому вузлі;

$\epsilon_{i,j,k}$  - середня абсолютна діелектрична проникненість у  $i,j,k$ -тому вузлі;

$k_i$  - просторові коефіцієнти.

Рівняння (6), записані для кожного вузла просторової сітки складають систему лінійних алгебраїчних рівнянь (СЛАР), яку потрібно вирішувати на кожному часовому кроці, знаходячи праву частину ітераційним методом.

Матриця коефіцієнтів системи рівнянь (6) є сьомидіагональною квадратною матрицею з необхідною для практично значних розрахунків кількістю рівнянь понад 5000...10000. Тому для вирішення СЛАР був застосований модифікований метод Гауса.

в якому нульові елементи у верхньому правому і нижньому лівому вуглах матриці не використовуються. У цьому випадку матриця коефіцієнтів фактично перетворюється в прямокутну матрицю, яка вміщує  $(2 \times X \times Y + 1) \times X \times Y \times Z$  елементів. Крім того, з структури системи рівнянь типа (6) випливає, що матриця коефіцієнтів не залежить від часу та електричних властивостей ізоляції, а залежить виключно від кордонних умов, які залишаються незмінними в процесі моделювання. Таким чином, обчислення матриці коефіцієнтів здійснювалось під час підготовки даних для моделювання, а потім отримана матриця використовувалась під час перерахунку потенціалів на кожному часовому кроці.

Але, навіть з використанням сучасних комп'ютерів, рішення системи, що складається більш ніж з 10000 елементів, є проблематичним. З метою усунення цієї проблеми було застосовано наступний підхід. З базовою розрахунковою сіткою з розміром  $X \times Y \times Z$  вузлів сполучувалась додаткова розрахункова сітка з розміром  $X_1 \times Y_1 \times Z_1$  вузлів та кроком, кратним кроку базової сітки. На кожному часовому кроці поперше знаходились потенціали у вузлах додаткової сітки. Для цього в них скупчувався увесь обсяговий заряд. Розподіл потенціала електричного поля у вузлах додаткової сітки виконувався з використанням вищевикладеної методики. Потім з використанням квадратичного відносно других похідних сплайна, у якому враховується розподіл зарядів у вузлах базової розрахункової сітки, виконувалось обчислення потенціалу у вузлах базової сітки, які лежать на ребрах додаткової. Після цього розглядався прямокутний обсяг  $\Delta V_1$ , у вершинах якого лежать вузли додаткової розрахункової сітки. На гранях цього обсягу вирішувалось рівняння (3). Потім знаходились рішення рівняння (6) всередині обсягів  $\Delta V_1$ , на гранях яких був визначений потенціал.

Для визначення помилки розрахунків розподілу потенціалу електричного поля було проведено їх порівняння з результатами, отриманими аналітичними методами. Різниця в результатах не перевищувала 8%.

Статистичний процес старіння ізоляції в сильному електричному полі було розглянуто за допомогою чисельної реалізації метода Монте-Карло стосовно до деградації ізоляції. При цьому кожному ребру базової розрахункової сітки ставилось у відповідність випадкове дійсне число в інтервалі 0...1. Воно використовувалось у якості ймовірносного квантиля для озна-

чення часу життя елемента ізоляції при фіксованому рівні напруженості електричного поля.

На кожному часовому кроці визначалась середня напруженість електричного поля  $E$  для кожного ребра просторової сітки, а потім розраховувались відповідні значення напруженості зменшення часу життя елементів за часовий крок  $\Delta t$ , які визначають старіння ізоляції під впливом електричного поля. Якщо час життя елемента  $t_x$  стає від'ємним, то елемент вважався пробитим - змінювались його електричні характеристики і він приєднувався до гілки моделюемого дендрита. Потім проводилось переобчислення потенціалів вузлів просторової сітки з урахуванням змін в характеристиках середовища, що виникли внаслідок пробоя, а також зміни за часовий крок потенціалу електродів  $U(t)$ . Цей процес повторювався доти, доки між потенційним і заземленим електродами не виникав безперервний шлях, складений з пробитих елементів ізоляції. У цьому випадку процес припинявся і фіксувався час життя ізоляції.

Для отримання даних по ресурсним характеристикам мікрообсягів діелектрика під впливом на них сильного електричного поля був розроблений автоматизований експериментальний стенд, що дозволяє проводити ресурсні випробування мікрообсягів кабельного поліетилену (до  $10^{-12} \text{ м}^3$ ).

Наведені результати ресурсних випробувань мікрообсягів кабельного поліетилену для радіусів закруглення випробувального електроду 5, 30, 100 і 250 мкм при різних швидкостях зростання випробувальної напруги. В результаті статистичної обробки експериментальних виборок були отримані відповідні параметри теоретичних розподілів, які характеризують час життя мікрообсягів поліетиленової ізоляції у разі дії на неї змінної напруги промислової частоти.

Наведені результати моделювання розвитку дендрита в електродній системі "гострий виступ - плоскість" для випадків провідячих ( $\gamma = 10^{-6} \text{ Ом}^{-1}$ ) та слаббпроводячих ( $\gamma = 10^{-11} \text{ Ом}^{-1}$ ) каналів дендрита.

Розроблена система критеріїв оцінки просторової структури дендриту в ході його розвитку. В якості критеріїв застосовані: час розвитку дендрита, коефіцієнт заповнення обсягу  $K_v$ , відносна довжина гілки  $l_{\text{від}}$ , відносний радіус дендрита  $r_{\text{від}}$ .

Наведені результати експериментальних досліджень динамі-

ки розвитку дендрита за різних рівнів напруженності електричного поля. На їх основі означено математичне очікування критеріїв просторової структури дендрита, а також їх дисперсія. Відзначено, що при напруженності поля  $E_{\max} = 150$  кВ/мм експериментальна крива залежності коефіцієнту заповнення обсягу дендритом має максимум ( $k_v = 0.5$ ). В області малих значень напруженності поля ( $E_{\max} = 120$  кВ/мм), а також в області великих значень ( $E_{\max} = 280$  кВ/мм) математичне очікування коефіцієнта заповнення обсягу зменшується в 2,5 рази.

За допомогою розробленої системи критеріїв просторової структури дендриту виконано порівняння результатів чисельного моделювання його розвитку з експериментальними даними. Отримані результати в окремих випадках не співпадають в 2 - 3 рази. Зроблено висновок, що для приведення у відповідність результатів чисельного моделювання з експериментальними даними необхідно врахувати в математичній моделі ЧР в каналах дендрита, які призводять до перерозподілу обсягового заряду в ізоляції, що досліджується.

У третьому розділі описано розроблений експериментальний стенд для реєстрації власного випромінювання каналів дендрита. Отримані осцилограми, які фіксують випромінювання ЧР в гілках дендрита в процесі його розвитку. Відзначений зсув фази максимуму інтенсивності спалахів ЧР на  $\pi/4$  відносно потенціалу електродів. В процесі росту дендрита зсув фази зменшується.

Описана розроблена модель розвитку дендрита в поліетиленовій ізоляції, яка враховує ініціювання ЧР в гілках дендрита під час руйнування чергового мікрообсягу ізоляції поблизу однієї з гілок, а також виникнення ЧР, якщо градієнт електричного поля уздовж прямолінійної частки гілки перевищує пробойне значення. Було прийнято, що під час ЧР гілка дендрита заповнюється плазмов та переходить у провідний стан. При цьому всі її точки приймають потенціал, що дорівнює потенціалу електрода, а уздовж гілки відбувається перерозподіл заряду. Після вирівнювання потенціалу відбувається згасання плазми та зменшення провідності гілки (відновлення електричної міцності). Заряд, який був перенесений, починає поступово перерозподілятися згідно з провідністю гілки. Зміна розподілу заряду суттєво перекидає картину електричного поля біля гілки, в якій відбувся розряд.

В розробленій моделі ЧР моделювався миттєвим перерозпо-

ділом заряду в гілці дендрита. Вважалось, що час, за який відбувається, ЧР значно менший часу між окремими розрядами.

Гілка дендрита, в якій відбувається ЧР, та високовольтний електрод складаються з  $N$  вузлів просторової сітки з відомими потенціалами. Вони розглядались як  $N$  ділянок прямолінійного провідника. Після пробую умова екіпотенціальності гілки дендрита та високовольтного електроду буде мати вигляд:

$$\varphi_{i,j,k}^P = \sum_{m=1}^N \varphi_m + \varphi_{i,j,k}^{BE} \quad (7)$$

де  $\varphi_{i,j,k}^P$  - значення потенціалу вузла гілки чи електроду;

$\varphi_m$  - потенціал, що утвориться  $k$ -тою ділянкою гілки дендрита чи електроду;

$\varphi_{i,j,k}^{BE}$  - потенціал електричного поля в  $i,j,k$ -тому вузлі до пробую.

Записуючи рівняння (7) для кожного вузла пробитої гілки дендрита та високовольтного електроду, маємо СЛАР для знаходження змін зарядів гілки дендрита після ЧР:

$$\begin{aligned} \varphi_{i,j,k}^1 &= \sum_{m=1}^N \alpha_m^1 \Delta Q_m + \varphi_{i,j,k}^{BE1} \\ \varphi_{i,j,k}^2 &= \sum_{m=1}^N \alpha_m^2 \Delta Q_m + \varphi_{i,j,k}^{BE2} \end{aligned} \quad (8)$$

.....

$$\varphi_{i,j,k}^1 = \sum_{m=1}^N \alpha_m^1 \Delta Q_m + \varphi_{i,j,k}^{BE1}$$

.....

$$\varphi_{i,j,k}^N = \sum_{m=1}^N \alpha_m^N \Delta Q_m + \varphi_{i,j,k}^{BEN}$$

де  $\alpha_m^1$  - коефіцієнти.

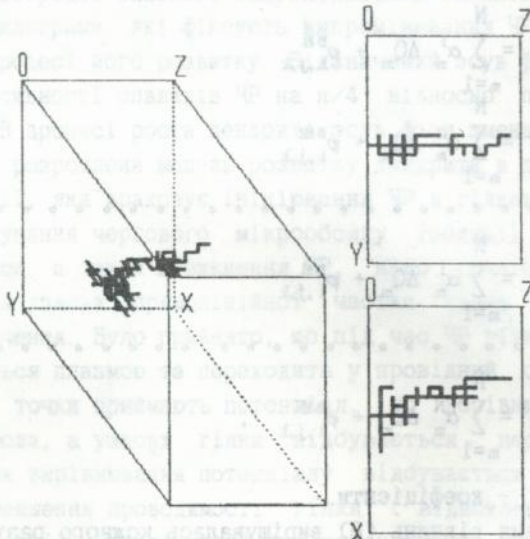
Система рівнянь (8) вирішувалась кожного разу, коли відбувався ЧР у гілці (коли гілка заповнювалась плазмой), після чого виконувався перерозрахунок потенціалу електричного поля в усій області.

Описана розроблена експериментальна методика визначення електричної міцності мікроканалів в ПЕ ( до діаметра 10 мкм).

Отримана експериментальна залежність електричної міцності мікроканалів в ПЕ від діаметра каналу. Ця залежність використана в комп'ютерній моделі розвитку дендритів.

Проведено чисельне моделювання процесу розвитку дендрита в поліетиленовій ізоляції з урахуванням процесу ЧР у гілках дендрита і зміни діаметру каналів гілок при наявності в них ЧР. Виконано порівняння отриманих результатів моделювання з результатами експериментальних досліджень динаміки розвитку дендритів. Відзначено співпадіння математичного очікування коефіцієнту заповнення обсягу  $k_v$  у межах 20%, відносної довжини гілки  $l_{від}$  у межах 15%, відносного радіусу  $r_{від}$  у межах 20%. Відзначені характерні особливості зміни форми дендритів в залежності від напруженності електричного поля. Вигляд змодельованого дендрита при вихідній напруженності електричного поля біля виступу  $E_{max} = 280$  кВ/мм наведено на мал. 1.

Вигляд змодельованого дендрита



Мал. 1.

Отримані розрахункові гістограми ЧР у гілках дендрита при моделюванні процесу його розвитку в поліетиленовій ізоляції. Відзначено, що при врахуванні в комп'ютерній моделі ЧР,

максимум розрахункових гістограм фазового розподілу ЧР практично співпадає з максимумом інтенсивності ЧР під час експериментальної реєстрації власного випромінювання ЧР в каналах дендрита.

Отримані розрахункові значення ймовірності часу пробоя ізоляційного проміжку у разі розвитку в ньому дендрита. Проведений порівняльний аналіз розрахункової залежності часу життя від середньої напруженості електричного поля в ізоляційному проміжку з відомими літературними даними показав їх розбіжність у межах 20% при  $E_{cp} = 20$  кВ/мм і 50% при  $E_{cp} = 5$  кВ/мм.

## ОСНОВНІ РЕЗУЛЬТАТИ РОБОТИ

1. Побудована математична модель розвитку дендрита в поліетиленовій ізоляції, яка враховує виникнення в гілках дендрита ЧР, зміну діаметру каналів дендрита в процесі його росту, ймовірний характер руйнування ізоляції в сильному електричному полі, трьохвимірність структури каналів дендрита, які утворюються в поліетилені, провідність каналів гілок. Ця модель дозволяє прогнозувати час виникнення і розвитку дендрита в реальних ізоляційних конструкціях. Проведено моделювання розвитку дендритів в поліетиленовій ізоляції і показано, що головним чинником процесу є наявність ЧР в гілках дендрита.

2. Розроблено автоматизований експериментальний стенд, який дозволяє виконувати ресурсні випробування мікрообсягів (до  $10^{-12}$  м<sup>3</sup>) кабельного поліетилену. Отримано параметри статистичних розподілів, які характеризують час життя мікрообсягів поліетиленової ізоляції у разі прикладення до них змінного електричного поля промислової частоти напруженістю 100... 250 кВ/мм. Створено методику експериментального визначення електричної міцності мікроканалів в поліетилені ( для каналів діаметром до 10 мкм ). Отримано експериментальну залежність електричної міцності мікроканалів в поліетилені від діаметру каналу.

3. Розроблено експериментальний стенд для реєстрації власного випромінювання ЧР в каналах дендрита. Отримано осцилограми, які фіксують випромінювання ЧР в гілках дендрита в процесі його розвитку. Виявлено зсув фази максимуму інтенсив-

ності спалахів випромінювання ЧР відносно фази напруги, що прикладається.

4. Здійснено порівняння отриманих розрахункових залежностей ймовірності часу розвитку дендрита від середньої напруженості електричного поля в ізоляційному проміжку з відомими літературними даними. Відзначено, що вони узгоджуються в межах 20% при  $E_{\text{ср}} = 20$  кВ/мм и 50% при  $E_{\text{ср}} = 5$  кВ/мм. Отримано співпадіння в межах 10% максимуму розрахункових гістограм ЧР в гілках модельованого дендрита з максимумом інтенсивності спалахів випромінювання ЧР в експериментально отриманих осцилограмах власного випромінювання дендрита.

Основні результати дисертаційної роботи наведені у наступних друкованих працях

1. 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. С. 243.
2. 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. С. 229.
3. Долбин А. В., Гадаскин С. Г. Компьютерное управление процессом ресурсных испытаний комбинированной высоковольтной изоляции // в кн. тез. докл. международной научно-технической конференции "Компьютер: наука, техника, технология, образование, здоровье". Харьков-Мишкольц, 1994. С. 146.
4. Долбин А. В., Исакова А. В., Резинкина М. М. Использование компьютерного моделирования процессов электрического старения изоляции в курсе "Электрофизические основы специальности" // в кн. тез. докл. международной научно-технической конференции "Компьютер: наука, техника, технология, образование, здоровье". Харьков-Мишкольц, 1994. С. 151.
5. Резинкин О. Л., Резинкина М. М., Долбин А. В. Исследование фрактальных характеристик дендритов в полиэтиленовой изоляции // Письма в журнал технической физики, т. 20, вып. 17, 1994. С. 24.
6. Долбин А. В., Максимов А. М., Резинкин О. Л., Резинкина М. М.

Получение кривых жизни микрообъемов кабельного полиэтилена // в кн. тез. докл. VII-научной школы "Физика импульсных разрядов в конденсированных средах". Николаев, 1995. С.205.

7. Долбин А.В. Компьютерная обработка статистических данных испытаний комбинированной высоковольтной изоляции // в кн. тез. докл. международной научно-технической конференции "Компьютер: наука, техника, технология, образование, здоровье". Харьков-Мишкольц, 1995. С.197.

8. Конотоп В.В., Резинкин О.Л., Резинкина М.М., Долбин А.В. Экспериментальные исследования ресурсных характеристик микрообъемов твердой изоляции // Приборы и техника эксперимента, N 4, 1995. С. 191.

9. Rezinkin O.L., Rezinkina M.M. and Dolbin A.V. The Experimental Investigation of Fractal Characteristics of Dendrites Changing in Time Domain during the Electrical Aging of Polyethylene // In the book "1995 Int. Symp. on Electrical Insulating Materials". Tokyo, 1995, G7, p. 161.

10. Долбин А.В., Александров А.В. Компьютерное моделирование процессов старения полиэтиленовой изоляции в сильных резко неоднородных полях // в кн. тез. докл. международной научно-технической конференции "Компьютер: наука, техника, технология, образование, здоровье". Харьков-Мишкольц, 1996. С.134.

11. Долбин А.В. Автоматизация процесса высоковольтных испытаний микрообъемов кабельного полиэтилена // в кн. тез. докл. международной научно-технической конференции "Компьютер: наука, техника, технология, образование, здоровье". Харьков-Мишкольц, 1996. С.137.

Особистий внесок дисертанта у роботи, які опубліковані у співавторстві, полягає у розробці математичної моделі розвитку дендрита в поліетиленовій ізоляції, експериментальному дослідженні динаміки розвитку дендритів, розробці конструкцій експериментальних стендів, проведенні експериментів.

Dolbin A. V. THE STUDY AND COMPUTER SIMULATION OF PROCESSES  
IN SOLID INSULATION HOLLOW IN ELECTRICAL POWER FIELD

A thesis submitted for a candidate of sciences degree on the speciality 05.09.13 - technics of the strong electrical and magnetic fields.

Kharkov State Polytechnical University, Kharkov, Ukraine, 1996

Presented are 11 scientific works, which comprise theoretical and experimental examination of growth process of branching hollows (dendrits) in solid dielectric being under influence of strong electric field, are presented. The mathematical simulation allowing to predict the probability of origin and following growth dynamics of dendrit in polyethylene insulation, have been created. At have been made the comparison of know results with obtained numerical results of probability dendrit's growth time depends on average electric field intensity in insulating region. At should be noted that the discrepancy of known and obtained results doesn't exceed 20% and 35% with  $E_{md} = 20$  kV/mm and 5 kV/mm respectively.

Долбин А. В. Исследование и компьютерное моделирование процессов в полостях твердого диэлектрика в сильных электрических полях.

Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 05.09.13 - техника сильных электрических и магнитных полей. Харьковский гос. политехн. ун-т, Харьков, 1996.

Защищается 11 научных работ, которые содержат теоретические и экспериментальные исследования процессов развития в твердом диэлектрике при воздействии сильного электрического поля разветвленных полостей (дендритов). Построена математическая модель, позволяющая прогнозировать вероятность зарождения и динамику последующего развития дендрита в полиэтиленовой изоляции. Произведено сравнение полученных расчетных зависимостей вероятности времени развития дендрита от средней напряженности электрического поля в изоляционном промежутке с экспериментальными и известными литературными данными. Отмечено, что их расхождение не превышает 20% при  $E_{cp} = 20$  кВ/мм и 50% при  $E_{cp} = 5$  кВ/мм.

Ключові слова:

Стариння ізоляції, електричне поле, часткові розряди, дендрит.





Подп. к печ. 31.10.96 Формат 60x84  $\frac{1}{16}$ . Бумага тип. Печать офсетная. Усл.печ. л.1,0  
Уч.-изд. л.1,0 Тираж 100 экз. Зак. №5609 Бесплатно

---

Фирма «КОЛОРИТ»  
г. Харьков, ул. 23 Августа, 56  
Тел. (0572) 33-13-39, Факс. (0572) 33-40-44

12 4000

AB 36.088