

НАЦІОНАЛЬНА АКАДЕМІЯ НАУК УКРАЇНИ
ІНСТИТУТ ЕЛЕКТРОДИНАМІКИ

Резинкіна Марина Михайлівна

УДК 621.3.01:537.212.001.2

**РОЗРАХУНОК ТРИВИМІРНИХ ЕЛЕКТРИЧНИХ ПОЛІВ
В НЕОДНОРІДНИХ СЕРЕДОВИЩАХ МЕТОДОМ СКІНЧЕННИХ ОБ'ЄМІВ**

Спеціальність 05.09.05 – теоретична електротехніка

Автореферат
дисертації на здобуття наукового ступеня
доктора технічних наук

Київ – 2005

Дисертацією є рукопис.

Робота виконана у Науково-дослідному та проектно-конструкторському інституті “Молнія” Національного технічного університету “Харківський політехнічний інститут” Міністерства освіти і науки України (м. Харків).

Науковий консультант - доктор технічних наук, професор, член-кореспондент НАН України **Щерба Анатолій Андрійович**, Інститут електродинаміки НАН України, завідувач відділу електроживлення технологічних систем.

Офіційні опоненти: - доктор технічних наук, професор, член-кореспондент НАН України **Резцов Віктор Федорович**, Інститут відновлюваної енергетики НАН України, заступник директора з наукової роботи;

- доктор технічних наук **Ращепкін Анатолій Павлович**, Інститут електродинаміки НАН України, завідувач відділу електромагнітних систем;

- доктор технічних наук, професор, **Рудаков Валерій Васильович**, Національний технічний університет “Харківський політехнічний інститут” Міністерства освіти і науки України, завідувач кафедри інженерної електрофізики.

Провідна установа - Інститут електрозварювання ім. Є.О.Патона НАН України (відділ електротермії), м.Київ.

Захист відбудеться “ 01 ” листопада 2005 р. о 14⁰⁰ годині на засіданні спеціалізованої вченої ради Д 26.187.01 в Інституті електродинаміки НАН України за адресою: 03680, м. Київ-57, проспект Перемоги, 56. Тел. 456-91-15.

З дисертацією можна ознайомитися в бібліотеці Інституту електродинаміки НАН України за вищевказаною адресою.

Автореферат розіслано “ 23 ” вересня 2005 р.

Вчений секретар
спеціалізованої вченої ради

Ю.М. Гориславець

ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

Вступ. Сучасний розвиток електроенергетичного, електронного і комунікаційного обладнання ускладнює проблему розрахунку електричних полів (ЕП), виникаючих в навколишньому середовищі. Виникнення силових збурень різної частоти при одночасній мініатюризації електронних пристроїв викликають необхідність розробки нових методів для аналізу усе більш тонких механізмів впливу неоднорідних ЕП на різні об'єкти в навколишньому середовищі. На практиці дуже складно вимірювати аварійні параметри електромагнітних полів всередині різних технічних пристроїв і живих організмів. Для вирішення таких проблем необхідно розв'язувати тривимірні задачі аналізу електричних полів в неоднорідних середовищах із включеннями складних просторових конфігурацій, форма та параметри яких можуть змінюватись у часі. Для значної частини електромагнітних збурень зі складовим частотами до 100 кГц задачу розрахунку таких електричних полів можна розглядати у квазістаціонарному наближенні.

В дослідженнях електромагнітних полів і електрофізичних процесів у неоднорідних середовищах отримали значні результати такі відомі вчені, як І.Є.Тамм, О.О.Самарський, Г.С.Кучинський, О.В.Тозоні, Г.Кнопфель, А.К.Шидловський, В.Ф.Резцов, А.А.Щерба, О.Д.Подольцев, Ю.М.Васецький, Ю.М.Гориславец, В.О.Бржезицький, І.В.Пентегов, А.П.Ращепкін, В.В.Конотоп, В.І.Кравченко, В.М.Михайлов, В.В.Рудаков, О.І.Вовченко, М.І.Баранов, В.П.Ларіонов, Д.В.Разевіг, Є.С.Колечицький, О.Я.Рябкова, P.Dimbylow, L.Dissado, E.Gulski, A.Krivda, G.C.Montanari, P.Morshuis, R.Patsch, L.Pietronero, A.Taflove та ін.

Актуальність теми. Неоднорідні електричні поля можуть викликати змінення параметрів середовища і включень в просторі і часі. Розв'язання тривимірних польових задач аналітичними методами можливе тільки для деяких спрощених випадків. Використання методу інтегральних рівнянь для розрахунку електричних полів у неоднорідних середовищах з багатьма границями розділу є складним, оскільки кількість невідомих (зарядів на поверхнях розподілу середовищ) є надзвичайно великою. Варто враховувати також, що при зміні границь розділу середовищ коефіцієнти і порядок розв'язуваної системи рівнянь будуть змінюватись.

Для вирішення тривимірних польових задач у гетерогенних середовищах використовуються чисельні скінченно-різницеві методи (скінченних різниць, елементів та об'ємів) із застосуванням сучасних засобів обчислювальної техніки. Слід зазначити, що при використанні чисельного методу скінченних елементів треба враховувати, що конфігурація розрахункової сітки буде залежати від розташування включень у середовищі, а зміна конфігурації границь розподілу пов'язана з необхідністю генерування нової просторової сітки. Для тривимірних задач генерування таких сіток і розрахунок полів є досить складною проблемою, яка не має узагальнюючих рішень. Для дослідження розподілу електричного поля в середовищах із значною кількістю змінюваних у часі

складних просторових включень неможливо також використати існуючі стандартні пакети прикладних програм (ANSYS, FEMLAB, Microwave Studio, OPERA та ін.).

При вирішенні більшості польових задач чисельними методами використовують сумісне проведення розрахунків електричних полів в усій області. Але наявність в середовищі неоднорідних зон (наприклад, струмопровідних включень) викликає істотні труднощі внаслідок суттєвого змінення електричних параметрів. Матриця системи рівнянь, що описує електромагнітні процеси, стає погано зумовленою, а отримане рішення - нестійким. Іншим підходом є розглядання лише внутрішньої задачі, коли джерела поля задаються у вигляді граничних умов. Однак при наявності в середовищі включень складних просторових конфігурацій розрахунок електричного поля необхідно провадити також і у навколишньому середовищі, оскільки вони змінюють розподіл і зовнішнього поля. Тому доцільним є розрахунок електричного поля в зовнішньому середовищі - для визначення умов на границях слабопровідних включень, а потім знаходження поля всередині включень.

Для дослідження впливу сильних електричних полів на технічні і біологічні об'єкти необхідно вирішити науково-прикладну проблему розвинення теорії розрахунку тривимірних електричних полів в діелектричних і слабопровідних середовищах із включеннями складної просторової конфігурації. Беручи до уваги істотну просторову неоднорідність електричних параметрів середовищ і можливе їх змінення у часі, найбільш ефективним для вирішення такої проблеми є використання методу скінченних об'ємів, в якому граничні умови та зміна параметрів враховуються в кожному з мікрооб'ємів і в усій розрахунковій області. Тому тема дисертації, яка присвячена розрахунку тривимірних електричних полів в неоднорідних середовищах методом скінченних об'ємів є актуальною.

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами. Робота виконана відповідно до планів науково-дослідних робіт Науково-дослідного і проектно-конструкторського інституту "Молнія" Національного Технічного Університету "ХПІ": в рамках фундаментальних НДР: "Дослідження електрофізичних процесів в комбінованій ізоляції для забезпечення можливості прогнозування ресурсу і надійності високовольтної ізоляції без проведення натурних випробувань" (шифр СО-НИПКИ-01-УО), "Визначення фундаментальних закономірностей впливу штучного іонізуючого потоку на розвиток каналу блискавки" (ДР №0198U000383) і НДР МОН і МОЗ України (ДР: №0194U044070, №0198U001798, №0105U001981, № 0105U001982). У НДР СО-НИПКИ-01-УО дисертант виконала чисельний розрахунок тривимірного електричного поля в неоднорідному середовищі з включеннями складної та змінної у часі форми. В НДР №0198U000383 автор розрахувала неоднорідне електричне поле біля лідерного каналу блискавки і блискавковідводів. У НДР (ДР: №0194U044070, №0198U001798, №0105U001981, №0105U001982)

автор розрахувала тривимірне ЕП навколо й усередині неоднорідних включень складної просторової форми, на поверхні та всередині тіла людини.

Мета і задачі дослідження. Метою роботи є розвиток теорії електричних полів в частині розробки методу скінченних об'ємів, наукових підходів і математичних моделей для чисельного розрахунку тривимірних квазістаціонарних електричних полів у діелектричних і слабопровідних середовищах із включеннями, що мають складну конфігурацію, яка може змінюватися у часі.

Для досягнення поставленої мети необхідно було вирішити такі задачі:

1. Провести аналіз відомих методів розрахунку електричних полів і обґрунтувати доцільність розробки методу скінченних об'ємів для чисельного розрахунку тривимірних електричних полів у середовищах із включеннями, що мають складну конфігурацію, яка може змінюватися у часі.

2. Розвинути метод скінченних об'ємів і метод поглинаючих граничних шарів для чисельного розрахунку тривимірних електричних полів у неоднорідних середовищах з відкритими областями, зокрема розробити підходи та створити різницеву схему для розв'язання систем тривимірних еліптичних рівнянь.

3. Створити методику чисельного розрахунку електричних потенціалів і напруженостей у розгалужених провідних включеннях (типу систем заземлення електроенергетичних об'єктів) для визначення параметрів електричних процесів в аварійних режимах при коротких замиканнях і впливах блискавки.

4. Розвинути метод скінченних об'ємів і програмні засоби для розрахунку електричного поля поблизу тонких провідних включень, просторова конфігурація яких змінюється у часі, і створити методику статистичного моделювання процесів електричного пробою високовольтних твердих полімерних діелектриків.

5. На основі методу скінченних об'ємів та методу поглинаючих граничних шарів розробити метод для чисельного розрахунку електричного поля зовні й всередині такого неоднорідного включення, яким з електричної точки зору є тіло людини.

6. За допомогою розроблених підходів, моделей і методик визначити конструкції електромагнітних пристроїв та режими роботи, при яких задовольняються вимоги електромагнітної стійкості електроенергетичних об'єктів та екологічної безпеки для людей.

Об'єкт дослідження - тривимірні електричні поля в неоднорідних середовищах з межами, що можуть змінюватися.

Предмет дослідження - об'ємний розподіл параметрів електричних полів у неоднорідних діелектричних середовищах з гетерогенними включеннями складної конфігурації.

Методи дослідження базуються на наукових положеннях теорії електромагнітного поля, теоретичної електротехніки і математичної фізики. При побудові моделей для розрахунків

електричних полів використовувалися чисельні методи скінченних об'ємів, інтегральних рівнянь, еквівалентних зарядів. Для вивчення стохастичних процесів електричного старіння твердої полімерної ізоляції під дією високої напруги використовувалася теорія фракталів. Результати експериментальних досліджень процесу електричного старіння поліетиленової ізоляції апроксимувалися поліномами і класифікувалися за допомогою методу відбитків.

Наукова новизна одержаних результатів.

1. Розвинено метод скінченних об'ємів і розроблено нові математичні моделі для чисельного розрахунку тривимірних квазістаціонарних електричних полів в діелектричних і слабкопровідних середовищах з гетерогенними включеннями складної просторової конфігурації, яка може змінюватися у часі.

2. Розроблено нову наукову концепцію чисельного розрахунку електричних полів у неоднорідних середовищах, яка базується на ітераційному визначенні розподілу поля біля провідних включень у припущенні, що вони є ідеальними провідниками, та подальшим розрахунком поля всередині включень у припущенні, що зовнішнє середовище є ідеальним діелектриком, а також на використанні нової різницевої схеми для розв'язання систем тривимірних еліптичних рівнянь.

3. Розвинено метод поглинаючих граничних шарів для вирішення задач впливу однорідного електричного поля на гетерогенні включення, розташовані в середовищах з відкритими межами.

4. Вперше отримано аналітичні вирази для параметрів, які характеризують анізотропні властивості середовищ біля розгалужених тонких провідних каналів, що забезпечує проведення розрахунків електричних полів методом скінченних об'ємів з кроком розрахункової сітки на кілька порядків більшим, ніж діаметр каналів.

5. Для аналізу тривимірних електричних полів при протіканні електричного струму через провідні включення з урахуванням нелінійних змін параметрів зовнішнього середовища розроблено і чисельно реалізовано новий метод, в якому використовуються ітераційні розрахунки електричних полів і перехідних процесів в нелінійних електричних колах з урахуванням змінення електричного опору середовищ розтіканню струму.

6. З використанням теорії фракталів та даних про електричне старіння полімерів розроблено нові метод і статистична модель для розрахунку електричного поля в твердих полімерних середовищах біля тонких провідних розгалужених каналів (дендритів), конфігурація яких може стохастично змінюватись у часі.

7. На базі запропонованої концепції розрахунку електричних полів у неоднорідних середовищах розроблено новий метод і програма чисельного розрахунку розподілу напруженості електричного поля навколо й усередині неоднорідного включення, яким з електричної точки зору є тіло людини, з урахуванням його реальної геометричної конфігурації та електричних параметрів.

Практичне значення одержаних результатів.

1. Розроблено методику і програмні засоби для чисельного розрахунку параметрів електричних процесів у системах заземлення енергетичних об'єктів в аварійних режимах і аналізу потенціалів, опорів розтіканню струму, напруг дотику і крокових напруг на їх територіях, що дозволяє визначати зони, в яких небезпечні фактори можуть перевищувати допустимі рівні, і розробити заходи щодо модернізації таких систем.

Результати впроваджено у Науково-дослідному та проектно-конструкторсько-му інституті (НДПКІ) "Молнія" Національного технічного університету (НТУ) "Харківський політехнічний інститут" ("ХПІ") при визначенні надійності систем захисного заземлення електроенергетичних об'єктів Міненерго України.

2. Створено методику чисельного розрахунку тривимірних електричних полів у системах екранування складних просторових конфігурацій, які забезпечують мінімальне проникнення в них електричного поля та відсутність корони.

Результати впроваджено в Інституті фізики плазми ННЦ Харківського фізико-технічного інституту (ХФТІ) НАН України при розробці системи протикоронних екранів електростатичного прискорювача іонів, який експлуатується у м. Мадрид (Іспанія), та у НДПКІ "Молнія" НТУ "ХПІ" в розрахунках властивостей металевих корпусів, що екранують зовнішнє електричне поле. За методикою розраховано розподіл полів усередині корпусів під дією зовнішнього електричного поля напруженістю до 5 кВ/м. Отримані результати дозволили провести оцінку відповідності виробів вимогам п.5.4 НПЗ06.5.02/3.035-2000 "Вимоги з ядерної та радіаційної безпеки до інформаційних і керуючих систем, що важливі для безпеки атомних станцій".

3. Розроблено методику для визначення фрактальної розмірності і стадії росту системи тонких розгалужених каналів (дендритів) у поліетиленовій ізоляції у сильних електричних полях по вимірним розподілам частоти фаз появи часткових розрядів, що дозволяє встановлювати залежності між конфігурацією дендритів та ймовірністю пробоя ізоляції.

4. Розроблено програму та виконані чисельні розрахунки електричних полів поблизу та усередині тіла людини з урахуванням його реальної конфігурації та неоднорідних електричних параметрів, що дозволяє науково обґрунтувати небезпечні для людини рівні напруженості електричних полів та визначати зони, які можуть бути безпечними для роботи персоналу та життєдіяльності людей.

Ці матеріали дисертації використані в Харківському науково-дослідному інституті гігієни праці та професійних захворювань при розробці нормативів для рівнів електричних полів, безпечних для життєдіяльності людей.

5. Результати дисертаційної роботи використовуються також у навчальних планах підготовки бакалаврів, спеціалістів та магістрів на кафедрі теоретичної електротехніки

Національного технічного університету України “Київський політехнічний інститут” та кафедри імпульсних процесів і технологій Українського державного морського технічного університету ім. адм. О.Макарова.

Особистий внесок здобувача. Особистий внесок здобувача полягає в розробці методів розрахунку тривимірних квазістаціонарних електричних полів у неоднорідних середовищах з включеннями складної конфігурації, що можуть змінюватися у часі, заснованих на методах скінченних об'ємів та поглинаючих граничних шарів; розробці концепції розрахунку параметрів, що характеризують вплив низькочастотних електричних полів на неоднорідні діелектричні середовища з включеннями складної форми; створенні та чисельній реалізації у вигляді програм для персональних комп'ютерів розрахункових методик, що описують електричні процеси в тілі людини, системах захисного заземлення, твердої полімерної ізоляції; постановці і безпосередньої участі у проведенні експериментальних досліджень. Всі основні результати отримані автором особисто. У роботах, виконаних у співавторстві, автором розроблено методику розрахунку електричного поля у неоднорідних середовищах з включеннями [13,19,24,33,35], запропоновано метод поглинаючих шарів стосовно до впливу однорідних ЕП [12], розроблено і використано метод чисельного розрахунку розподілу напруженості ЕП поблизу та усередині тіла людини [28,30,31,38], виконано постановку експериментальних досліджень процесів електричного старіння твердої полімерної ізоляції під дією високої напруги й аналіз отриманих результатів [14,17,18,22,26,27,29,36,37], виконано і реалізовано постановку задачі розрахунку ЕП у системах заземлення високовольтних підстанцій [15,20], а також інших засобах захисту від дії сильних електричних полів [16,21,23,25].

Апробація. Основні положення і результати дисертаційної роботи доповідалися і обговорювалися на таких конференціях та симпозіумах: міжнародна конференція з математичних методів у теорії електромагнетизму (м. Харків, 1994 р.); III міжнародний симпозіум з електромагнітної сумісності EMC-97 (м. С-Петербург, 1997 р.); 10-й міжнародний симпозіум з високовольтної техніки (м. Монреаль, 1997 р.); міжнародна конференція з провідності і пробою твердих діелектриків (м. Вастерас, 1998 р.); 24-а міжнародна конференція з молнієзахисту (м. Бірмінгем, 1998 р.); міжнародний симпозіум з електроізоляційних матеріалів (м. Токохаши, 1998 р.); міжнародна конференція "Електромагнітні поля і здоров'я людини", (м. Москва, 1999 р.); 11-й міжнародний симпозіум з високовольтної техніки (м. Лондон, 1999 р.); VI міжнародна конференція "Проблеми сучасної електротехніки-2000" (м. Київ, 2000 р.); 9-а міжнародна конференція "Фізика діелектриків", (м. Миколаїв, 2000 р.); 7-а міжнародна конференція з твердих діелектриків (м. Ейндховен, 2001 р.); 12-й міжнародний симпозіум з високовольтної техніки (м. Бангалор, 2001 р.); VIII міжнародна конференція "Проблеми сучасної електротехніки-2004" (м. Київ, 2004 р.); 8-а науково-технічна конференція "Електромагнітна сумісність технічних засобів і

електромагнітна безпека" (м. С-Петербург, 2004 р.); 5-а міжнародна конференція з електромагнітних розрахунків (м. Стратфорд-на-Евоні, 2004 р.), 8-а міжнародна конференція з твердих діелектриків (м. Тулуза, 2004 р.); 3-а міжнародна конференція з біологічних ефектів електромагнітних полів (м. Кос, 2004 р.) та інших.

Публікації. За матеріалами дисертаційної роботи опубліковані 75 наукових праць, у тому числі 38 статей (з них 35 - у фахових спеціальних журналах і збірниках) та 37 тез доповідей на науково-технічних конференціях і симпозіумах.

Структура та обсяг роботи. Дисертація складається з переліку умовних скорочень, вступу, 6 розділів, висновків, списку літератури з 294 найменувань та 2-х додатків. Загальний обсяг роботи становить 416 сторінок, у тому числі 309 сторінок основного тексту, 134 рисунки і 28 таблиць.

ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ

У **вступі** обґрунтовано актуальність теми, сформульовані мета і задачі досліджень, а також наукова новизна та практична цінність роботи, приведені дані про ефективність і впровадження її результатів.

Перший розділ присвячено аналізу літературних даних, що стосуються методів розрахунку електричних полів в неоднорідних середовищах з включеннями.

Проведено аналіз ряду типових задач, для яких існують аналітичні рішення розрахунку електричного поля в діелектричних середовищах із включеннями простих просторових конфігурацій. Приведено також приклади використання чисельних методів для розрахунку квазістаціонарних електричних полів у діелектричних і слабкопровідних середовищах, зокрема таких, як методи еквівалентних зарядів, інтегральних рівнянь, скінченних різниць, елементів та об'ємів.

Показано, що при змінненні у часі конфігурації та електричних параметрів включень, використання методів інтегральних рівнянь і скінченних елементів призводить до невиправданого ускладнення задачі і робить неможливим її вирішення на сучасних обчислювальних засобах. Обґрунтовано, що більш придатним до розрахунку електромагнітних полів у неоднорідних середовищах з границями, що змінюються, є метод скінченних різниць. Однак для використання цього методу при розрахунку електромагнітних полів у неоднорідних середовищах необхідно було визначити додаткові рівняння, які дозволяють зв'язувати значення шуканої функції на межах розділу середовищ.

Крім того, що поява нових границь викликає необхідність визначення і розв'язання нових рівнянь, існує небезпека, що для неоднорідного середовища різницева схема може виявитися

розбіжною, як це було показано О.О.Самарським. Тому у випадку розривних коефіцієнтів рекомендується використовувати консервативні схеми, одержувані за допомогою інтегро-інтерполяційного методу або методу балансу. В даному випадку доцільним є використання методу скінченних об'ємів, який дозволяє одержати консервативні різницеві схеми на основі інтегрування рівнянь Максвелла по об'єму кожного елементарного осередку. Одною з важливих властивостей даного методу є те, що в ньому закладено закон збереження, у нашому випадку кількості електрики, на будь-якій групі кінцевих об'ємів i , отже, у всій розрахунковій області.

У другому розділі описано методики розрахунку розподілу напруженості низькочастотних тривимірних електричних полів частотою до 10^5 Гц у неоднорідних діелектричних або слабкопровідних середовищах з питомою провідністю (γ), яка не перевищує одиниць См/м, які можуть містити провідні включення змінної форми з $\gamma \sim 10^5 - 10^8$ См/м. Було проаналізовано наявність в розрахунковій області декількох середовищ з різними значеннями діелектричної проникності і питомою провідності, які можуть змінюватися у просторі і часі. На досліджувану область нанесена прямокутна розрахункова сітка, вузли якої розташовані на граничних поверхнях розділу середовищ. Вважалося, що в межах кожного з утворених сіткою елементарних паралелепіпедів електричні параметри середовища однорідні. Для розрахунку був використаний метод скінченних об'ємів (МСО), суть якого полягає в інтегруванні рівнянь Максвелла по об'єму кожного елементарного паралелепіпеда, на які розбита розрахункова область. Запишемо рівняння Максвелла:

де

Оскільки довжина хвилі падаючого електричного поля набагато перевищує характерні розміри розглянутих об'єктів, провідності середовищ не перевищують одиниць См/м, а частота поля менша за 100 кГц, розглядаються квазістаціонарні електричні поля, і вплив зміни індукції магнітного поля на величину напруженості електричного поля можна не враховувати. Таким чином, у розглянутому класі задач виконується умова:

де

Для розглянутого випадку розрахунку квазістаціонарних електричних полів використовуване рівняння Максвелла має вигляд:

Була взята дивергенція від обох частин даного рівняння, яке потім було проінтегровано по V - об'єму елементарного паралелепіпеду, на які була розбита розрахункова область:

У результаті використання теореми Остроградського-Гауса й інтегрування отриманого рівняння за часом, при нульових початкових умовах одержимо основне розрахункове рівняння, записане для моменту часу t_m , у вигляді:

(1)

де

Оскільки при розрахунках можуть бути враховані лише вектори електричної напруженості електромагнітного поля, була використана підстановка $\vec{E} = -\text{grad}\varphi$, а доданком $-\partial \vec{A} / \partial t$ було знехтуване. Після заміни інтегрування за часом підсумовуванням за допомогою формули трапецій і переносу доданків, що відповідають попереднім часовим крокам, до відомих, рівняння (1) було записане для (i,j,k) -ого вузла розрахункової сітки в різницевому вигляді через скалярний електричний потенціал φ :

(2)

де

Початкові і граничні умови при розрахунку залежали від виду досліджуваної системи. Так, для розрахункової системи, що представляє собою шаровану ізоляцію з включеннями, розташовану

між нескінченними плоскими обкладинками з прикладеною до них різницею потенціалів, початкові умови - нульові, а граничні - $\epsilon r_1 = U_0$, $\epsilon r_2 = 0$ - на обкладинках, та граничні умови II-ого роду: $\partial\phi/\partial n = 0$ на інших граничних площинах.

Для розв'язання методом скінченних об'ємів на кожному часовому кроці системи рівнянь виду (2), записаних для кожного вузла розрахункової сітки, був застосований метод прогонки та ітераційний метод змінних напрямків. Як відомо, даний метод використовується для рішення систем двовимірних еліптичних, а також тривимірних параболічних рівнянь. Нами розроблена нова різницева схема, за допомогою якої реалізується чисельне рішення системи тривимірних еліптичних рівнянь. Різницева схема була записана так, щоб другі похідні, що вважаються для поточної прогонки відомими, завжди розраховувалися за значеннями змінної, отриманими при прогонці по напрямку, що відповідає саме цій похідній:

де

Така модифікована різницева схема рішення систем тривимірних еліптичних рівнянь дозволила отримати рішення при істотно меншій кількості ітерацій. Дана різницева схема є тришаровою, тому що при розрахунку чергового l -ого наближення шуканої функції використовуються значення потенціалу на двох попередніх ітераціях, і такою, що сходиться, оскільки виконуються умови стійкості тришарових схем. Відома схема для рішення систем тривимірних параболічних рівнянь, будучи двошаровою, не є безумовно стійкою, а отже у ряді випадків (наприклад, при наявності розривних коефіцієнтів) не забезпечує збіжності ітераційного процесу знаходження рішення. За допомогою розробленої програми для персонального комп'ютера, заснованої на використанні даної різницевої схеми, були проведені розрахунки розподілів електричних полів у полеутворюючих системах різних просторових конфігурацій, що містять неоднорідні діелектричні та слабкопровідні середовища. Ці розрахунки показали добру збіжність розробленої різницевої схеми.

При розрахунку проникнення квазістаціонарного ЕП у слабкопровідне включення задача була розділена на дві частини. Оскільки питома провідність включення перевершує щеде діелектрика на 5 і більше порядків, при рішенні зовнішньої задачі слабкопровідне включення

вважається ідеальним провідником, що передбачає неврахування падіння в ньому напруги, а також його однорідні електричні параметри. При рішенні внутрішньої задачі оточуючий включення діелектрик вважається ідеальним, що передбачає його однорідність, а також неврахування його провідності. Напруженість ЕП у слабопровідному включенні, розташованому в непровідному середовищі, наприклад, у повітрі, електричні параметри якого (ϵ_e і γ_e) набагато менші, ніж відповідні величини досліджуваного тіла ($\epsilon_i \sim 10-1000$ і $\gamma_i \sim 10^{-1}-10^8$ См/м), може бути розрахована на сучасних обчислювальних засобах з одинарною точністю шляхом завдання ϵ_{ec} і γ_{ec} (тут ϵ_{ec} , γ_{ec} – відносна діелектрична проникність і питома провідність зовнішнього непровідного середовища, прийняті при рішенні внутрішньої задачі) меншими ϵ_i і γ_i в k_{ie} раз ($k_{ie}=10^4-10^5$) із наступним помноженням отриманих напруженостей ЕП на $k_{ie}=\epsilon_e/\epsilon_{ec}$ або $k_{ie}=\gamma_e/\gamma_{ec}$. Як показали чисельні експерименти, відносна похибка розрахунку напруженості ЕП усередині включення криволінійної форми при цьому складає близько 1 %. Використання такого підходу обґрунтовано, наприклад, у роботах P.J.Dimbylow. Однак у відомому підході після розв'язання зовнішньої задачі розрахунок розподілу поля робиться тільки в області включення зі знайденим розподілом зарядів на його поверхні в якості граничних умов. Нами ж пропонується при рішенні внутрішньої задачі використовувати розрахункову зону у вигляді паралелепіпеда, який включає оточене ідеальним діелектриком провідне включення. Завдяки рішенню зовнішньої задачі, границі розрахункової зони можуть бути наближені практично впритул до включення. У той же час прямокутна форма розрахункової зони істотно спрощує завдання граничних умов і електричних параметрів середовищ, що дуже істотно при наявності включень досить складної форми, таких, наприклад, як тіло людини.

У ряді практично важливих випадків необхідно розраховувати розподіл електричних полів у системах, що містять тонкі і довгі провідні включення, які ми надалі для простоти будемо іменувати дротами. Така задача виникає, наприклад, при чисельних розрахунках електромагнітних процесів, що супроводжують пробій ізоляційних проміжків, таких, як удар блискавки у блискавковідвід. У даному випадку довжина як блискавковідводу, так і лідерного каналу блискавки на багато порядків перевищує їхній діаметр. Подібна задача стає також при розрахунку розподілу ЕП у системі "голка-площина", широко застосовуваної при дослідженні процесів електричного пробію, наприклад, твердих полімерних діелектриків. При цьому і голка, і система порожніх каналів що утворюється під дією сильних ЕП - дендрит, можуть розглядатися як подібні структури-дроти. Таким чином, при розрахунках електромагнітних процесів, що супроводжують пробій ізоляційних проміжків, виникає задача розрахунку розподілу електричного поля розрядних структур, які можна представити у вигляді сукупності тонких і довгих провідних дротів. При цьому, як правило, необхідно враховувати неоднорідність електричних параметрів середовища, а також їх змінність. При використанні скінченно-різницевого методу для розрахунку ЕП таких структур виникає

проблема вибору кроку розрахункової сітки D . Відомі підходи, у яких припускається, що крок просторової сітки дорівнює середньої довжині кроку зростання розрядної структури. Але для того, щоб врахувати вплив радіуса розрядної структури R_0 на розподіл ЕП, величина кроку повинна бути не меншою, ніж R_0 . Однак довжина розрядної структури на багато порядків перевищує її радіус. Використання кроку $D < R_0$ призвело б до різкого збільшення порядку розв'язуваної при розрахунку ЕП системи рівнянь і зробило б неможливою реалізацію задачі на сучасних обчислювальних засобах. Для вирішення цієї проблеми був розроблений такий метод.

Для кожного вузла розрахункової сітки записувалося наступне рівняння в комплексному вигляді:

(3)

де

(4)

Наявність тонкого дроту, а також вплив його діаметра на розподіл ЕП враховувалися шляхом завдання коефіцієнтів k_x, k_y, k_z компонент тензора $\bar{\bar{S}}$ для вузлів, що оточують дріт або розташованих на ньому, для інших вузлів - $k_x = k_y = k_z = 1$. Рівні коефіцієнтів k_x, k_y, k_z були отримані шляхом інтегрування відомої аналітичної залежності для потенціалу зарядженої нитки. Таким чином, електричні параметри середовища навколо дроту задавалися нелінійними, тим самим досягалося урахування наявності в розрахунковій області структур, поперечні розміри яких менші за розміри кроку розрахункової сітки. Проведене порівняння одержаних рішень з аналітичними показало їхній збіг для розрахункової сітки, крок якої у чотири і більше разів перевищує діаметр дроту. На відміну від відомого підходу А. Taflov, який передбачає розв'язання двомірної задачі для безмежно довгого дроту, співпадаючого з координатною віссю, нами розроблено методику розрахунку тривимірного електричного поля дроту кінцевої довжини, у тому числі розташованого під кутом до координатних осей.

Рис. 1. Розраховані розподіли ліній рівного потенціалу при напрузі $U_0=6$ кВ (а) і $U_0=10$ кВ (б)

Як приклад був виконаний розрахунок розподілу електричних потенціалів при таких умовах: ізоляційне середовище - поліетилен ($\epsilon=2,2$), прикладена напруга $U_0=6$ кВ, діаметр каналу дендрита $D_0=10$ мкм (що відповідає експериментальним даним для даної напруги), величина кроку просторової сітки при розрахунку МСО - $D=50$ мкм. Розподіли ЕП розраховані також для $U_0=10$ кВ,

$D_0=1$ мкм, $D=50$ мкм. Початкові умови - нульові, граничні: $\epsilon r_1=U_0$ на стрижневому електроді - голці і площині голкотримача, $\phi_2=0$ - на заземленій площині, $\partial\phi/\partial n = 0$ на інших граничних площинах. На рис. 1 представлені розраховані для цих випадків картини ліній рівного потенціалу $\epsilon r^*=U/U_0$ у перетині $Z=\text{const}$, що проходить через голку.

Третій розділ присвячено використанню методів скінченних об'ємів і поглинаючих граничних шарів для розрахунку тривимірних електричних полів при розташуванні досліджуваних включень у відкритих областях. Основне рівняння, що розв'язується, таке ж, як (3).

Для того щоб забезпечити можливість використання кінцево-різницевого методу для розрахунку електромагнітних полів у відкритих областях, застосовується метод поглинаючих граничних шарів. Використання цього методу дозволяє наблизити границі розрахункової області практично впритул до досліджуваних зон, істотно знизивши тим самим порядок розв'язуваної системи рівнянь і час розрахунків. При цьому задаються особливі електричні параметри середовища на границі розрахункової області в так званому "поглинаючому шарі", оточеному ззовні ідеальним провідником. Такий поглинаючий шар має анізотропні електричні параметри, задані у вигляді тензора, компонента якого в напрямку, перпендикулярному граничній площині, наприклад $X=\text{const}$, дорівнює $1/s_x$, а в інших напрямках дорівнює s_x , причому, $s_x>1$. Тоді тензор $\bar{\bar{S}}$, який входить у основне розв'язуване рівняння виду (3), має вигляд:

Припускалося, що електричні параметри поглинаючого шару товщиною d змінюються по глибині (наприклад, X) відповідно до поліноміального закону:

$$k_x(x)=1+(k_{\max}-1)\llcorner(x/d)^m,$$

де k_{\max} - максимальна величина k_x (дивись (4)) на зовнішній границі поглинаючого шару; m - показник ступеня.

Величини $k_y(y)$ і $k_z(z)$ обчислюються аналогічно:

$$k_y(y)=1+(k_{\max}-1)\llcorner(y/d)^m, \quad k_z(z)=1+(k_{\max}-1)\llcorner(z/d)^m.$$

Шляхом порівняння аналітичних рішень з результатами чисельних розрахунків при кількості кроків по простору в зоні поглинаючих шарів $N=10$, були визначені значення коефіцієнтів: $m=3$ і $k_{\max}=300$, що задовольняють вимогам розрахунків з відносною похибкою близько 1 %.

На практиці часто потрібно вирішувати задачу розрахунку ЕП, коли досліджуване включення знаходиться в зовнішньому однорідному електричному полі з заданим рівнем напруженості E_0 . На відміну від відомого застосування методу поглинаючих шарів, коли джерело поля знаходиться усередині розрахункової області, у даному випадку джерело, розташоване на великій відстані від включення, з розгляду виключається. Слабкопровідне або діелектричне

включення, що знаходиться в однорідному зовнішньому ЕП напруженістю E_0 , змінює його розподіл, і граничні умови $\partial\varphi/\partial n = -E_0$ для однієї з координат (наприклад, Y) і $\partial\varphi/\partial n = 0$ для інших напрямків (наприклад, X і Z) можуть бути задані лише на достатньому від нього віддаленні. Для наближення границь розрахункової області до включення при такому завданні ЕП, нами запропоновано використовувати поглинаючі шари, а на межах розрахункової області задавати умови: $\partial\varphi/\partial n = -k_{\max} \cdot E_0$ (замість $\partial\varphi/\partial n = -E_0$) або $\partial\varphi/\partial n = 0$ (у даному випадку $\partial\varphi/\partial y|_{y=y_{\max}} = -k_{\max} \cdot E_0$; $\partial\varphi/\partial x|_{x=x_{\min}, x=x_{\max}} = 0$; $\partial\varphi/\partial z|_{z=z_{\min}, z=z_{\max}} = 0$ - див. рис. 2).

Рис. 2. Розподіл ліній однакової напруженості електричного поля навколо тіла людини

Такий підхід дозволив досягти збігу з аналітичним рішенням для діелектричної кулі, що знаходиться в повітрі в зовнішньому однорідному електричному полі, в межах відносної похибки 1 %. Як приклад практичного використання методу поглинаючих шарів вирішена задача розрахунку електричного поля при перебуванні тіла людини в зовнішньому однорідному ЕП напруженістю $E_0=1$ кВ/м, спрямованому уздовж вертикальної осі. На рис. 2 представлені приклади застосування описаного підходу для розрахунку розподілів ліній однакової напруженості ЕП навколо тіла людини у перетинах $Z=\text{const}$ (а) і $X=\text{const}$ (б) в усій розрахунковій області (Π – зона поглинаючих шарів). На рисунках показано також граничні умови, написи на лініях рівної напруженості дані в кВ/м, відстань між лініями – 1 кВ/м. За рахунок наближення границь розрахункової області до поверхні тіла людини, порядок розв'язуваної системи рівнянь, необхідні ресурси пам'яті комп'ютера і затраченого часу вдалося істотно знизити.

Четвертий розділ присвячено застосуванню розроблених принципів розрахунку електричних полів у нелінійних діелектричних і слабопровідних середовищах з включеннями складної змінної конфігурації для дослідження розподілів електричних полів в елементах електроенергетичних об'єктів. Зокрема, прикладом області практичного використання розроблених принципів є електричні поля, що виникають у слабопровідному неоднорідному середовищі - ґрунті ($\gamma \sim 10^{-3} - 10^{-1}$ См/м), у якому розташовані провідні включення складної форми - елементи системи захисного заземлення ($\gamma \sim 10^6 - 10^8$ См/м), в аварійних режимах короткого замикання або удару блискавки. У результаті розроблені розрахункові методики, які дозволяють по заданих місцю введення і величині струму короткого замикання або блискавки описати електричні процеси, що виникають при цьому в системах заземлення енергетичних об'єктів. На території таких об'єктів, зокрема високовольтних підстанцій, використовується захисне заземлення, що складається з розташованої в землі на відстані $h=0,5-1,5$ м від її поверхні металевої сітки, розміри комірок якої

можуть складати від одиниць до декількох десятків метрів, а також вертикальних глибинних заземлювачів. Застосування захисного заземлення дозволяє вирівняти потенціали, а, значить, знизити рівні напруженості електричного поля на території об'єкта, що захищається. В аварійних ситуаціях, до числа яких відносяться коротке замикання на землю, перемикання фаз, що знаходяться під напругою, удар блискавки, на території підстанції можуть виникати потенціали, небезпечні як для обслуговуючого персоналу, так і для устаткування, особливо електронного. Для надійного захисту енергетичних об'єктів необхідно, щоб опір розтіканню систем заземлення не перевищував нормованої величини.

Для чисельного розрахунку методом скінченних об'ємів електричних процесів при протіканні по заземлювачу струму блискавки, досліджувана область ґрунту і заземлювач розбиваються на паралелепіпеди, вузли яких лежать на поверхнях розділу середовищ. У межах кожного паралелепіпеду електричні параметри середовища вважаються однорідними. Процес протікання по заземлювачу струму блискавки моделюється у такий спосіб. Амплітуду струму блискавки з визначеною імовірністю можна задати по відомих експериментальних даних. Як перше наближення при розрахунку імпульсного опору заземлювача використовується його стаціонарний опір розтіканню. По його величині, а також величині струму блискавки визначається напруга, яка прикладається до заземлювача. Потім робиться розрахунок розподілу напруженості електричного поля в досліджуваній області. При цьому заземлювач вважається ідеальним провідником. По відомих експериментальних даних про пробивні напруженості $E_{пр}$ різних ґрунтів визначаються розміри іскрової зони. При цьому ґрунт вважається ідеальним діелектриком: лише зони, що безпосередньо прилягають до заземлювача, модуль напруженості електричного поля яких $|\vec{E}|$ перевищує $E_{пр}$, вважаються такими, що перейшли в струмопровідну фазу, і їхня провідність замінюється на відповідну величину. У такий спосіб моделюється процес, який можна умовно визначити як тимчасове збільшення розмірів заземлювача на величину іскрової зони. При розрахунку ЕП навколо заземлювача він і його іскрова зона вважаються ідеальними провідниками. Для інших зон за величиною їхньої $|\vec{E}|$ визначаються нові значення питомих опорів за допомогою відомих залежностей питомого електричного опору ґрунтів від рівня напруженості електричного поля. Тим самим, шляхом ітераційних перерахунків електричного поля враховується нелінійна залежність питомого опору ґрунту від рівня напруженості прикладеного поля. Потім розраховується нове значення опору розтіканню заземлювача і знаходиться уточнене значення прикладеної до заземлювача напруги. За новим значенням напруги і новим розподілом електричних параметрів середовища в розрахунковій області визначається уточнена величина імпульсного опору заземлювача. Даний ітераційний процес продовжується доти, поки значення опору заземлювача, а також розподіл електричних параметрів середовища в розрахунковій області не перестають змінюватися у межах заданої похибки. Використання такого алгоритму дозволяє

розрахувати імпульсний опір заземлювача. За допомогою подібних розрахунків може бути оцінена також імовірність пробоя під землею між заземлювачем грозозахисту і захисним заземлювачем або кабелями, що знаходяться у землі.

При розробці методики розрахунку параметрів електричних процесів, що виникають у режимах короткого замикання у розгалужених системах захисного заземлення високовольтних підстанцій, кількість окремих елементів яких може перевищувати кілька десятків тисяч, були прийняті наступні припущення. Підземні металеві конструкції замінялися системою струмів з лінійною щільністю ϕ , розташованих на осях реальних заземлювачів. Розглянута система представлялася у вигляді сукупності відрізків окремих заземлювачів, що характеризуються власними параметрами: індуктивністю й опором, а також визначеною величиною і характером розподілу уздовж них струму. Припускалося, що в режимах короткого замикання, коли розподіл потенціалів у вузлах контуру заземлювача неоднорідний, струми розтікання відрізків заземлювача, паралельних поверхні землі, змінюються від вузла до вузла за лінійним законом. При прийнятих припущеннях для розрахунку розподілу електричного поля такої системи може бути використаний метод еквівалентних зарядів.

За рахунок того, що потенціали вузлів контуру заземлювача при короткому замиканні неоднакові, неоднорідні також струми уздовж ділянок заземлювача і відповідні струми розтікання. Оскільки струми розтікання залежать від розподілу потенціалів у вузлах схеми заземлення, а величини потенціалів самі залежать від рівнів струмів розтікання, задача вирішувалася ітераційним методом з розділенням її на дві частини: перехідні процеси в еквівалентній електричній схемі системи заземлення розраховувалися у припущенні, що ґрунт є ідеальним діелектриком, а опори розтіканню обчислювалися за розрахунковими даними розподілу ЕП системи заземлення у припущенні, що вона є ідеальним провідником. Електричні процеси розраховувалися ітераційним методом за наступним алгоритмом. Спочатку виконується розрахунок струмів у системі, що імітує захисне заземлення, за умови, що потенціали усіх вузлів однакові. Потім по відомому розподілу струмів визначаються величини опорів розтіканню окремих елементів системи заземлення. В результаті розв'язання системи рівнянь, кожне з яких є записаним для окремого вузла першим законом Кірхгофа, з урахуванням введення струму короткого замикання у деякі вузли схеми, визначаються невідомі значення потенціалів у розглянений момент часу. Потім перераховуються величини струмів і опорів розтіканню в системі при нерівномірному розподілі потенціалів у вузлах. Даний ітераційний процес продовжується доти, поки значення опорів розтіканню і потенціалів у всіх вузлах на двох сусідніх ітераціях не співпадуть з заданою похибкою.

Після закінчення ітераційного процесу, по відомих рівнях струмів розтікання розраховуються потенціали на поверхні землі і будується картина розподілу еквіпотенційних ліній (див., наприклад, рис. 3). Визначаються також величини крокових напруг U_{ST} на території

підстанції, програмно виявляються області, де U_{ST} перевищують припустимі рівні. Використання розробленої методики дало можливість виявити на території високовольтних підстанцій зони, небезпечні для обслуговуючого персоналу й устаткування, в різних аварійних режимах.

На рис. 3а приведено план підземних і наземних з'єднань досліджуваної підстанції Запорізької області України, а також розрахований розподіл еквіпотенційних ліній на поверхні землі при введенні струму короткого замикання 1 кА промислової частоти (написи на еквіпотенціальних лініях приведені у кіловольтах). Питомий опір ґрунту – 100 Ом/м. На рис. 3б представлені зони на території даної підстанції, де максимальні величини крокової напруги U_{ST} перевищують або дорівнюють критичному рівню 100 В. Порівняння розрахованого й виміряного опору розтіканню, а також напруг дотику в окремих вузлах високовольтних підстанцій у режимі короткого замикання показало їхній збіг у межах точності вимірів.

Рис. 3. Розподіл ліній однакового потенціалу (а) і ліній рівної крокової напруги $U_{ST} \geq 100$ В (б) на території високовольтної підстанції в режимі короткого замикання

Рис. 4. Розподіл потенціалів у СПЕ

Розроблені принципи розрахунку квазістаціонарних електричних полів у діелектричних середовищах з провідними включеннями знаходять також практичне застосування при оцінці ефективності засобів захисту від дії сильних ЕП: захисних та протикоронних екранів і систем захисту від блискавки. Щоб переконатися в ефективності розробленої конструкції системи протикоронних екранів (СПЕ) електростатичного прискорювача важких іонів, були виконані розрахунки розподілу електричного поля в областях з максимальними рівнями напруженості (див. рис. 4).

При розрахунках використовувалася розроблена методика, заснована на методі скінченних об'ємів. Для забезпечення ефективного функціонування даного устаткування необхідно запобігти виникненню коронного розряду з металевих елементів інжектора і трубки, які в процесі експлуатації знаходяться під позитивним потенціалом до 200 кВ. Оскільки досліджувані зони мають осьову симетрію, була використана циліндрична система координат. Початкові умови при розрахунку - нульові, граничні умови - задані рівні потенціалів електродів, а також граничні умови

II-ого роду: $\partial\varphi/\partial n = 0$ на границях розрахункової області. Було зроблено розрахунок розподілу напруженості електричного поля в СПЕ декількох просторових конфігурацій і обрана конструкція, що забезпечує необхідне зменшення рівня максимальної напруженості електричного поля нижче критичного, при якому спостерігається явище коронування. Результати розрахунку розподілу електричного поля в одній з частин остаточно обраної конструкції СПЕ показані на рис. 4 (напруги на лініях однакового потенціалу дані у вольтах). Розрахунок показав, що рівні максимальної напруженості електричного поля в даній системі не перевищують 16 кВ/см, що дозволяє зробити висновок про її надійний захист від корони.

П'ятий розділ присвячено дослідженню сильних електричних полів у твердих полімерних діелектриках з включеннями складної форми, яка змінюється у часі. В даному випадку розрахунки електричних полів були застосовані для моделювання розвитку в полімерних діелектриках під дією високої напруги необоротних руйнувань, що викликають появу тонких порожніх деревоподібних каналів зі слабо карбонізованими стінками, так званих дендритах. При цьому електричні параметри діелектричного середовища (поліетилену) не змінюються, міняються ж електричні і геометричні параметри включення (дендрита). У каналах дендритів відбувається розвиток розрядів, що зазвичай називаються частковими, тому що повного пробою ізоляційного проміжку при цьому не відбувається. Традиційно діагностика стану ізоляції здійснюється шляхом реєстрації цих часткових розрядів. Для розрахунку розподілів електричних полів необхідна інформація про електричні характеристики діелектриків і дендритів. Для одержання цієї інформації були проведені відповідні експериментальні дослідження.

Умови проведення експериментів такі. Була використана система електродів "голка - жила кабелю". Радіус скруглення вістря голки - 2 мкм, відстань до заземленого електрода - 1,5 мм. Експерименти проводилися при 4-х рівнях діючої напруги промислової частоти на голці: $U_0=6; 7; 8$ і 9 кВ. Типові фотографії дендритів, що утворилися при подаванні на голку напруг $U_0=6$ кВ (а) і $U_0=9$ кВ (б), представлені на рис. 5, час росту дендритів 1 година 45 хвилин і 10 хвилин відповідно.

Експерименти дозволили встановити кореляцію між формою дендрита і рівнем діючої напруги. Так, при дії напруг, близьких до початкових напруг появи дендритів (для розглянутого випадку $U_0 \sim 6-7$ кВ), дендрити мають кущеподібний вид (див. рис. 5а), а при дії великих, близьких до пробивних напруг (для розглянутого випадку $U_0 \sim 8-9$ кВ), дендрити мають деревоподібний вид (див. рис. 5б).

При розробці методу оцінки залишкового ресурсу ізоляції виявилось необхідним провести розрахунок електричного поля в системі, що містить ізоляцію і дендрит. Початкові умови при розрахунку покладалися нульовими, граничні: $e\tau_1=U_0$ на стрижневому електроді - голці і площині голкотримача, $e\tau_2=0$ – на заземленій площині, $\partial\varphi/\partial n = 0$ на інших граничних площинах.

Рис. 5. Фотографії дендритів, які утворилися в поліетилені під дією високої напруги: а) $U_0=6$ кВ, б) $U_0=9$ кВ

Оскільки процеси електричного старіння твердої ізоляції носять стохастичний характер, чисельне моделювання росту дендрита здійснювалося статистичними методами. Суть розроблених нами принципів моделювання електрофізичних процесів електричного старіння твердої ізоляції полягає в наступному. За допомогою методу скінченних об'ємів щодо розрахунку квазістаціонарних електричних полів у неоднорідних діелектриках із включеннями змінної форми розраховуються рівні напруженості в досліджуваній системі. По розрахованих рівнях модуля напруженості електричного поля $|\vec{E}|$ для кожного з елементарних паралелепіпедів визначається ймовірність його пробоя. Ймовірність пробоя осередку визначається не безпосередньо за рівнем $|\vec{E}|$, як у відомих методіках використанні теорії фракталів, а опосередковано - через її прогнозований ресурс, що залежить не тільки від $|\vec{E}|$, але й від властивостей діелектрика. Для цього застосований генератор квазівипадкових чисел, розподіл якого збігається з експериментально знайденим розподілом часу до пробоя мікрооб'ємів досліджуваного сорту діелектрика при розрахованому рівні напруженості електричного поля. При моделюванні процесів розвитку дендритів у полімерних діелектриках і, зокрема, у поліетилені нами врахований ряд особливостей. Так, множина елементарних паралелепіпедів, які перейшли під дією напруги в провідну фазу, являє собою зв'язну область, так що пробитими і приєднаними до дендрита можуть вважатися тільки зони, які безпосередньо до нього прилягають. Таким чином, при моделюванні процесу збільшення розмірів дендрита вважається, що оточуюче його середовище є ідеальним діелектриком. Іншою особливістю є урахування збільшення поверхневої електропровідності стінок пробитих комірок під час витримки їх під напругою. Пробій мікрокомірки означає, що вона стала порожнистою. Провідність такої комірки визначається провідністю її стінок. Згідно з літературними даними, питомий поверхневий опір стінок порожнини в поліетилені під дією напруги падає на кілька порядків, і, таким чином, непровідні комірки під дією напруги стають провідними. Експериментальні дані про час до пробоя мікрооб'ємів поліетилену при заданих рівнях напруженості електричного поля використовувалися як вихідні величини при моделюванні часу життя комірок діелектрика.

На рис. 6 представлені результати використання методу скінченних об'ємів для статистичного моделювання зміни форми включення (дендрита), який з'явився у діелектрику (поліетилені) на початковій стадії його розвитку.

Рис. 6. Розподіл потенціалів навколо дендрита в поліетилені у перетині $Z=\text{const}$, що проходить через голку; 1 - вістря голки; 2 - проекція дендрита на площину $Z=\text{const}$ (значення, надписані на еквіпотенціалях, дані у вольтах;
а) $U_0 = 6 \text{ кВ}$, б) $U_0 = 9 \text{ кВ}$)

Початкові умови при розрахунку покладалися нульовими, граничні: $\epsilon r_1 = U_0$ на стержневому електроді - голці і площині голкотримача, $\epsilon r_2 = 0$ – на заземленій площині, $\partial\phi/\partial n = 0$ на інших граничних площинах. Відстань між голкою і площиною - 1,5 мм, рівні прикладеної до голки напруги: $U_0=6 \text{ кВ}$ (час розвитку дендрита - 10 хв.) - рис. 6а і $U_0=9 \text{ кВ}$ (час розвитку дендрита - 20 с) - рис. 6б.

Якщо при статистичному моделюванні не враховується процес збільшення провідності стінок дендрита при його рості, варіювання амплітуди прикладеної напруги не призводить до зміни форми дендритів, відрізняються тільки часи їхнього розвитку. Для моделювання зміни об'ємної структури дендрита при різних рівнях напруги необхідно враховувати відому експериментально встановлену залежність величини провідності стінок дендрита від тривалості витримки й амплітуди прикладеної напруги. Порівняння фрактальної розмірності і характерних часів розвитку дендритів, отриманих за експериментальними і розрахунковими дослідженнями, показали їхній збіг у межах точності експерименту.

За допомогою описаної моделі можна розрахувати імовірнісну криву часу до пробою ізоляційної конструкції і визначити з заданою наперед надійністю час її безвідмовної роботи для визначеного режиму експлуатації з урахуванням статистичних розподілів діелектричних властивостей матеріалу поблизу дендрита.

Шостий розділ присвячено використанню методу скінченних об'ємів для розрахунку розподілів низькочастотних електричних полів навколо й усередині слабкопровідних неоднорідних включень складної просторової конфігурації, таких як, наприклад, тіло людини. При цьому електричні параметри оточуючого тіла діелектричного середовища (повітря) залишаються незмінними, а електричні параметри включення (тіла людини) у край неоднорідні і залежать від частоти прикладеного електромагнітного поля. Спочатку вирішується зовнішня задача і визначається розподіл електричного поля поза включенням (тілом людини), потім по знайдених граничних умовах розраховується розподіл поля всередині неоднорідного включення.

Перебування слабкопровідних включень (наприклад, тіла людини) у зоні низькочастотного ЕП приводить до його викривлення і посилення напруженості електричного поля навколо і на поверхні даних включень. Для нормування безпечних для здоров'я людини рівнів напруженості електричних полів необхідна інформація про розподіл полів на поверхні й усередині тіла людини.

Така інформація дозволяє визначити можливий негативний вплив ЕП, а також, якщо це необхідно, розробити засоби захисту або екранування. Для цього потрібно одержати картини розподілу електромагнітних полів у різних полеутворюючих системах.

В даний час велика увага приділяється вивченню впливу електромагнітних полів ліній електропередачі (ЛЕП) на здоров'я людини. При цьому необхідна інформація про розподіл електричного поля в санітарній зоні ЛЕП, а також усередині тіла людини (див. рис. 7).

На основі розвитку методу скінченних об'ємів нами розроблені чисельні методики, що дозволяють одержувати картини розподілу потенціалів і напруженостей тривимірних електричних полів у біологічних об'єктах, розташованих у санітарній зоні ЛЕП. Розраховані лінії однакового потенціалу (а) і рівної напруженості (б,в) ЕП у перетині $Z=\text{const}$, що проходить через середину тіла людини, яка знаходиться в санітарній зоні ЛЕП-110, представлені на рис. 7. Рівні однакового потенціалу ЕП дані у кіловольтах (а), рівні однакової напруженості електричного поля дані у кВ/м (б,в).

а) б) в)

Рис. 7. Розраховані картини розподілу ЕП у середньому перетині $Z=\text{const}$ тіла людини, що знаходиться у санітарній зоні ЛЕП-110 під середнім (б) і крайнім (в) проводами, 1 - проводи ЛЕП

Розподіли відповідають моменту часу, коли напруга на середньому проводі досягла максимуму. Початкові умови при розрахунку вважалися нульовими, граничні умови являли собою аналітичне рішення для потенціалів ЛЕП на відстані від тіла людини, де викривленням поля, пов'язаним з його присутністю, можна знехтувати.

Для того, щоб оцінити ступінь викривлення ЕП у присутності слабкопровідних включень складної просторової конфігурації, був використаний також метод інтегральних рівнянь. Як приклад було розраховано розподіл напруженості електростатичного поля у системі "оператор персонального комп'ютера – відеодисплейний термінал (ВДТ)". Оскільки провідність біотканин на багато порядків перевищує провідність повітря, при одержанні розподілу електростатичного поля поблизу тіла людини воно вважалось ідеальним провідником. Екран ВДТ замінювався рівномірно зарядженою площиною, густина заряду якої розраховувалася по обмірених рівнях напруженості електростатичного поля в безпосередній близькості від його поверхні.

Нормальні компоненти напруженості електричного поля у вузлах на поверхні досліджуваного об'єкта записувалися через щільності заряду на відповідних їм площадках у вигляді суперпозиції напруженостей ЕП зарядів інших площадок, а також зарядів елементарних площадок, на які розбитий екран ВДТ. У результаті перетворення даних виразів, отримані рівняння для

внутрішньої задачі Неймана, що представляють собою інтегральні рівняння Фредгольма другого роду. Після регуляризації, система інтегральних рівнянь була замінена системою лінійних алгебраїчних рівнянь.

З метою більш точного урахування реальної форми поверхні людського тіла, воно було апроксимоване сіткою, що складається з плоских площадок-трикутників, які мають різну орієнтацію у просторі. Тривимірною геометричною моделлю тіла людини була представлена в dxf-форматі Autodesk AutoCAD і прочитана спеціально розробленою підпрограмою.

При розрахунку вважалось, що заряд кожної елементарної площадки зосереджений у її центрі ваги. У результаті рішення системи рівнянь виду:

де

записаних для кожної елементарної площадки, на які поділена поверхня об'єкта, розраховувалися величини зарядів, що імітують присутність людини в зоні дії електричного поля.

Результати проведених чисельних розрахунків напруженості електростатичного поля в системі "оператор персонального комп'ютера – відеодисплейний термінал" представлені на рис. 8: це розраховані лінії однакової напруженості ЕП $|\vec{E}| \geq 20$ кВ/м у перетині, що проходить через площину симетрії оператора (напруженості ЕП дані у В/м).

Рис. 8. Лінії рівної напруженості ЕП $|\vec{E}| \geq 20$ кВ/м навколо тіла оператора
ВДТ

При розрахунку використовувалися відомі експериментальні дані про рівень напруженості електростатичного поля на відстані 0,1 м від центра ВДТ - 250 кВ/м. Відповідно до діючих в Україні нормативних документів, час перебування людей у зоні дії електростатичного поля не обмежено, якщо рівень його напруженості менший ніж 20 кВ/м. Як видно з рис. 8, зони з підвищеною напруженістю ЕП є на грудях (I), а також на передній і задній частині голови оператора (II).

ВИСНОВКИ

У дисертації отримала подальший розвиток теорія неоднорідних електричних полів у частині розробки методу скінченних об'ємів, наукових підходів і математичних моделей для чисельного розрахунку тривимірних квазістаціонарних електричних полів у діелектричних і слабкопровідних середовищах з включеннями, що мають складну конфігурацію, яка може змінюватися у часі. Отримані результати у сукупності складають суттєвий внесок у вирішення науково-прикладної проблеми розрахунку електричних полів у середовищах з гетерогенними включеннями складної конфігурації, яка може змінюватись у часі.

При цьому одержано такі основні наукові результати:

1. На основі узагальненого аналізу відомих підходів і методів розрахунку електричних полів у неоднорідних середовищах обґрунтовано доцільність розробки методу скінченних об'ємів для чисельного розрахунку тривимірних електричних полів у діелектричних і слабкопровідних середовищах з гетерогенними включеннями складної конфігурації, що дозволило розробити наукові підходи та методики для розрахунку квазістаціонарних полів у неоднорідних діелектричних і слабкопровідних середовищах, в тому числі з включеннями, конфігурація яких може змінюватись у часі.

2. Розроблено метод скінченних об'ємів та програмні засоби для чисельного розрахунку тривимірних квазістаціонарних електричних полів у діелектричних і слабкопровідних середовищах з гетерогенними включеннями складної конфігурації, яка може змінюватися у часі. Отримані результати у сукупності складають нову наукову концепцію чисельного розрахунку електричних полів у неоднорідних середовищах, яка базується на ітераційному визначенні розподілу електричного поля біля провідних включень у припущенні, що вони є ідеальними провідниками, та подальшим розрахунком електричного поля усередині включень у припущенні, що зовнішнє середовище є ідеальним діелектриком, а також використанні розробленої різницевої схеми для знаходження рішення систем тривимірних еліптичних рівнянь.

3. Запропоновані граничні умови для напруженості електричного поля на межах розрахункової області при застосуванні метода поглинаючих граничних шарів та скінченних об'ємів при розрахунку впливу однорідного зовнішнього поля на середовища, розташовані у відкритих областях. Це дозволило суттєво, у 10 і більше разів, знизити порядок розв'язуваної системи рівнянь, час роботи електронно-обчислюваної техніки та вимоги до оперативної пам'яті комп'ютера.

4. Визначений характер зміни анізотропних електричних параметрів середовища, яке оточує розташовані в ньому тонкі провідні канали з діаметром у багато разів меншим за їхню довжину, що забезпечує проведення розрахунків розподілів електричних полів методом скінченних об'ємів з кроком розрахункової сітки у $10\text{-}10^4$ разів більшим, ніж діаметри каналів.

5. З використанням методу скінченних об'ємів, теорії фракталів і експериментальних даних про електричне старіння твердих полімерів розроблено програмні засоби для аналізу в них напруженості електричного поля поблизу тонких провідних включень складної конфігурації, що може змінюватись у часі. Створено методику статистичного моделювання процесів розвитку у часі тонких провідних розгалужених каналів (дендритів) у полімерних діелектриках.

6. Чисельно реалізовано новий метод ітераційного розрахунку тривимірних електричних полів при протіканні електричного струму через розгалужені провідні включення з урахуванням нелінійних змін електричних параметрів зовнішнього середовища та з вирішенням задачі аналізу нелінійних електричних кіл. Це забезпечило розробку методики аналізу електричних параметрів (потенціалів, напруженостей, опорів розтіканню струму, напруг дотику і крокових напруг) на території високовольтних електричних підстанцій і визначення зон, в яких небезпечні фактори можуть перевищувати допустимі рівні, а також перевірити заходи щодо модернізації систем електрозаземлення.

7. На основі розвитку методу скінченних об'ємів для розрахунку електричних полів у діелектричних середовищах із провідними включеннями складної конфігурації розроблено програмні засоби для визначення параметрів систем протикоронних екранів, що дозволило забезпечити зниження максимальних рівнів напруженості електричного поля до 16 кВ/см і уникнути завдяки цьому появи електричної корони у високовольтних елементах конструкції електростатичного прискорювача важких іонів.

8. На базі нової концепції розрахунку електричних полів у неоднорідних середовищах розроблено ефективні наукові підходи і програмні засоби для чисельного розрахунку розподілу напруженості електричного поля навколо й усередині неоднорідного включення, яким з електричної точки зору є тіло людини, з урахуванням його реальної геометричної конфігурації та електричних параметрів. Це дозволяє аналізувати вплив електричних полів на життєдіяльність людей та визначати зони, які можуть бути небезпечними для роботи персоналу. Розрахунки показали, що зовнішнє низькочастотне електричне поле викривляється у присутності тіла людини: рівні його напруженості можуть збільшуватися у 2-11 разів в залежності від умов впливу.

9. Сформульовані в дисертаційній роботі наукові положення та результати є достатньо обґрунтованими і достовірними, що підтверджується збіжністю ітераційних процесів, збігом рішень при подвійному зменшенні кроку розрахункової сітки та подвоєнні габаритів розрахункової області; відповідністю отриманих результатів з відомими тестовими аналітичними та опублікованими чисельними рішеннями, узгодженням розроблених математичних моделей з результатами, отриманими на експериментальних та промислових електротехнічних об'єктах.

10. Отримані результати впроваджено:

- в Науково-дослідному та проектно-конструкторському інституті (НДПКІ) "Молнія" Національного технічного університету (НТУ) "Харківський політехнічний інститут" ("ХПІ") при визначенні надійності систем захисного заземлення електроенергетичних об'єктів Міненерго України;

- в Інституті фізики плазми ННЦ Харківського фізико-технічного інституту (ХФТІ) НАН України при розробці системи протикоронних екранів електростатичного прискорювача іонів, який експлуатується у м. Мадрид (Іспанія), та у НДПКІ "Молнія" НТУ "ХПІ" при розрахунках властивостей металевих корпусів, що екранують зовнішнє електричне поле (розраховано розподіл полів усередині корпусів під дією зовнішнього електричного поля напруженістю до 5 кВ/м, на основі чого проведено оцінку відповідності виробів вимогам п.5.4 НПЗ06.5.02/3.035-2000 "Вимоги з ядерної та радіаційної безпеки до інформаційних і керуючих систем, що важливі для безпеки атомних станцій");

- в Харківському науково-дослідному інституті гігієни праці та професійних захворювань при розробці нормативів для рівнів електричних полів, безпечних для життєдіяльності людей.

11. Результати дисертаційної роботи використовуються також у навчальних планах підготовки бакалаврів, спеціалістів та магістрів на кафедрі теоретичної електротехніки Національного технічного університету України "Київський політехнічний інститут" та кафедрі імпульсних процесів і технологій Українського державного морського технічного університету ім. адм. О.Макарова.

ОСНОВНІ ПУБЛІКАЦІЇ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

1. Резинкина М.М. Расчет проникновения низкочастотного трехмерного электрического поля в неоднородные слабопроводящие объекты // Электричество. - 2003.- № 8. – С. 50-55.

2. Резинкина М.М. Расчет трехмерных электрических полей в системах, содержащих тонкие проволоки // Электричество. – 2005. - № 1. – С. 44-49.

3. Резинкина М.М. Расчет распределения неоднородного низкочастотного электрического поля в окрестности тела человека // Электричество. - 2003.- № 4.- С. 44-48.

4. Резинкина М.М. Моделирование зависимости формы дендритов в полиэтилене от уровня приложенного напряжения // Письма в журнал технической физики. - С-Петербург: "Наука". – 2000. - Т. 26, № 5. – С. 37-41.

5. Резинкина М.М. Численный расчет электрического поля закраины импульсного конденсатора, содержащего неоднородную изоляцию // Техническая электродинамика. - 1999. - № 3. - С. 20-23.

6. Резинкина М.М. Численное исследование трехмерного поля дендрита, возникающего при электрическом старении полимерной изоляции // Техническая электродинамика. - 1999. - № 6. С. 13-16.
7. Резинкина М.М. Численное моделирование распределение электрического поля заземлителей // Электронное моделирование. - 2000. - №1. - С. 107-112.
8. Резинкина М.М. Экспериментальное исследование динамики роста дендритов в полиэтилене при различных перенапряжениях // Вестник ХГПУ. – 1998. - Вып. 21. - С. 48-51.
9. Резинкина М.М. Расчет искажения электрического поля в окрестности человека, находящегося в санитарной зоне ЛЭП // Праці Інституту електродинаміки НАН України. – 2000. – Енергоефективність. - С. 193-200.
10. Резинкина М.М. Математическое моделирование распределения потенциалов на территории высоковольтных подстанций в аварийных режимах // Вестник ХГПУ. - 2000. - Вып. 82. - С. 81-83.
11. Резинкина М.М. Численное исследование электрических характеристик систем заземлителей // Вестник ХГПУ. - 1999. - Вып. 75. - С. 115- 120.
12. Резинкина М.М., Щерба А.А. Моделирование электрических полей в слабопроводящих неоднородных средах и анализ распределения полей вне и внутри тела человека. Технічна електродинаміка. Темат.вип. “Проблеми сучасної електротехніки”. Ч.5.- 2004. - С. 3-6.
13. Резинкина М.М., Резинкин О.Л. Расчет распределения напряженности трехмерного электрического поля в неоднородном диэлектрике // Электричество. – 1995. - № 7. - С. 62-66.
14. Резинкина М.М., Резинкин О.Л., Носенко М.И. Зависимость фазы появления частичных разрядов в полиэтиленовой изоляции от стадии роста дендрита // Журнал технической физики. - 2001. - Т. 71, № 3. - С. 69-71.
15. Резинкина М.М., Колиушко Д.Г. Исследование разветвленной системы защитного заземления высоковольтной подстанции // Вестник ХГПУ. - 1999. - Вып. 47. - С. 72-75.
16. Резинкина М.М., Князев В.В., Резинкин О.Л. Численный расчет распределения трехмерных низкочастотных электрических полей в проводящих экранах с отверстиями // Техническая электродинамика. - 1997. - № 6. - С. 3-6.
17. Резинкина М.М., Резинкин О.Л., Носенко М.И. Экспериментальное исследование зависимости частичных разрядов в полиэтилене от фрактальных характеристик дендрита // Вестник ХГПУ. - 1999. - Вып. 66. - С. 107-111.
18. Экспериментальные исследования ресурсных характеристик микрообъемов твердой изоляции / Конотоп В.В., Резинкин О.Л., Резинкина М.М., Долбин А.В., Гадаскин С.Г. // Приборы и техника эксперимента. - 1995. - № 4. - С. 191-196.

19. Конотоп В.В., Резинкин О.Л., Резинкина М.М. Численная модель развития во времени и в пространстве деструкционных процессов в электрической изоляции // Журнал технической физики. - 1996. - Т. 66, № 2. – С. 198-201.
20. Оценка состояния заземляющих устройств энергообъектов с помощью математического моделирования / Г.М. Колиушко, М.М. Резинкина, О.Л. Резинкин, Д.Г. Колиушко // Вестник ХГПУ. - 1999. - Вып. 55. - С. 88-90.
21. Основные направления развития современных методов молниезащиты / В.В. Князев, М.М. Резинкина, В.И. Кравченко, А.А. Щерба // Вестник НТУ “ХПИ”. - 2004. - Вып. 35. - С. 102-111.
22. Резинкин О.Л., Резинкина М.М., Долбин А.В. Исследование изменения во времени фрактальных характеристик дендритов в полиэтиленовой изоляции // Письма в журнал технической физики. - 1994. - Т. 20, № 17. - С. 24-28.
23. Князев В.В., Колиушко Д.Г., Резинкина М.М. Численная оценка уровня потенциалов на элементах конструкции матч радиорелейной связи при прямых ударах молнии // Вестник НТУ “ХПИ”. – 2004. – Вып. 5. - С.7-16.
24. Разработка принципов автоматизации процесса выбора конструкционных параметров твердой электрической изоляции / В.В. Конотоп, М.М. Резинкина, О.Л. Резинкин, А.В. Сотников // Электронное моделирование. - 1996. - Т. 18, № 3. - С. 92-94.
25. Разработка системы противокоронных экранов инжектора и ускорителя пучка ионов диагностического комплекса для физических исследований плазмы / М.М. Резинкина, О.С. Недзельский, С.М. Хребтов, О.Л. Резинкин // Журнал технической физики. - 1998. - Т. 68, № 11. - С. 106-109.
26. Резинкина М.М., Резинкин О.Л., Носенко М.И. Классификация частичных разрядов в полиэтиленовой изоляции // Вестник ХГПУ. - 1999. - Вып. 65. - С. 42-46.
27. Резинкина М.М., Резинкин О.Л., Носенко М.И. Экспериментальное исследование процессов ионизационного старения полиэтиленовой изоляции // Вестник ХГПУ. - 2000. - Вып. 78. - С. 74-76.
28. Кравченко В.И., Резинкина М.М. Современные проблемы биологических аспектов электромагнитной совместимости // Вестник НТУ “ХПИ”. - 2002. - Т. 1, №7. - С. 108-116.
29. Резинкина М.М., Резинкин О.Л., Носенко М.И. Экспериментальный стенд под управлением ПЭВМ для регистрации частичных разрядов в полиэтиленовой изоляции // Вестник ХГПУ. - 1999. - Вып. 37. - С. 87-90.
30. Резинкина М.М., Кравченко О.А. Численная оценка искажения электромагнитных полей в присутствии биологических объектов // Праці Інституту електродинаміки НАН України. – 1999. – Електротехніка. - С. 23-33.

31. Резинкина М.М., Кравченко О.А. Расчетное исследование распределения напряженности электрического поля в окрестности оператора видеодисплейного терминала // Технічна електродинаміка. - 2000. – Темат.вип. “Проблеми сучасної електротехніки”. Ч.3. - С. 3-6.

32. Rezinkina M.M. The computation of electric field intensity distribution in the dielectric during its aging // Proc. of 9-th International Symposium on High Voltage Engineering. – Graz. - 1995. –V.8. - P. 8383.1-8383.4.

33. Konotop V.V., Rezinkin O.L., Rezinkina M.M. Numerical model of the electric insulation aging processes in time and space domain // Proc. of 9-th International Symposium on High Voltage Engineering. -Graz. - 1995. -V.1. -P. 1082.1-1082.

34. Rezinkina M.M. Experimental and numerical investigation of treeing processes in polyethylene insulation // Proc. of 10-th International Symposium on High Voltage Engineering. –Montreal. – 1997.

35. Rezinkina M.M., Koliyshko G.M., Rezinkin O.L. Calculation of 3-d electrical field distribution around technical devices in the vicinity of high voltage transmission lines // Proc. of 10-th International Sympos. on High Voltage Engineering. - Montreal. - 1997. - V. 2. - P. 109-112.

36. Rezinkina M.M., Rezinkin O.L. Experimental research of the correlation between partial discharges in polyethylene insulation and fractal characteristics of causing them treeing //Proc. of 7th Int.Conf. on Solid Dielectrics.– Eindhoven.–2001.–P.404-407.

37. Rezinkina M.M., Rezinkin O.L. Monitoring and diagnostics of high-voltage cables polyethylene insulation //Proc. of APTADM 2001.- Wroclaw.–2001.- P.297-300.

38. Rezinkina M., Bydianskaya E. Nikolenko E. Numerical modeling of low frequency electric field interaction with the woman body // Proc. of 3d International Workshop on biological effects of electromagnetic fields. - Kos. – 2004. – P. 177-183.

АНОТАЦІЇ

Резинкіна М.М. Розрахунок тривимірних електричних полів в неоднорідних середовищах методом скінченних об’ємів. – Рукопис.

Дисертація на здобуття наукового ступеня доктора технічних наук за спеціальністю 05.09.05 - теоретична електротехніка. – Інститут електродинаміки НАН України, Київ, 2005.

Дисертація присвячена розвитку теорії розрахунку електричних полів у галузі розробки методів та математичних моделей чисельного розрахунку тривимірних квазістаціонарних електричних полів в неоднорідних діелектричних та слабкопровідних середовищах з гетерогенними включеннями складної конфігурації, яка може змінюватися у часі. Для цього використовуються методи скінченних об'ємів та поглинаючих граничних шарів. Застосування розроблених методик для розрахунків параметрів електричних процесів, які відбуваються під впливом сильних електричних полів в неоднорідних слабкопровідних включеннях зі складною конфігурацією, котра може зміцнюватися під впливом високої напруги, дозволило визначити безпечні режими роботи систем заземлення енергетичних об'єктів, твердої полімерної ізоляції, а також людей при їхньому знаходженні у зоні дії електричних полів.

Ключові слова: поле електричне, метод скінченних об'ємів, ізоляція, заземлення, екранування, біоелектромагнітна сумісність.

Rezinkina M.M. Calculation of three-dimensional electric field in heterogeneous mediums by the method of final volumes. - Manuscript.

The dissertation for a doctor's degree on speciality 05.09.05 - theoretical electrical engineering. - Institute of Electrodynamics of Ukrainian National Academy of Sciences, Kyiv, 2005.

The dissertation is dedicated to development of the theory of electric field calculation on the base of creation of the methods and mathematical models of numerical calculation of three-dimensional quasi-stationary electric fields in heterogeneous dielectric and weakly conducting mediums with inclusions of complex and changing in time domain configuration. The methods of the final volumes and absorbing boundary layers have been used for these calculations. Usage of the elaborated methods for calculation of the parameters of electric processes upon strong electric field in heterogeneous dielectric and weakly conducting inclusions with complex configuration, which may change upon action of high voltage, has allowed to define the safe working regimes of the systems of grounding of power objects, solid polymeric insulation, as well as people, located in the zone of electric field action.

Keywords: electric field, final volumes method, insulation, grounding, shielding, bioelectromagnetic compatibility.

Резинкина М.М. Расчет трехмерных электрических полей в неоднородных средах методом конечных объемов. – Рукопись.

Диссертация на соискание ученой степени доктора технических наук по специальности 05.09.05 - теоретическая электротехника. – Институт электродинамики НАН Украины, Киев, 2005.

Диссертация посвящена развитию теории электрических полей в части разработки методов и математических моделей численного расчета трехмерных квазистационарных электрических полей

в неоднородных диэлектрических и слабопроводящих средах с гетерогенными включениями сложной и изменяющейся во времени конфигурации. При этом используются методы конечных объемов и поглощающих граничных слоев. Разработан новый метод и программные средства для статистического моделирования развития дендритов - тонких проводящих разветвленных каналов неполных пробоев (причем, величина шага пространственной сетки может быть в четыре и более раз превышать их диаметр), конфигурация которых изменяется во времени при переходе диэлектрических областей в проводящую фазу. Это происходит в результате перерасчетов электрического поля при изменении конфигурации дендритов, а также использования теории фракталов и экспериментальных данных об электрическом старении твердых полимерных сред.

Разработан метод и основанная на нем программа расчета распределений трехмерных электрических полей при протекании электрического тока в токопроводящем включении с учетом нелинейных изменений электрических параметров прилегающих областей. Данный метод основан на решении итерационных задач: расчета переходных процессов в эквивалентной электрической схеме замещения токопроводящего включения при допущении, что окружающая среда является идеальным диэлектриком; расчета электрического сопротивления растеканию тока в окрестности проводящего включения при допущении, что оно является идеальным проводником.

На основе разработанной концепции расчета трехмерных электрических полей в неоднородных проводящих включениях созданы методы и основанные на них программные средства для численного расчета напряженности электрического поля в окрестности и внутри тела человека с учетом его реальной геометрической конфигурации.

Применение разработанных методик для расчетов параметров электрических процессов, происходящих в системах заземления энергетических объектов, обеспечило определение потенциалов, сопротивлений растеканию тока, напряжений прикосновения и шаговых напряжений на их территориях в аварийных режимах, позволило обнаружить зоны, где они превышают допустимые уровни, предложить и научно обосновать меры по модернизации данных систем, а также проверить расчетным путем эффективность предложенных технических решений. Данные результаты использованы в НИПКИ "Молния" НТУ "ХПИ" при исследовании надежности систем защитного заземления эксплуатируемых в Украине электроэнергетических объектов.

На основе разработанной концепции численного расчета распределения низкочастотных электрических полей в неоднородных диэлектрических средах с включениями изменяющейся формы, а также полученных экспериментальных данных о параметрах твердых полимерных диэлектриков при их электрическом старении разработаны научно-технические основы диагностики состояния высоковольтной изоляции. Они состоят в установлении наиболее вероятной формы дефектной структуры - дендрита, образующегося под действием высокого напряжения, в результате измерения и классификации вызываемых им частичных разрядов и последующем

статистическом моделировании с помощью теории фракталов его развития во времени и в пространстве для оценки остаточного ресурса. Использование разработанного метода диагностики состояния высоковольтной изоляции кабелей различных энергетических систем может позволить существенно снизить риск возникновения аварийных ситуаций вследствие отказа изоляции.

Применение разработанных методов расчета электрических полей в окрестности и внутри тела человека с учетом его реальной пространственной формы и неоднородных электрических параметров позволило уточнить и научно обосновать разрабатываемые нормы безопасных для операторов уровней напряженности электрических полей. Материалы диссертации использованы в Харьковском научно-исследовательском институте гигиены труда и профессиональных заболеваний при разработке норм безопасных для людей уровней электрических полей.

В результате использования созданных численных методик расчета трехмерных электрических полей в неоднородных диэлектрических средах с включениями сложной формы выбраны параметры средств защиты от действия сильных электрических полей: систем противокоронных экранов электростатического ускорителя ионов; защитных экранов, обеспечивающие минимальное проникновение в них электрического поля; разработаны численные критерии определения эффективности защиты объектов стержневыми молниеотводами. Результаты диссертационной работы внедрены в НИПКИ "Молния" НТУ "ХПИ" при выполнении бюджетной и хозяйственной тематики, а также в Институте физики плазмы ННЦ Харьковского физико-технического института НАН Украины при разработке системы противокоронных экранов электростатического ускорителя ионов, эксплуатируемого в настоящее время в Испании (г. Мадрид).

Ключевые слова: поле электрическое, метод конечных объемов, изоляция, заземление, экранирование, биоэлектромагнитная совместимость.