

Баранов Михайло Іванович

УДК 538.3:621.3.022

Перехідні процеси при діянні великих імпульсних струмів та сильних імпульсних магнітних полів на провідні об'єкти

Спеціальність 05.09.13 —

Техніка сильних електричних та магнітних полів

**АВТОРЕФЕРАТ
дисертації на здобуття наукового ступеня
доктора технічних наук**

Харків — 1999

Дисертацією є рукопис.

Робота виконана в Науково-дослідному та проектно-конструкторському інституті (НДПКІ) “Молнія” та на кафедрі інженерної електрофізики Харківського державного політехнічного університету (ХДПУ) Міністерства освіти України.

Науковий консультант: доктор технічних наук, професор Михайлов Валерій Михайлович, Харківський державний політехнічний університет, завідувач кафедри інженерної електрофізики.

- Офіційні опоненти:
1. Доктор технічних наук, старший науковий співробітник Юферов Володимир Борисович, Інститут плазмової електроніки і нових методів прискорення Національного наукового центру “Харківський фізико-технічний інститут” НАН України, завідувач лабораторією криогенної електрофізики.
 2. Доктор технічних наук, старший науковий співробітник Подольцев Олександр Дмитрович, Інститут електродинаміки НАН України, провідний науковий співробітник.

3. Доктор технічних наук, професор Фінкельштейн Володимир Борисович, Харківська державна академія міського господарства, професор кафедри електротехніки.

Провідна установа: Національний технічний університет України “Київський політехнічний інститут” Міністерства освіти України, кафедра техніки та електрофізики високих напруг, м. Київ.

Захист дисертації відбудеться “ 2 ” грудня 1999 року о 14-30 годині на засіданні спеціалізованої вченої ради Д64.050.08 в Харківському державному політехнічному університеті за адресою: 310002, м. Харків-2, вул. Фрунзе, 21.

З дисертацією можна ознайомитись у бібліотеці Харківського державного політехнічного університету.

Автореферат розісланий “ 20 ” вересня 1999р.

Вчений секретар

спеціалізованої вченої ради

Болух В. Ф.

ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

Актуальність проблеми. При отриманні та застосуванні для наукових (проведення фізичних експериментів) та технологічних (магнітно-імпульсна обробка металів (МІОМ), електрогідравлічна обробка матеріалів) цілей великих імпульсних струмів (ВІС) та сильних імпульсних магнітних полів (СІМП) у нано- та мікросекундному часових діапазонах, а також при проектуванні та створенні для даних цілей високовольтних електрофізичних установ (ВЕФУ) з ємкісними накопичувачами енергії (ЄНЕ) невід'ємною задачею є виконання розрахунків та аналізу перехідних електромагнітних, електротеплових та електромеханічних процесів у їх струмоведучих частинах та оброблюючих деталях, що містять, у основному, циліндричні та плоскі струмопровідні об'єкти. Діяння на такі об'єкти ВІС та СІМП штучного походження може приводити до імпульсного нагріву їх матеріалу за час проходження по ним ВІС до високих температур, послідовному розплавленню та при визначених умовах до явищ абляції і електричного вибуху (ЕВ) скін-шару та стінки струмопроводів та оброблюваних деталей. Тому при розробці та експлуатації таких ВЕФУ з ЄНЕ однією з проблемних задач з'являється забезпечення електротермічної стійкості циліндричних струмопроводів і раціональний вибір їх поперечних перерізів по заданим значенням імпульсного струму розряду ВЕФУ з ЄНЕ. В наступний час відсутні дані з обґрунтованого вибору найбільш допустимої (по граничним температурам для ізоляції та показникам зниження механічної міцності матеріалу струмопроводів) та критичної (по досягненню температури плавлення та ЕВ матеріалу струмопроводів) щільностей імпульсного розрядного струму ВЕФУ з ЄНЕ у циліндричних струмопроводах. Усе вищевказане відноситься і до імпульсного струму блискавки мікросекундного діапазону, а також імпульсним вдарним струмам мілісекундного діапазону при коротких замиканнях (КЗ), що діють на циліндричні струмопроводи силових електричних ланцюгів промислової частоти. У техніці ВІС та СІМП, при МІОМ та у екрануючих конструкціях широко використовуються провідні циліндричні оболонки, що випробовують діяння зовнішніх аксіальних імпульсних магнітних полів (ІМП). Відомі рішення задач проникання аксіальних ІМП у таку оболонку виконані у плоскому приближенні падаючої електромагнітної хвилі (ЕМХ), що не облічують реальні поперечні розміри циліндричної оболонки. Тому дослідження поверхневого ефекту (ПЕ) у циліндричній оболонці з кінцевими значеннями радіусу і товщини її стінки для аксіальних ІМП з'являється актуальною задачею. Практичний інтерес у технології МІОМ представляє вивчення крайового механічного ефекту у круглій провідній циліндричній оболонці, що стиснута тисненням СІМП у індукторі з

концентратором магнітного потоку (КМП) з кінцевою довжиною робочої зони. Існуючі методи розрахунків процесу енерговиділення та інтегральних електричних параметрів (ІЕПА) для суцільних та порожнистих циліндричних провідників з аксіальними ВІС не облічують вплив нестационарного ПЕ. Особливу трудність при розробці та створенні середне- та крупногабаритних ВЕФУ з коаксіальними формуючими (КФЛ) та повітряними (ПЛ) лініями кінцевої довжини для цілей одержання ВІС та потужних електромагнітних імпульсів (ЕМІ) у повітряних робочих об'ємах представляє урахування та оцінка впливу імпульсних теплових втрат у циліндричних струмопроводах КФЛ та ВЛ.

Необхідність вирішення електродинамічних задач у області технології МІОМ, електромагнітної сумісності (ЕМС) та стійкості (ЕМСТ) об'єктів електроенергетичних (ЕЕС) та аерокосмічних (АКС) систем стимулює інтерес до вивчення ефектів, особливостей та результатів взаємодії ВІС та СІМП різних часових форм з провідними об'єктами різної конфігурації та структури. До аналогічних задач можуть бути віднесені і прикладні задачі у галузі технічної електродинаміки, що зв'язані з радіолокацією та зондуванням ЕМХ провідних об'єктів, дослідженням поширення та дифракції ЕМХ на провідних неоднорідностях та границях розділу середовищ і ідентифікацією АКС. Рішення вказаних задач істотно спрощуються у випадку завдання граничних умов для ЕМХ на поверхнях провідних об'єктів, що випробовують діяння ВІС та СІМП. При прямому ударі блискавки (ПУБ) в металеву обшивку літального апарату (ЛА) виникає складний комплекс електромагнітних, електротеплових та електромеханічних явищ у зоні прив'язки каналу блискавки на провідній поверхні обшивки ЛА. Слідством цих явищ слідує рахувати вм'ятини на обшивці та найбільш важкі її пошкодження у вигляді розривів та кризних пробоїв (прожогів), що приводить до зниження безпеки польотів ЛА (літаків, вертольотів, ракетно-космічної техніки) у електрично активній земній атмосфері. Наведені від діяння ВІС та СІМП природного та штучного походження рівень потенціалів, напруг та струмів у електричних ланцюгах об'єктів ЕЕС та АКС можуть привищувати допущені, що викликає відкази та необоротні процеси у їх ланцюгах та радіоелектронних засобів (РЕЗ), що найчастіше приводять до катастрофічних наслідків. У зв'язку з цим розробка теорії перехідних електромагнітних, електротеплових та електромеханічних процесів у провідних об'єктах, що випробовують діяння ВІС та СІМП, та забезпечення на її основі електромагнітної, електротермічної та електромеханічної стійкостей провідних об'єктів ЕЕС та АКС до діяння ВІС та СІМП природного та штучного походження придбавають першорядне значення для їх надійного функціонування та стають актуальною комплексною науково-прикладною проблемою.

Зв'язок роботи з науковими планами, темами. Робота виконувалась у відповідності з планами НДОКР по секції прикладних проблем НАН України (тема №9/66 від 13.10.92 р.), госпдоговірної (теми №90430 від 18.05.83р., №117051 від 02.07.92р.) та бюджетної тематиці НДПКІ "Молнія" ХДПУ по міністерству освіти України (№ держреєстрації у УкрІНТЕІ: 0196U017855, 0198U000360), який згідно з постановою Кабінету Міністрів України від 01.04.99р. № 527 є національним надбання України.

Мета та задачі роботи. Метою цієї роботи є розробка теорії перехідних електромагнітних, електротеплових та електромеханічних процесів при діянні ВІС та СІМП природного та штучного походження на провідні об'єкти та забезпечення на її основі електромагнітної, електротермічної та електромеханічної стійкостей струмоведучих частин ВЕФУ сильнострумової імпульсної техніки (СІТ), об'єктів електроенергетики, зв'язку, авіаційної та ракетно-космічної техніки до діяння на них ВІС та СІМП.

У рамках даної мети були сформульовані наступні задачі:

- розробити математичні моделі нестационарного лінійного ПЕ у суцільному та порожнистому круглих циліндричних провідниках необмеженої довжини та довільного поперечного перерізу, що збуджуються зовнішнім однорідним азимутальним або аксіальним ІМП;
- розробити з урахуванням впливу нестационарного лінійного ПЕ методику розрахунку наведених імпульсних напруг та струмів у електрично коротких екранованих коаксіальних кабелях зв'язку (ЕККЗ) з круглою суцільною провідною циліндричною оболонкою, що випробовує діяння ПУБ на стадії головного розряду з імпульсною складовою струму блискавки 2/50 мкс;
- розробити з урахуванням впливу нестационарного лінійного ПЕ методи розрахунку імпульсних теплових втрат та ІЕПА для суцільного та порожнистого круглих циліндричних провідників з експоненціально затухаючим по синусоїді розрядним струмом ВЕФУ з ЄНЕ та аперіодичним двоекспоненціальним імпульсним струмом блискавки 2/50 мкс;
- дослідити з урахуванням впливу нестационарного лінійного ПЕ перехідні процеси грозового походження у двохпровідній ВЛ електропередачі з суцільними та порожнистими круглими циліндричними проводами, що випробовують діяння імпульсного струму блискавки 2/50 мкс, а також перехідні процеси у двохпровідній ВЛ при діянні на циліндричні провода імпульса розрядного струму ВЕФУ 5/200 нс;
- розробити методику приблизного розрахунку хвильових електромагнітних процесів (ХЕМП) стосовно до отримання ВІС та потужних ЕМІ при розряді однорідної одинарної КФЛ ВЕФУ на активне навантаження з зосередженими параметрами, що облічує вплив нестационарного лінійного ПЕ у циліндричних струмопроводах;
- розробити з урахуванням впливу нестационарного лінійного ПЕ методику приблизного розрахунку ХЕМП при розряді однорідної одинарної КФЛ ВЕФУ на однорідну багатопровідну ВЛ з суцільними та порожнистими круглими циліндричними проводами та довільною зосередженою навантаженістю;
- розробити приблизні граничні умови для провідних об'єктів різної геометричної форми при діянні на них ВІС та СІМП, що змінюються за часом по довільному закону;
- чисельно дослідити нестационарний нелінійний ПЕ у суцільному та порожнистому круглих циліндричних провідниках при ПУБ з імпульсним струмом блискавки 2/50 мкс, імпульсному розряді ВЕФУ з експоненціально затухаючим по синусоїді струмом та імпульсним струмом КЗ промислової частоти;
- визначити електротермічну стійкість для голих та ізольованих ізотропних циліндричних проводів та кабелів при ПУБ з імпульсним струмом блискавки 2/50 мкс та для затухаючого по синусоїді розрядного струму ВЕФУ з ЄНЕ;
- знайти найбільші допустимі та критичні щільності струму для голих та ізольованих круглих циліндричних проводів та кабелів, що випробовують імпульсні діяння аперіодичного струму блискавки 2/50 мкс при ПУБ, струму затухаючого розряду ВЕФУ з ЄНЕ та струму КЗ у силових ланцюгах промислової частоти;
- встановити межі застосування найпростішої нелінійної електротеплової моделі з рівномірним розподіленням імпульсного струму та температури по поперечному січенню круглого суцільного циліндричного провідника, що

випробовує діяння ВІС, що змінюються з часом по законам експоненціально затухаючого по синусоїді імпульсного розрядного струму ВЕФУ з ЄНЕ, аперіодичного імпульсного струму блискавки 2/50мкс та імпульсного струму КЗ промислової частоти;

- виконати математичне моделювання електромагнітного та електромеханічного ефектів при ПУБ у тонкостінну металеву обшивку ЛА;
- виконати експериментальне дослідження електротермічного діяння каналу сильнострумowego мікросекундного розряду ВЕФУ з ЄНЕ на плоский елемент дуралюминової обшивки ЛА;
- дослідити крайовий механічний ефект при стисненні круглої циліндричної металеві оболонки тисненням СІМП у індукторі з КМП з плоскими торцями;
- розробити критерії та рішення по забезпеченню електромагнітної стійкості при ПУБ електричного короткого ЕККЗ, електротермічної стійкості при ПУБ, затухаючим по синусоїді розряді ВЕФУ з ЄНЕ та КЗ промислової частоти кабельно-провідникової продукції, електротермічної та електромеханічної стійкостей при ПУБ металеві обшивки ЛА.

Постановка вищевказаних цілей та задач потребувала вивчення відомих у світі відповідних наукових даних у галузі фізики та техніки ВІС та СІМП, техніки та електрофізики високих напруг, теоретичної електротехніки, фізики блискавки та сильнострумowego газового розряду, теоретичних основ електромагнітного екранування, теплопровідності та опору матеріалів, електродинаміки суцільних сред, МІОМ, силового електроапаратобудування, ЕМС, ЕМСТ та досягнень у даних сферах провідних вчених та фахівців: С.М.Аполонського, В.К.Аркадьєва, Е.М.Базеляна, Ю.В.Батигіна, В.М.Бондалетова, В. О. Бржезицького, Е.Ф.Венса, Г.А. Гулого, Н. І. Гумерової, К.С.Демирчяна, Д. К. Єгера, Ю. П. Емца, В. Т. Ерофєєнка, С. К. Камзолова, Г.Кнопфеля, Е. В. Колесникова, Е. С. Колечицького, М. В. Коровкіна, М. В. Костенка, А.М.Кравченка, В. І. Кравченка, І. П. Кужекїна, В. П. Ларїонова, М.О.Леонтовича, В. М. Михайлова, К.К.Намитоква, О. Б. Новгородцева, Є. І. Петрушенка, О. Д. Подольцева, І.М.Романенка, Б. С. Стогнія, С. П. Тимошенка, Л. Т. Хіменко, Г. М. Цицикяна, В. Й. Чабана, Г. А. Шнеєрсона, М. А. Юмана та ін.

Наукова новизна роботи заключається у наступному:

- розроблені та досліджені одномірні математичні моделі нестационарного лінійного ПЕ у суцільному та порожнистому круглих циліндричних провідниках кінцевої товщини та необмеженої довжини при діянні на них аксіальних ВІС та азимутальних СІМП, що виникають при ПУБ з імпульсним струмом блискавки 2/50 мкс;
- досліджено вплив нестационарного лінійного ПЕ у провідної оболонці електрично коротких ЕККЗ на зниження у кабелях зв'язку атмосферних перенапруг, що викликаються ПУБ в їх оболонку, та надані практичні пропонування, що забезпечують при ПУБ підвищення електромагнітної стійкості ЕККЗ; вперше у часовому представленні отримано аналітичне співвідношення для повного опору зв'язку круглої циліндричної провідної оболонки електрично короткого ЕККЗ, що випробовує пряме діяння імпульсного струму блискавки 2/50 мкс;
- розроблена та досліджена одномірна математична модель нестационарного лінійного ПЕ у порожнистому провідному круглому циліндру необмеженої довжини та довільного поперечного перерізу, що випробовує діяння напруженості зовнішнього однорідного аксіального ІМП, що змінюється з часом по закону експоненціально затухаючої синусоїди;

- розроблені нові методики та на їх основі вперше встановлені особливості впливу нестационарного лінійного ПЕ на процес імпульсного енерговиділення та ІЕПА для суцільного та порожнистого круглих циліндричних провідників кінцевих поперечних розмірів з аксіальним імпульсним розрядним струмом ВЕФУ з ЄНЕ та імпульсним струмом блискавки 2/50мкс;
- вивчені особливості впливу нестационарного лінійного ПЕ у суцільних та порожнистих круглих циліндричних проводах простішої однорідної двохпровідної ВЛ необмеженої довжини на перекручення та затухання поширюючихся вздовж неї імпульсного мікросекундного струму блискавки 2/50 мкс та імпульсного наносекундного розрядного струму ВЕФУ 5/200 нс;
- розроблена нова методика приблизного чисельного розрахунку ХЕМП при розряді однорідної одинарної КФЛ кінцевої довжини на активну зосереджену навантаженість через ідеальний ключ або сильнострумний газовий комутатор (ГК), що базується на знаходженні у лапласових образах вирішення системи телеграфних рівнянь (СТР) та його послідуєчим чисельному зверненні у простір оригіналів на основі застосування розкладання тимчасових залежностей формуючих імпульсів напруги (струму) у узагальнені ряди Фур'є по ортогональним функціям зміщених поліномів Лежандра;
- розроблена на основі метода чисельного обернення перетворення Лапласа нова методика приблизного чисельного розрахунку ХЕМП при розряді однорідної одинарної КФЛ кінцевої довжини через іскрової проміжок сильнострумного ГК на однорідну багатопровідну ВЛ кінцевої довжини з суцільними та порожнистими круглими циліндричними проводами та з довільною навантаженістю;
- отримано узагальнене співвідношення проміж компонентами імпульсного електромагнітного поля (ІЕМП) на поверхні ізотронного провідника довільної геометричної форми; введено та математично визначено поняття перехідного поверхневого опору для ізотронного провідника та отримані формули для приблизного аналітичного розрахунку перехідних поверхневих опорів стосовно до випробовуючим діяння ВІС та СІМП довільної часової форми необмеженим по довжині нерухомим провідним об'єктам різної геометричної форми (пластини, круглих суцільного та порожнистого циліндрів, суцільної прямокутної шини, суцільних та порожнистих куль);
- розроблені нові приблизні граничні умови для необмежених по довжині нерухомих провідних об'єктів плоскої, циліндричної, прямокутної та сферичної форм довільної товщини, що випробовують діяння ВІС та СІМП довільної часової форми;
- розроблені та досліджені одномірні чисельні моделі нестационарного нелінійного ПЕ у суцільному та порожнистому круглих циліндричних провідниках кінцевої товщини та необмеженої довжини, що випробовують діяння імпульсного струму блискавки 2/50 мкс, експоненціально затухаючого по синусоїді імпульсного розрядного струму ВЕФУ з ЄНЕ та імпульсного струму КЗ промислової частоти;
- розроблені методики по визначенню електротермічної стійкості голих та ізольованих круглих циліндричних проводів та кабелів при діянні на них імпульсного струму блискавки 2/50 мкс, та експоненціального затухаючого по синусоїді імпульсного струму розряду ВЕФУ з ЄНЕ;
- визначені усереднені амплітудні найбільш допустимі та критичні чисельні значення щільності струму для голих та ізольованих круглих циліндричних

- проводів та кабелів, що випробовують діяння імпульсного струму блискавки 2/50 мкс, експоненціально затухаючого по синусоїді імпульсного розрядного струму ВЕФУ з ЄНЕ та імпульсного струму КЗ промислової частоти;
- вперше встановлені межі застосування найпростішої нелінійної електротеплової моделі для круглих суцільних мідних та алюмінієвих циліндричних проводів, що схильні до діяння експоненціально затухаючого по синусоїді імпульсного розрядного струму ВЕФУ з ЄНЕ, імпульсного струму блискавки 2/50 мкс та імпульсного струму КЗ промислової частоти;
 - розроблені та досліджені приблизні одно- та двомірні математичні моделі для аналітичного розрахунку електромагнітного та електромеханічного ефектів при ПУБ з імпульсним струмом блискавки 2/50 мкс у тонкостінну металеву обшивку ЛА;
 - сформульовано безрозмірний критерій електромеханічної стійкості при ПУБ плоского елемента металеві обшивки ЛА та надані практичні рекомендації по її підвищенню до електродинамічної дії ПУБ;
 - розроблена та досліджена приблизна двомірна математична модель крайового механічного ефекту при стисненні круглої тонкостінної циліндричної металеві оболонки тисненням СІМП у індукторі з КМП прямокутного поперечного перерізу у робочій зоні.

Автор захищає сукупність наукових результатів та технічних рішень, які основані на дослідженнях перехідних електромагнітних, електротеплових та електромеханічних процесів при діянні ВІС та СІМП природного та штучного походження на провідні об'єкти, які складають вирішення значної комплексної науково-прикладної проблеми, щодо забезпечення електромагнітної, електротеплової та електромеханічної стійкостей ряду провідних об'єктів СІТ, електроенергетики, зв'язку та аерокосмічної техніки до діяння на них ВІС та СІМП. Дані наукові результати та технічні рішення включають:

- основи теорії нестационарного лінійного та нелінійного ПЕ у суцільних та порожнистих циліндричних провідниках при діянні на них ВІС та СІМП, що характерні для ПУБ, сильнострумове затухаючого по синусоїді розряду ВЕФУ з ЄНЕ та КЗ в ланцюгах промислової частоти;
- методику розрахування в перехідному режимі наведених імпульсних напруг та струмів у електрично короткому ЕККЗ з круглою суцільною циліндричною оболонкою, що випробовує діяння ПУБ з імпульсним струмом блискавки 2/50 мкс;
- методики розрахування у нестационарному режимі процесу імпульсного електровиділення та ІЕПА для суцільних та порожнистих круглих циліндричних провідників з імпульсним струмом блискавки 2/50 мкс та затухаючим по синусоїді імпульсним розрядним струмом ВЕФУ з ЄНЕ;
- методики розрахування перехідних електромагнітних процесів у двохпровідній ВЛ з імпульсами струму 2/50 мкс та 5/200 нс та хвильових процесів при розряді однорідної одинарної КФЛ кінцевої довжини на зосереджену активну навантаженість або однорідну багатопровідну ВЛ кінцевої довжини з довільною навантаженістю;
- нові приблизні граничні умови для провідних об'єктів плоскої, циліндричної, прямокутної та сферичної форм, які випробовують діяння ІЕМП довільної часової форми;
- методики по визначенню електротермічної стійкості, найбільш допустимих та критичних значень щільності струму для голих та ізольованих циліндричних

- проводів та кабелів при ПУБ, сильнотривим затухаючим по синусоїді розряді ВЕФУ з ЄНЕ та КЗ у силових ланцюгах промислової частоти;
- методики по визначенню межі застосування найпростішої нелінійної електротеплової моделі для круглих суцільних мідних та алюмінієвих циліндричних проводів з затухаючим по синусоїді імпульсним розрядним струмом ВЕФУ з ЄНЕ, імпульсним струмом блискавки 2/50мкс та імпульсним струмом КЗ промислової частоти;
- основи приблизного розрахунку електромагнітного та електромеханічного ефектів при ПУБ у металеву обшивку ЛА;
- основи приблизного розрахунку крайового механічного ефекту при деформації металеві оболонки тисненням СІМП у індукторі з КМП з плоскими торцями;
- нові критерії по забезпеченню електромагнітної стійкості при ПУБ електрично короткого ЕККЗ та електромеханічної стійкості при ПУБ металеві обшивки ЛА;
- нові науково-технічні рішення та практичні рекомендації з забезпечення електромагнітної, електротермічної та електромеханічної стійкостей проводів, кабелів та металевих оболонок об'єктів СІТ, електроенергетики, зв'язку, авіаційної та ракетно-космічної техніки, що випробовують діяння ВІС та СІМП при ПУБ, сильнотривим затухаючим по синусоїді розряді ВЕФУ з ЄНС та КЗ у ланцюгах промислової частоти.

Практичне значення роботи заключається у наступному:

- розроблені інженерні методики аналітичного розрахунку у перехідному режимі активного опору, індуктивності та добротності круглих суцільного та порожнистого циліндричних провідників з імпульсним розрядним струмом ВЕФУ з ЄНЕ та імпульсним струмом блискавки 2/50мкс використовуються при розробці та створенні ВЕФУ з ЄНЕ, розрядні ланцюги яких утримують циліндричні струмоведучі частини;
- надані практичні рекомендації по підвищенню електромагнітної стійкості електрично короткого ЕККЗ до діяння ПУБ;
- розроблені інженерні методики чисельного розрахунку ХЕМП у розрядних ланцюгах ВЕФУ з КФЛ та ВЛ знайшли практичне застосування при розробці та створенні унікальних випробних ВЕФУ, що генерують ВІС та формують потужні ЕМІ у повітряних об'ємах;
- розроблені приблизні граничні умови для ІЕМП на поверхні провідних об'єктів різної геометричної форми представляють велику практичну цінність при вирішенні електродинамічних задач у СІТ при отриманні ВІС та СІМП, області ЕМС, ЕМСТ, електромагнітного екранування, технології МІОМ, радіолокації та ідентифікації ЛА;
- розроблені методики по визначенню електротермічної стійкості голих та ізольованих проводів та кабелів до діяння ВІС різної часової форми, встановлені для них значення найбільш допустимих та критичних щільностей імпульсного струму блискавки 2/50 мкс, що затухає по синусоїді розрядного струму ВЕФУ з ЄНЕ та струму КЗ промислової частоти дозволяють забезпечити підвищення надійності роботи та строку служби кабельно-провідникової продукції об'єктів СІТ, зв'язку, ЕЕС та АКС в умовах діяння на них ВІС та СІМП;
- встановлені межі застосування найпростішої нелінійної електротеплової моделі дозволяють істотно спростити електротеплові розрахунки круглих

суцільних мідних та алюмінієвих циліндричних проводів при діянні на них ВІС та СІМП;

- надані практичні рекомендації по забезпеченню електротермічної та електромеханічної стійкостей металеві обшивки ЛА до діяння ПУБ;
- встановлена зона впливу крайового механічного ефекту у індукторі з КМП на напружено-деформований стан стисненої тисненням СІМП круглої циліндричної металеві оболонки уявляє практичну значущість для технології МІОМ.

Реалізація результатів роботи. Результати роботи знайшли практичну реалізацію та впровадження при розробці та створенні нових та модернізації існуючих унікальних випробних ВЕФУ, що утримують КФЛ та ВЛ з циліндричними струмопроводами та призначених для отримання ВІС та потужних ЕМІ (Науково-дослідний та проектно-конструкторський інститут (НДПКІ) “Молнія” ХДПУ, м. Харків); у технології МІОМ при визначенні електротермічної стійкості кабельно-провідникової продукції ВЕФУ з ЄНЕ та деформації тисненням СІМП у індукторі з КМП з плоскими торцями трубчастих металевих заготівок (Науково-дослідна лабораторія МІОМ ХДПУ, м. Харків); при забезпеченні стійкості від блискавки об'єктів ракетно-космічної техніки (Державне конструкторське бюро (ДКБ) “Південне” ім.М.К.Янгеля, м. Дніпропетровськ).

Особистий внесок автора. У колективно виконаних роботах особистий внесок автора складається у науковому обґрунтуванні основних ідей, математичному ставленні задач, виборі методів їх рішення, аналізі одержаних теоретичних та експериментальних результатів, формулюванні висновків, розробці узагальненого граничного співвідношення між компонентами ІЕМП на поверхні провідних об'єктів, приблизних граничних умов імпульсної електродинаміки та критеріїв електромагнітної, електротермічної та електромеханічної стійкостей досліджених провідних об'єктів до діяння ВІС та СІМП. Автор самостійно розроблені питання, що зв'язані з розробкою та розвитком теорії перехідних електромагнітних, електротеплових і електромеханічних процесів у досліджених провідних об'єктах СІТ, електроенергетики, зв'язку і аерокосмічної техніки при діянні на них ВІС та СІМП природного та штучного походження.

Апробація роботи. По основним результатам дисертаційної роботи зроблено 12 наукових доповідей на міжнародних, всесоюзних та республіканських симпозиумах та науково-технічних конференціях, у тому числі на:

- 7-му (м. Дрезден, Німеччина, 1991 р.), 9-му (м. Грац, Австрія, 1995 р.) та 10-му (м. Монреаль, Канада, 1997 р.) міжнародних симпозиумах по високовольтній імпульсній техніці;
- 11-му (1992 р.), 12-му (1994 р.) та 13-му (1996 р.) міжнародних симпозиумах по ЕМС (м. Вроцлав, Польща);
- 1-му міжнародному симпозиумі з проблем ЕМС (м. Санкт-Петербург, Росія, 1993 р.);
- 24-й міжнародній конференції по захисту від блискавки (м.Бірмінгем, Великобританія, 1998 р.);
- 1-й всесоюзній науково-технічній конференції по стійкості РЕЗ (м.Харків, Україна, 1991 р.);
- 4-й науково-технічній конференції по проблемам нелінійної електротехніки (м. Київ, Україна, 1992 р.).

Результати роботи у 1993-1999 р.р. обмірковувались та одержали схвалення на засіданнях науково-технічної ради НДПКІ “Молнія” ХДПУ та вченої ради ХДПУ.

Публікації. Основні результати дисертації відображені у 23 статтях, у т.ч. 10 особистих, та 12 наукових працях міжнародних, всесоюзних та республіканських науково-технічних конференцій та симпозіумів.

Структура і обсяг роботи. Дисертаційна робота складається зі вступу, шести розділів, заключення, списку використаних джерел, що включає 215 найменування та восьми додатків. Основний текст роботи викладено на 289 сторінках машинописного тексту, ілюструється 95 малюнками та 13 таблицями при повному обсязі роботи на 380 сторінках.

Зміст роботи

У вступі обґрунтована актуальність теми дисертації, відображена наукова новизна та практична цінність роботи, приведені дані о зв'язку роботи з науковими планами організації, де виконувалась робота, надані свідчення по впровадженню та апробації результатів, про особистий внесок автора та публікації по темі дисертації.

У першому розділі дається аналіз сучасного питання, що зв'язано з особливостями та результатами електромагнітного, електротеплового та електромеханічного взаємодій ВІС та СІМП природного та штучного походження з провідними об'єктами СІТ, електроенергетики, зв'язку, авіаційної та ракетно-космічної техніки. Сформульовані ціль роботи та основні напрямлення досліджень, безпосередньо зв'язаних з рішенням проблемних задач дисертації.

У другому розділі розглянуто математичне моделювання нестационарного лінійного ПЕ у суцільному () та порожнистому () немагнітних круглих циліндричних ізотропних провідниках кінцевої товщини з зовнішнім b та внутрішнім радіусами та необмеженої довжини при діянні на них ВІС та СІМП, що виникають при ПУБ та відтворенні у ВЕФУ потужного наносекундного імпульсу розрядного струму для випробування провідних об'єктів СІТ, електроенергетики, зв'язку, авіаційної та ракетно-космічної техніки. Дослідження нестационарного ПЕ у розглянутих провідниках з азимутальним та аксіальним ІМП, напруженість якого змінюється з часом по довільному закону та задовольняє умовам Дирихле, виявляється вихідним етапом для розрахунку в них імпульсних теплових втрат, їх ІЕПА, наведених при ПУБ імпульсних напруг та струмів в ЕККЗ та визначення у імпульсному режимі екранованих характеристик циліндричних провідних оболонок.

Вперше визначені магнітна та електрична складові перехідної реакції у досліджених циліндричних провідниках на діяння одиничного ступінчастого імпульсу (ОСІ) аксіального струму. З допомогою інтеграла Дюамеля отримані аналітичні вирази, що дозволяють виконувати розрахунки нестационарного лінійного ПЕ у вказаних циліндричних провідниках, що випробовують діяння двохекспоненціального імпульсу струму блискавки 2/50мкс з коефіцієнтами форми α_1, α_2 та двохекспоненціального імпульсу 5/200 нс з коефіцієнтами форми α_3, α_4 розрядного струму ВЕФУ.

Показано, що у випадку діяння на порожнистий провідник аксіального струму блискавки 2/50 мкс амплітудою вирази для розрахунку напруженостей та у його стінці мають слідуєчий безрозмірний вигляд:

$$; \quad (2.6)$$

Виконано чисельний аналіз сходимості рядів у отриманих виразах, що описують просторово-часові змінення напруженостей азимутального магнітного та аксіального електричного E_{zi} полів у досліджених провідниках з роздивляємими імпульсами струму. При цьому показано, що для практичних діапазонів змінення геометричних параметрів круглих циліндричних провідників при числі членів рядів рівним $k \geq 200$ погрішність розрахунків ІЕМП у них складає менше 1%. Описані особливості проявлення

нестационарного лінійного ПЕ у круглому суцільному циліндричному алюмінієвому провіднику з імпульсним аксіальним струмом блискавки 2/50 мкс. Показано, що у процесі проникнення у глибину немагнітного ізотропного матеріалу циліндричних провідників уніполярного імпульсу аксіального струму блискавки 2/50 мкс відбувається згладжування його фронту та зменшення його амплітуди, що викликаються імпульсними тепловими втратами енергії.

Розроблена методика уточненого розрахунку при ПУБ у ЕККЗ наведених у електрично короткому однокоаксіальному кабелі зв'язку з круглої циліндричної суцільної немагнітної ізотропної провідної оболонкою довільної товщини імпульсних напруг та струмів, що дозволяє при прямому діянні на оболонку кабелю першої компоненти імпульсного струму блискавки 2/50 мкс одержувати кількісні залежності по впливу нестационарного лінійного ПЕ у оболонці кабелю на процес формування наведених у ньому імпульсних напруг та струмів $i_H(t)$. Вперше у часовому представленні отримано аналітичне співвідношення для повного опору зв'язку круглої циліндричної суцільної немагнітної провідної оболонки ЕККЗ, що випробовує пряме діяння аперіодичного двохекспоненціального імпульсу струму блискавки 2/50 мкс.

Показано, що при ПУБ з постійною часу спаду аперіодичного двохекспоненціального імпульсу струму блискавки 2/50 мкс вплив нестационарного лінійного ПЕ у оболонці ЕККЗ на зниження у кабелях зв'язку атмосферних перенапруг найбільш сильно проявляється для ЕККЗ з постійною часу оболонки кабелю рівною. Виконання на практиці даного співвідношення забезпечує при ПУБ істотне підвищення електромагнітної стійкості ЕККЗ.

Вперше отримані узагальнені та приватні формули для точного розрахування та аналізу нестационарного лінійного ПЕ у необмеженому по довжині немагнітному ізотропному порожнистому круглому провідному циліндрі довільних поперечних розмірів, що збуджується циліндричною хвилею зовнішнього однорідного аксіального ІМП, що змінюється у часі t по довільному закону та закону експоненціально затухаючої синусоїди.)

Показано, що для практично важливого у СІТ випадку змінення зовнішнього аксіального ІМП по закону експоненціально затухаючої синусоїди вирази для розрахунку напруженостей та у стінці порожнистого провідного циліндру мають слідуючий безрозмірний вигляд:

, (2.15)

де;

— відповідно амплітуда першої полухвилі, коефіцієнт затухання та кругова частота напруженості ІМП; φ_k — корні рівняння; , — відповідно функції Беселя 1-го та 2-го роду другого порядку.

Уявлені особливості у розподілах у імпульсному режимі напруженостей аксіального магнітного та азимутального електричного $E_{\theta 2}$ полів у тонкостінному суцільному алюмінієвому циліндрі, що випробовує діяння експоненціально затухаючого по синусоїді зовнішнього однорідного аксіального ІМП, що формує у ВЕФУ з ЄНЕ. Встановлено, що при числі членів у рядах для напруженостей аксіального ІМП H_{z2} та азимутального імпульсного електричного поля (ІЕП) рівному $k \geq 100$ погрішність розрахунку ІЕМП у тонкостінному () алюмінієвому циліндрі не перевищує 1%. З аналізу отриманих результатів слідує, що в імпульсному режимі амплітуда першої полухвилі напруженості азимутального ІЕП $E_{\theta 2}$ на зовнішній поверхні роздивляючого алюмінієвого циліндра значно менше (приблизно на 31%), ніж у стаціонарному. Для порівняння слідує

відмітити, що згідно відомим даним у випадку проникнення плоскої ЕМХ у масивний циліндричний провідник різниці, яка розглядається для напруженості ІЕП, складає примірно 12%.

Третій розділ присвячено розгляданню питань, зв'язаних з розробкою методів розрахунку імпульсних теплових втрат та ІЕПА (активного опору, індуктивності та добротності) для суцільного та порожнистого немагнітних ізотронних круглих циліндричних провідників з урахуванням впливу нестационарного лінійного ПЕ. На основі закону Джоуля-Ленца розроблена методика розрахунку у перехідному режимі теплової енергії, що виділяється у немагнітних ізотропних суцільному та порожнистому круглих циліндричних провідниках довільної товщини при діянні на них аксіального імпульсного струму, що змінюється з часом t по законам експоненціально затухаючого по синусоїді та аперіодичного двохекспоненціального імпульсів розрядного струму ВЕФУ з ЄНЕ. Описані особливості процесу імпульсного енерговиділення у досліджених циліндричних провідниках при діянні на них розглядаючих імпульсів струму. З отриманих результатів слідує, що виділювані у імпульсному режимі у циліндричних провідниках значення теплової енергії істотно залежать від відносних товщин для суцільного та для порожнистого провідників, де Δ_1, Δ_2 — товщини відповідних скін-шарів. При та, тобто для масивних провідників, вплив нестационарного лінійного ПЕ на значення розсіювачої у провідниках теплової енергії зростає та стає особливо істотним при оцінці балансу електромагнітної енергії у розрядному контурі ВЕФУ з ЄНЕ.

Показано, що у перехідному режимі для незатухаючого синусоїдального імпульсного струму (γ — відповідно коефіцієнт затухання та кругова частота розрядного струму) на ділянці другого полуперіоду коливаний значення теплової енергії, що виділяється у циліндричних провідниках, досягають своїх максимальних значень. Для немасивних циліндричних провідників ($\gamma=1$) різниці у значеннях у залежності від номеру полуперіоду коливаний імпульсного синусоїдального струму не підвищують 1%, що з'являється помітним ослабленням впливу нестационарного лінійного ПЕ на протікаючі всередині немасивних циліндричних провідників перехідні електромагнітні процеси.

Показано, що у перехідному режимі для усереднених на довільному часовому інтервалі $[t_H, t_k]$ значень активного опору R_i , внутрішньої індуктивності L_i та добротності Q_i розглядаючих циліндричних провідників довільної товщини справедливі співвідношення: На основі (3.1) — (3.3) та результатів розрахунку нестационарного лінійного ПЕ вперше розроблені методики розрахунку у імпульсному режимі значень ІЕПА R_i, L_i та Q_i для суцільного та порожнистого круглих циліндричних провідників довільного поперечного перерізу з аксіальним імпульсним струмом, що змінюється з часом t по законам експоненціально затухаючої синусоїди та аперіодичного двохекспоненціального імпульсу струму блискавки. Встановлено, що у першому випадку вплив нестационарного лінійного ПЕ на імпульсні електричні параметри R_i, L_i та Q_i найбільш сильно проявляється для масивних суцільного та порожнистого циліндричних провідників у інтервалі двох перших полухвиль імпульсного струму. При цьому активні опори R_i розглядаючих провідників у перехідному режимі значно менші, а їх внутрішні індуктивності L_i та добротності Q_i більші, чим при встановившемся. Показано, що ці різниці у значеннях ІЕПА R_i, L_i та Q_i можуть складати до 60% у залежності від значень співвідношень товщин циліндричних провідників та скін-шарів Δ_i та значень коефіцієнту затухання δ синусоїдального струму. Для тонкостінних суцільного () та порожнистого ()

циліндричних провідників вплив нестационарного лінійного ПЕ на їх ІЕПА незначно (менше 9%). У другому випадку встановлено, що на ділянці тривалості τ_p імпульсу струму блискавки 2/50 мкс усереднені значення активних опорів R_i становлять у декілька разів більше, а усереднені значення внутрішніх індуктивностей L_i масивних циліндричних провідників у декілька разів менше, ніж їх електричні параметри R_{oi} та L_{oi} при постійному струмі. Виявлено, що на дільниці фронту τ_f імпульсу струму блискавки 2/50 мкс для масивних суцільного та порожнистого циліндричних провідників різниці у значеннях електричних параметрів R_i , L_i та R_{oi} , L_{oi} зростають та досягають десяти та більш разів. Вперше розрахунковим шляхом показано, що у імпульсному режимі при виконанні умови для випадку аксіального діяння на порожнистий циліндричних провідник експоненціально затухаючою по синусоїді розрядного струму ВЕФУ з ЄНЕ, а також при умові для випадку діяння на розглядаючий провідник імпульсу струму блискавки 2/50 мкс практично відсутня залежність його ІЕПА від часових параметрів імпульсного струму (кругової частоти ω , тривалості фронту τ_f та тривалості імпульсу τ_p), що діє на немагнітний ізотронний порожнистий циліндричних провідник, що має важливе практичне значення при розробці та створенні трубчастих шунтів для виміру ВІС. Отримані нові дані про вплив співвідношення товщин суцільного та порожнистого циліндричних провідників та скін-шарів Δ_i на значення їх ІЕПА у імпульсному режимі дозволяють уточнити вибір товщини стінки циліндричної ошиновки ВЕФУ з ЄНЕ, що призначені для отримання ВІС та СІМП, у залежності від значень глибини проникнення Δ_i ІЕМП у матеріал її струмопроводів та функціонального призначення їх розрядного контуру. Крім того, отримані результати дозволяють істотно уточнити з урахуванням впливу нестационарного лінійного ПЕ розрахунки імпульсних опорів циліндричних струмоведучих частин грозозахисних заземлень, що, у свою чергу, приводить до більш точного аналітичного визначення поверхневої температури у круглих циліндричних відводів від блискавки.

У четвертому розділі дисертації приведені результати досліджень по розробці методів розрахунку та аналізу перехідних процесів та ХЕМП у однорідних ВЛ та КФЛ кінцевої довжини ЕЕС та розрядних ланцюгів ВЕФУ для отримання ВІС та потужних ЕМІ з урахуванням впливу нестационарного лінійного ПЕ у циліндричних струмопроводах. Розроблені методики приблизного аналітичного розрахунку перехідних електромагнітних процесів у найпростішій однорідній двохпровідній ВЛ “одиначний циліндричний провід — провідна плоскість землі” необмеженої довжини, що випробовує діяння мікросекундного імпульсу струму блискавки 2/50 мкс або наносекундного імпульсу розрядного струму ВЕФУ 5/200нс, що дозволяють кількісно оцінити вплив нестационарного лінійного ПЕ та зв'язаного з ним імпульсного тепловиділення у немагнітних суцільному та порожнистому круглих циліндричних проводах довільної товщини, а також геометричних та електрофізичних параметрів дослідженої ВЛ на викривлення та затухання, що поширюються вздовж неї вказаних імпульсів струму, що викликають з'явлення у проводах ЕМХ довжиною λ . Показано, що для “великих” довжин пробігу імпульсної хвилі струму блискавки 2/50 мкс (м) або імпульсної хвилі розрядного струму ВЕФУ 5/200 нс (м) імпульсні теплові втрати енергії у масивних суцільному () та порожнистому () циліндричних проводах дослідженої ВЛ викликають значне сглажування (уширення) фронту та затухання амплітуд розглядаючих імпульсів

струму та імпульсів радіального ІЕП поблизу проводів ВЛ. Для немасивних суцільних (та порожнистих () циліндричних проводів ВЛ деформації фронту хвиль струму та радіального ІЕП з-за імпульсних теплових втрат енергії у проводах ВЛ не відбувається, а має місце майже їх затухання. При цьому викривлень на спаді хвиль струму та імпульсів радіального ІЕП практично не спостерігається, а їх затухання відбувається тим інтенсивніше, чим менше значення висоти підвіски h проводів над землею, зовнішнього радіусу b , товщини стінки $(b-a)$ та питомої електропровідності γ_i матеріалу проводів ВЛ. Отримані дані по розрахунку перехідних електромагнітних процесів у ВЛ з імпульсними струмами 2/50 мкс та 5/200 нс можуть бути використані при оцінці ЕМС та ЕМСТ ряду технічних засобів (ВЛ ЕЕС, ВЛ ВЕФУ, засобів зв'язку) до діяння ВІС та потужних ЕМІ.

Розроблені методики приблизного чисельного розрахунку ХЕМП при розряді одинарної однорідної КФЛ кінцевої довжини через ідеальний ключ або сильнострумний ГК на активну зосереджену навантаженість R_H або однорідну багатопровідну ВЛ кінцевої довжини з суцільними та порожнистими циліндричними проводами та з довільної навантаженістю Z_H . Чисельні розрахунки основані на знаходженні у лапласових образах рішень СТР та їх послідувачем чисельном оберненні у простір оригіналів на базі застосування розкладання часових залежностей формуючих у КФЛ, ВЛ та на навантажені імпульсів напруг (струму) у узагальнені ряди Фур'є по ортогональним функціям зміщених поліномів Лежандра. Визначені умови застосування СТР у ланцюгах розряду однорідної одинарної КФЛ на однорідну багатопровідну ВЛ та активне (довільне) навантаження. Розроблені методики дозволяють у хвильовому режимі визначати вплив нестационарного лінійного ПЕ та викликаних їм імпульсних теплових втрат енергії у циліндричних струмопроводах КФЛ та проводах ВЛ, геометричних та електрофізичних параметрів КФЛ, ВЛ, ГК та навантаження та втрат на випромінювання у ВЛ на амплітудно-часові параметри (АЧП), що формуються у КФЛ, ВЛ та на навантаженості імпульсів напруги та струму. Встановлено, що при чисельних розрахунках ХЕМП у дослідженому розрядному ланцюгу КФЛ з багатопровідною ВЛ на основі метода чисельного обернення перетворення Лапласа з сумарною погрішністю не більше 5% число ланцюжків у повному внутрішньому операторному опорі циліндричних струмопроводів КФЛ та ВЛ може не перевищувати 10, а число зміщених поліномів Лежандра — 11. Показано, що у хвильовому режимі імпульсні теплові втрати енергії у трубчастих сталевих циліндричних струмопроводах дослідженої КФЛ викликають збільшення (до 17%) тривалості фронту та зменшення (до 14%) амплітуди імпульсів напруги (струму) на активної зосередженої навантаженості R_H . У результаті чисельних розрахунків встановлено, що при розряді одинарної КФЛ застосування у ВЛ немагнітних циліндричних проводів замість феромагнітних забезпечує істотне зменшення тривалості фронту та затухання формуючих у ВЛ імпульсів напруги та струму. Показано, що у хвильовому режимі урахування імпульсних теплових втрат енергії у масивних трубчастих сталевих циліндричних струмопроводах КФЛ та у суцільних мідних циліндричних проводах ВЛ доводить до збільшення (до 25%) тривалості фронту та зменшенню (до 12%) амплітуди формуючих у дослідженої ВЛ імпульсів напруги (струму), а втрати на випромінювання у ВЛ доповняльно збільшують затухання імпульсів напруги (до 15% у середині та до 28% у кінці ВЛ) та струму (до 14% у середині та до 27% у кінці ВЛ). Використання у ВЛ трубчастих алюмінієвих циліндричних струмопроводів по зрівненню з суцільними мідними циліндричними проводами дозволяє у розрядному ланцюгу однорідної одинарної КФЛ зменшити (до 10%) тривалість фронту формуємих у середині

дослідженої ВЛ імпульсів напруги, але одночасно при цьому та збільшити (до 15%) їх затухання.

З проведеного зрівняння запропонованого алгоритму чисельного розрахунку ХЕМП у ланцюгу розряду однорідної одинарної КФЛ на активну навантаженість R_H , основанийого на чисельному оберненні перетворення Лапласа, з відомими методами розрахунку хвильових процесів у електричних ланцюгах з розподіленими параметрами (методом однорідних ланцюгових схем та методом оберненого перетворення Фур'є по Карсону) слідує, що описаний у дисертації алгоритм вигідно відрізняється від вказаних відомих методів розрахунку як у частині затрат процесорного часу, так і вимагаемого об'єму пам'яті ЕЦВМ (ПЕВМ). Отримані результати по розрахунку ХЕМП у досліджених електричних ланцюгах знайшли прикладне застосування при розробці та створення унікальних випробувальних ВЕФУ з одинарними КФЛ і багатопровідними ВЛ для отримання ВІС та потужних ЕМІ.

П'ятий розділ присвячено розробці приблизних граничних умов для нерухомих немагнітних ізотропних провідних об'єктів різної геометричної форми, що використовані у СІТ, авіаційної та ракетно-космічної техніці, електроенергетиці і зв'язку при діянні на них ВІС і СІМП, що змінюються з часом t по довільному закону. У даному розділі сформульовано узагальнене граничне співвідношення імпульсної електродинаміки для ІЕМП, що діють на поверхню S провідних об'єктів довільної форми, у такому вигляді: З (5.2) слідує, що перехідний поверхневий опір провідного об'єкту чисельно рівно напруженості ІЕП на його поверхні S , щовипробовує діяння ОСІ напруженості зовнішнього магнітного поля $I_H(t)$. З допомогою (5.2) отримані формули для аналітичного розрахунку перехідних поверхневих опорів стосовно до випробовуючим діянню ВІС та СІМП необмеженим по довжині та довільного поперечного перерізу нерухомим немагнітним ізотропним провідним пластини, суцільного та порожнистого круглих циліндрів при їх одно- та двостороннім електромагнітному збудженні аксіальним та азимутальним ІПМ. Подібні формули для $Z_s(t)$ отримані також для двопровідного коаксіального кабелю, провідних суцільної прямокутної шини, суцільних та порожнистих куль.

На основі узагальненого співвідношення (5.1) розроблені приблизні граничні умови для нерухомих немагнітних ізотропних провідних об'єктів плоскої, циліндричної, прямокутної та сферичної форм довільної товщини, що випробовують діянню ВІС та СІМП довільної часової форми. Встановлено, що співвідношення між напруженостями ІМП і ІЕП на поверхні S досліджених провідних об'єктів та їх перехідний поверхневий опір $Z_s(t)$ істотно залежить від просторової орієнтації вектора напруженості діючого ІМП відносно поздовжньої осі об'єкту. Певність отриманих аналітичних граничних співвідношень підтверджена результатами приведених чисельних розрахунків та їх зрівнянням з відомими даними. Визначені технічні області використання розроблених приблизних граничних умов імпульсної електродинаміки для нерухомих немагнітних ізотропних провідних об'єктів, схильних діянню ВІС та СІМП.

У шостому розділі приведені результати математичного і фізичного моделювання перехідних електромагнітних, електротеплових та електромеханічних процесів у немагнітних ізотропних провідних об'єктах СІТ, електроенергетики та аерокосмічної техніки при діянні на них ВІС та СІМП. Розроблені та досліджені одномірні математичні моделі та алгоритми чисельного вирішення за допомогою методу кінцевих різниць нелінійних електротеплових задач для немагнітних ізотропних суцільного і порожнистого круглих циліндричних провідників кінцевої товщини та необмеженої

довжини, що випробовують у умовах конвективного теплообміну з оточуючим середовищем аксіальне діяння імпульсного струму блискавки 2/50мкс, експоненціально затухаючого по синусоїді імпульсного розрядного струму ВЕФУ з ЄНЕ та імпульсного струму КЗ промислової частоти. У розроблених моделях прийнято, що питома електропровідність γ_i матеріалу провідників є змінною величиною, що залежить від теплоутримання (температури) провідників, а питома теплоємність c_{0i} та коефіцієнт теплопровідності λ_{0i} матеріалу досліджених провідників приймають постійні значення. Показано, що нестационарні нелінійні електромагнітні та електротеплові процеси у досліджених циліндричних струмопроводів для напруженості азимутального ІМП $H_{\theta i}$ та перевищення температури Θ_i описуються слідуючими диференціальними рівняннями 2-го порядку з частинними похідними:

Встановлені особливості виявлення нестационарного нелінійного ПЕ у суцільному та трубчастому мідному та алюмінієвому круглих циліндричних проводах при діянні на них вказаних вище виглядів ВІС. Показано, що при аналізі діяння розгляданих видів аксіального імпульсного струму на циліндричні провідники на ділянках тривалості перехідних процесів впливом конвективної тепловіддачі з їх поверхней, що охолоджуються високошвидкісним повітряним потоком, та теплопровідності матеріалу провідників у інженерних електротеплових розрахунках можливо зневажати.

На основі результатів розрахунків нелінійних електромагнітних і електротеплових процесів розроблені нові методики по визначенню електротермічної стійкості голих та ізольованих круглих немагнітних ізотропних циліндричних проводів та кабелів з полівінілхлоридною (ПВХ), резиновою (Р) та поліетиленовою (ПЕ) ізоляцією з суцільною та розщепленою жилами при аксіальному діянні на них першої компоненти імпульсного струму блискавки 2/50 мкс та експоненціально затухаючого по синусоїді імпульсного струму розряду ВЕФУ з ЄНЕ. Дані методики мають важливе практичне значення і дозволяють забезпечити економію, підвищення надійності роботи та строку служби кабельно-провідникової продукції об'єктів СІТ, зв'язку, ЕЕС та АКС в умовах діяння на них вказаних видів ВІС.

Визначені усереднені амплітудні найбільш допустимі (по умовам забезпечення механічної міцності та електротермічної стійкості ізоляції і матеріалу провідника) та критичні (по умовам розплавлення і ЕВ матеріалу провідника) чисельні значення щільності струму для голих та ізольованих круглих циліндричних проводів та кабелів з ПВХ, Р і ПЕ ізоляцією, що випробовують аксіальне діяння імпульсного струму блискавки 2/50мкс, експоненціально затухаючого по синусоїді імпульсного струму розряду ВЕФУ з ЄНЕ та імпульсного струму КЗ промислової частоти. Експериментальними даними підтверджені правомірність прийнятого підходу до їх визначення і певність результатів розрахунку критичних щільностей струму для суцільної мідної жили радіочастотних кабелів типу РК з суцільною ПЕ ізоляцією при діянні на них імпульсного затухаючого синусоїдального струму розряду ВЕФУ з ЄНЕ. Показано, що при ПУБ для неізольованих круглих циліндричних проводів усереднені амплітудні найбільш допустимі значення щільності імпульсного струму блискавки 2/50мкс для мідних проводів складають не більше 26кА/мм², для алюмінієвих — 13кА/мм² і для сталевих — 6 кА/мм². Встановлено, що при ПУБ усереднені амплітудні найбільш допустимі значення імпульсного струму блискавки 2/50мкс для круглих циліндричних проводів і кабелів з ПВХ і Р ізоляцією у суцільних мідних жилах (екранах) складають не більше 19 кА/мм², у алюмінієвих — 11 кА/мм², а з ПЕ ізоляцією відповідно не більше 16 і 9кА/мм². При цьому усереднені амплітудні критичні значення щільності імпульсного струму блискавки 2/50 мкс для

мідних жил (екранів) голих та ізольованих круглих проводів та кабелів складають не менше 73кА/мм², а для алюмінієвих — 53кА/мм².

Показано, що при характерних для СІТ значень $\omega \leq 200\pi$ кГц для радіочастотних кабелів типу РК з суцільною ПЕ ізоляцією усереднене найбільш допустиме амплітудне значення щільності експоненціально затухаючого по синусоїді імпульсного розрядного струму ВЕФУ з ЄНЕ при $\delta/\omega = 0,185$ у суцільної круглої мідної жилі не повинно збільшувати 45кА/мм², а при $\delta/\omega = 0,0569$ — 33кА/мм². З проведених розрахунків і експериментів слідує, що при $\delta/\omega = 0,185$ усереднене амплітудне критичне значення щільності імпульсного експоненціально затухаючого по синусоїді струму розряду ВЕФУ з ЄНЕ для суцільної круглої мідної жили радіочастотних кабелів типу РК з суцільною ПЕ ізоляцією складає не менше 115кА/мм², а при $\delta/\omega = 0,0569$ — 86кА/мм². Розрахунковим шляхом виявлено, що усереднені амплітудні найбільш допустимі значення щільності струму КЗ промислової частоти при тривалості КЗ рівною $t_{кз} = 1 c$ для голих мідних і алюмінієвих круглих проводів складають відповідно не більше 0,45 і 0,25кА/мм², для мідних та алюмінієвих круглих проводів та кабелів з ПВХ та Р ізоляцією — відповідно не більше 0,36 і 0,22кА/мм², а з ПЕ ізоляцією — відповідно не більше 0,32 і 0,19 кА/мм². При цьому усереднені амплітудні критичні значення щільності струму КЗ промислової частоти для круглих мідних і алюмінієвих жил (екранів) голих та ізольованих проводів та кабелів складають відповідно не менше 0,71 і 0,36кА/мм².

Встановлені границі стосовності найпростішої нелінійної електротеплової моделі з рівномірним розподіленням струму та температури по поперечному перерізу S_1 круглих суцільних мідних і алюмінієвих циліндричних проводів, що схильні аксіальному діянню експоненціально затухаючого по синусоїді імпульсного розрядного струму ВЕФУ з ЄНЕ, імпульсного струму блискавки 2/50мкс та імпульсного струму КЗ промислової частоти. Показано, що у СІТ та електроенергетики для круглих суцільних мідного та алюмінієвого циліндричних проводів границя стосовності вказаної розрахункової моделі для експоненціально затухаючого по синусоїді імпульсного струму розряду ВЕФУ з ЄНЕ при $\delta/\omega = 0,1-0,2$ і $\omega = 200\pi$ кГц складає відповідно $S_1 \approx 0,5\text{мм}^2$ і $S_1 \approx 0,7\text{мм}^2$, для імпульсного струму блискавки 2/50 мкс — відповідно $S_1 \approx 5\text{мм}^2$ і $S_1 \approx 7\text{мм}^2$, а для імпульсного струму КЗ промислової частоти — відповідно $S_1 = 200\text{мм}^2$ і $S_1 \approx 280\text{мм}^2$. Встановлені границі стосовності найпростішої нелінійної електротеплової моделі дозволяють істотно спростити електротеплові розрахунки круглих суцільних мідних і алюмінієвих циліндричних проводів при аксіальному діянні на них вказаних видів ВІС. Розроблена та досліджена з урахуванням впливу нестационарного ПЕ одномірна математична модель електромагнітного ефекту при ПУБ з імпульсним струмом блискавки 2/50мкс у тонкостінну металеву обшивку ЛА. На основі розроблених приблизних граничних умов для ІЕМП показано, що для дуралюминової обшивки реальних ЛА має місце істотний вплив нестационарного ПЕ у стінці обшивки на радіальні розподілення при ПУБ напруженості імпульсного електричного поля та електричного потенціалу на зовнішньої провідної поверхні обшивки ЛА. Отримані результати розрахунку електромагнітного ефекту при ПУБ у металеву обшивку ЛА можуть бути використані при оцінці електромагнітної стійкості РЕЗ ЛА та прогнозування результатів діяння ПУБ на ЛА з металеву обшивкою (плоским провідним покриттям засобів його захисту від блискавки), а також при вирішенні задач підвищення безпеки польотів ЛА у електрично активної атмосфери Кулі.

Розроблена та досліджена приблизна двомірна математична модель електромеханічного ефекту при ПУБ з імпульсним струмом блискавки 2/50мкс у тонкостінну металеву обшивку ЛА. На основі розробленої моделі сформульовано безрозмірний критерій електромеханічної стійкості при ПУБ плоского елемента металевої обшивки ЛА та дані практичні рекомендації по її підвищенню до електродинамічної дії ПУБ. Показано, що кругове контурне заземлення плоских частків дуралюминової обшивки ЛА поліпшує при ПУБ радіальні розподіли у них нормальних радіальних σ_r та тангенціальних σ_t напруг вигину та тим самим підвищує їх електромеханічну стійкість до діяння сильнострумowego каналу блискавки.

Приведені результати експериментальних досліджень електротеплового діяння сильнострумowego каналу мікросекундного розрядного струму ВЕФУ з ЄНЕ на дослідні зразки дуралюминової обшивки ЛА. На основі результатів металевографічного та рентгеноструктурного аналізів показано, що для неплакированих зразків з алюмінієвого сплаву Д16Т розглядаюче діяння у зоні прив'язки сильнострумowego каналу приводить до розупрочнення (зміненню мікротвердості по Вікерсу H_v з 140 до 80кг/мм²) матеріалу зразків, утворенню мікротрещин і мікротрещин, що знижують міцнісні характеристики обшивки ЛА. Для плакированих дуралюминових образців з Д16Т змінень мікротвердості H_v їх матеріалу у зоні вогнища електротеплового діяння каналу сильнострумowego розряду практично не спостерігається. Отримані результати дозволили розробити практичні рекомендації по підвищенню електротермічної стійкості дуралюминової обшивки ЛА до діяння сильнострумowego каналу імпульсної мікросекундної складової струму розряду при ПУБ.

Розроблена та досліджена приблизна двомірна математична модель крайового механічного ефекту при стисненні круглої тонкостінної циліндричної металевої оболонки тисненням СІМП у індукторі з КМП прямокутного поперечного перерізу у робочій зоні. Результати розрахунків крайового ефекту підтверджені експериментальними даними. Визначена зона впливу крайового механічного ефекту на двохосне напружено-деформований стан стисненої у індукторі з КМП з плоскими торцями трубчастої металевої оболонки товщиною h та зовнішнім радіусом R . Показано, що на відстані z від краю плоских торців КМП вздовж оболонки, примірно рівних для матеріалу оболонки), забезпечується електромеханічна стійкість стінки круглої металевої оболонки, що випробовує у робочій зоні КМП тиснення СІМП. Отримані результати розрахунків даного ефекту практично використовуються у технології МІОМ.

Загальні висновки

У дисертаційній роботі викладені нові науково обгрунтовані результати та технічні рішення у галузі техніки сильних електричних та магнітних полів, які в сукупності забезпечують розв'язання значної комплексної науково-прикладної проблеми забезпечення електромагнітної, електротермічної та електромеханічної стійкостей ряду провідних об'єктів сильнострумовой імпульсної техніки, електроенергетики, зв'язку, авіаційної та ракетно-космічної техніки до діяння на них ВІС та СІМП природного та штучного походження.

Основні результати дисертаційної роботи зводяться до наступного:

1. Розроблена теорія нестационарного лінійного поверхневого ефекту у суцільному та порожнистому круглих циліндричних провідниках необмеженої довжини та кінцевої товщини при діянні на них зовнішнього азимутального ІМП, що відповідає закону змінення ОСІ аксіального струму та виникаючого при ПУБ з аксіальним імпульсним струмом блискавки 2/50мкс.
2. Розроблена нова методика розрахунку наведених імпульсних напруг та струмів у електрично короткому ЕККС з круглою суцільною провідною циліндричною оболонкою кінцевих

поперечних розмірів, що випробовує пряме діяння аксіального імпульсного двохекспоненціального струму блискавки 2/50 мкс, яка урахує вплив нестационарного лінійного поверхневого ефекту у циліндричній оболонці ЕККС. На основі даної методики розроблені практичні рекомендації по підвищенню електромагнітної стійкості електрично короткого ЕККС до діяння ПУБ. Показано, що при ПУБ з постійною часу спаду τ_1 імпульсного струму блискавки вплив нестационарного поверхневого ефекту у оболонці ЕККС на зниження у кабелях зв'язку атмосферних перенапруг найбільш сильно проявлюється для ЕККС з постійною часу τ_s оболонки кабелю рівною $\tau_s \geq 100 \cdot \tau_1$.

3. Розроблена теорія нестационарного лінійного поверхневого ефекту у порожнистому провідному круглому циліндрі необмеженої довжини та довільного поперечного перерізу, що випробовує діяння циліндричної хвилі зовнішнього аксіального ІМП, що змінюється з часом по довільному закону та закону експоненціально затухаючої синусоїди, характерному для розрядного струму ВЕФУ з ЄНЕ.
4. Розроблена з урахуванням впливу нестационарного лінійного поверхневого ефекту методика розрахунку імпульсних теплових втрат енергії у суцільному та порожнистому круглих циліндричних провідниках кінцевих поперечних розмірів з аксіальним імпульсним затухаючим по синусоїді розрядним струмом ВЕФУ з ЄНЕ та імпульсним струмом блискавки 2/50 мкс.
5. Розроблена нова методика розрахунку у імпульсному режимі ІЕПА (активного опору, індуктивності, добротності) для суцільного та порожнистого круглих циліндричних провідників довільного поперечного перерізу з аксіальним імпульсним струмом, що змінюється з часом по законам експоненціально затухаючої синусоїди і аперіодичного двохекспоненціального імпульсу струму блискавки.
6. Розроблені нові методики приблизного аналітичного розрахунку перехідних електромагнітних процесів у найпростішій однорідній двохпровідній ВЛ “одиначний циліндричний провід — провідна плоскість землі” необмеженої довжини з мікросекундним імпульсним струмом блискавки 2/50 мкс або наносекундним імпульсом розрядного струму ВЕФУ 5/200 нс, що дозволяють кількісно оцінити вплив нестационарного лінійного поверхневого ефекту та зв'язаного з ним імпульсного тепловиділення у суцільному та порожнистому круглих циліндричних проводах довільної товщини, а також геометричних та електрофізичних параметрів дослідженої ВЛ на викривлення та затухання поширюючихся вздовж неї вказаних імпульсів струму. Показано, що при поширенні вздовж дослідженої ВЛ імпульсної хвилі струму блискавки 2/50 мкс на відстань $z \geq 10^3$ м або імпульсної хвилі розрядного струму ВЕФУ 5/200 нс на відстань $z \geq 10^2$ м імпульсні теплові втрати енергії у масивних суцільних та порожнистих круглих циліндричних проводах ВЛ викликають значне сглажування (уширення) фронту та затухання амплітуд розглядаємих імпульсів струму та імпульсів радіального ІЕП поблизу проводів ВЛ.
7. Розроблені нові методики приблизного чисельного розрахунку ХЕМП при розряді одинарної однорідної КФЛ кінцевої довжини скрізь ідеальний ключ або сильнострумовий газовий комутатор на активну зосереджену навантаженість або однорідну багатопровідну ВЛ кінцевої довжини з суцільними та порожнистими круглими циліндричними проводами і з довільною навантаженістю. Дані методики дозволяють у хвильовому режимі визначити вплив нестационарного лінійного поверхневого ефекту у циліндричних струмопроводах КФЛ і проводах ВЛ, геометричних та електрофізичних параметрів КФЛ, ВЛ, ГК і навантаженості та втрат на випромінювання у ВЛ на АВП формуємих у КФЛ, ВЛ та на навантаженості імпульсів напруги і струму. Встановлено, що в хвильовому режимі імпульсні теплові втрати енергії у масивних трубчастих сталевих циліндричних струмопроводах КФЛ та у суцільних мідних круглих проводах ВЛ викликають збільшення (до 25%) тривалості

- фронту τ_f та зменшення (до 12%) амплітуди, що формуються у багатопровідної ВЛ імпульсів напруги (струму). Результати даних досліджень практично використовані при розробці та створенні унікальних випробних ВЕФУ, що утримують КФЛ і ВЛ з циліндричними струмопроводами та призначених для отримання ВІС та потужних ЕМІ.
8. Сформульовано узагальнене граничне співвідношення імпульсної електродинаміки проміж компонентами ІЕМП на поверхні нерухомого провідного об'єкту довільної геометричної форми. На основі даного співвідношення розроблені приблизні граничні умови і визначені технічні області їх застосування для досліджених провідних об'єктів плоскої, циліндричної, прямокутної та сферичної форм довільної товщини, що випробовують діяння ВІС та СІМП довільної часової форми.
 9. Введено і математично визначено поняття перехідного поверхневого опору для нерухомих провідних об'єктів з ІЕМП. Отримані формули для аналітичного розрахунку перехідних поверхневих опорів стосовно до випробовуючим діяння ВІС та СІМП необмеженим по довжині і довільного поперечного перерізу нерухомим провідним пластини, суцільного та порожнистого круглих циліндрів при їх одно- і двостороннім електромагнітному збудженні аксіальним або азимутальним ІМП. Подібні формули отримані також для двохпровідного коаксіального кабелю, провідних суцільної прямокутної шини, суцільних та порожнистих куль.
 10. Розроблена теорія нестационарного нелінійного поверхневого ефекту у суцільному та порожнистому круглих циліндричних провідниках кінцевої товщини та необмеженої довжини, що випробовують аксіальне діяння імпульсного струму блискавки 2/50 мкс, експоненціально затухаючого по синусоїді імпульсного розрядного струму ВЕФУ з ЄНЕ та імпульсного струму КЗ промислової частоти.
 11. Розроблені нові методики по визначенню електротермічної стійкості голих та ізольованих круглих циліндричних проводів та кабелів з ПВХ, Р і ПЕ ізоляцією з суцільною та розщепленою жилами при аксіальному діянні на них першої компоненти імпульсного струму блискавки 2/50 мкс та експоненціально затухаючого по синусоїді імпульсного струму розряду ВЕФУ з ЄНЕ.
 12. Визначені усереднені амплітудні найбільш допустимі та критичні чисельні значення щільності струму для голих та ізольованих проводів та кабелів з ПВХ, Р і ПЕ ізоляцією, що випробовують аксіальне діяння імпульсного струму блискавки 2/50 мкс, експоненціально затухаючого по синусоїді імпульсного струму розряду ВЕФУ з ЄНЕ та імпульсного струму КЗ промислової частоти. Показано, що для суцільних круглих мідних жил проводів та кабелів гранично допустимі значення щільності струму складають при ПУБ з струмом блискавки 2/50 мкс не більше 26 кА/мм², при експоненціально затухаючому по синусоїді розряді ВЕФУ з ЄНЄ ($\delta/\omega = 0,185$) не більше 45 кА/мм² та при КЗ у ланцюгах промислової частоти ($t_{кз} = 1 c$) не більше 0,45 кА/мм². При цьому критичні значення щільності струму для мідних жил складають відповідно не менше 73, 115 та 0,71 кА/мм². Отримані результати практично використані у технології МІОМ при визначенні умов забезпечення електротермічної стійкості кабельно-провідникової продукції ВЕФУ з ЄНЕ.
 13. Вперше встановлені границі стосовності найпростішої нелінійної електротеплової моделі з рівномірним розподіленням струму та температури по поперечному перерізу S_1 круглих суцільних мідних та алюмінієвих циліндричних проводів, що схильні аксіальному діянню експоненціально затухаючого по синусоїді імпульсного розрядного струму ВЕФУ з ЄНЕ, імпульсного струму блискавки 2/50 мкс і імпульсного струму КЗ промислової частоти. Показано, що для даних проводів границя стосовності вказаної розрахункової моделі при експоненціально затухаючому по синусоїді розряді ВЕФУ з ЄНЄ ($\delta/\omega = 0,1 - 0,2$) складає

відповідно $S_1 \leq 0,5 \text{ мм}^2$ та $S_1 \leq 0,7 \text{ мм}^2$, при ПУБ з струмом блискавки 2/50мкс відповідно $S_1 \leq 5 \text{ мм}^2$ та $S_1 \leq 7 \text{ мм}^2$ та при КЗ у ланцюгах промислової частоти відповідно $S_1 \leq 200 \text{ мм}^2$ та $S_1 \leq 280 \text{ мм}^2$.

14. Розроблена з урахуванням впливу нестационарного поверхневого ефекту приблизна теорія електромагнітного ефекту при ПУБ з імпульсним струмом блискавки 2/50 мкс у тонкостінну металеву обшивку літального апарату. Результати розрахунків даного ефекту можуть бути використані при оцінці електромагнітної стійкості ЛА до ПУБ та рішенні задач підвищення безпеки польотів ЛА у електрично активній атмосфері Кулі.
15. Розроблена приблизна теорія електромеханічного ефекту при ПУБ з імпульсним струмом блискавки 2/50 мкс у тонкостінну металеву обшивку літального апарату. На основі розробленої теорії сформульовано безрозмірний критерій електромеханічної стійкості при ПУБ плоского елемента металевої обшивки ЛА і дані практичні рекомендації по її підвищенню до електродинамічної дії ПУБ.
16. На основі проведених експериментальних досліджень розроблені практичні рекомендації по підвищенню електротермічної стійкості дуралюминової обшивки літального апарату до діяння сильнострумовевого каналу імпульсної мікросекундної складової струму розряду при ПУБ. Встановлено, що використання листового дуралюміна з поверхніми плакуючими алюмінієвими шарами для обшивки ЛА забезпечує при ПУБ підвищення її стійкості до електротермічної дії сильнострумовевого каналу блискавки.
17. Розроблена приблизна теорія крайового механічного ефекту при стисненні круглої тонкостінної циліндричної металевої оболонки тисненням СІМП у індукторі з КМП прямокутного поперечного перерізу у робочій зоні. Результати розрахунків даного ефекту, підтвержені експериментальними даними, практично використовуються у технології МІОМ при визначенні зони впливу крайового ефекту на двосне напружено-деформований стан стиснених у індукторі з КМП з плоскими торцями трубчастих металевих заготовок.
18. Результати дисертаційної роботи впроваджені у науково-дослідному та проектно-конструкторському інституті (НДПКІ) "Молнія" (м. Харків), науково-дослідній лабораторії МІОМ Харківського державного політехнічного університету (Міністерство освіти України) та ДКБ "Південне" ім.М.К.Янгеля (м. Дніпропетровськ) (Міністерство промислової політики України).

ПУБЛІКАЦІЇ за темою дисертації

1. Баранов М.И. Сравнение двух моделей для электротепловых расчетов цилиндрических проводников при воздействии на них больших импульсных токов // Техническая электродинамика.— 1999.— № 3.— С. 14-19.
2. Баранов М.И. Поверхностный эффект в полой проводящем изотропном цилиндре с аксиальным импульсным магнитным полем // Техническая электродинамика.— 1999.— № 2.— С. 3-6.
3. Баранов М.И. Моделирование электромагнитного эффекта при прямом ударе молнии в металлическую обшивку летательного аппарата // Техническая электродинамика.— 1999.— № 1.— С. 16-21.
4. Баранов М.И. Приближенные граничные условия для полого проводящего цилиндра в импульсном аксиальном магнитном поле // Электричество.— 1998.— № 4.— С. 49-54.
5. Баранов М.И. Моделирование краевого эффекта при деформации металлической оболочки давлением сильного импульсного магнитного поля // Техническая электродинамика.— 1998.— № 3.— С. 14-19.
6. Баранов М.И. Соотношения между компонентами импульсного электромагнитного поля на поверхности проводника // Электричество.— 1997.— № 1.— С.63-70.

7. Баранов М.И. Термическая стойкость неизолированных проводов при прямом ударе молнии // Техническая электродинамика.— 1997.— № 6.— С. 9-15.
8. Баранов М.И. Приближенные граничные условия для импульсного электромагнитного поля на поверхности изотропных проводящих тел // Техническая электродинамика.— 1996.— № 6.— С.3-10.
9. Баранов М.И. Расчет процесса энерговыделения в цилиндрических токопроводах электрофизических установок высокого напряжения // Электричество.— 1992.— № 4.— С. 6-10.
10. Баранов М.И., Бондина Н.Н., Бочаров В.А. Моделирование нелинейной электротепловой задачи для цилиндрических изотропных токопроводов электрофизических установок при получении больших импульсных токов // Техническая электродинамика.— 1998.— № 4.— С. 19-22. Автор разработал математическую модель задачи, приняв участие в экспериментальных исследованиях.
11. Баранов М.И., Бондина Н.Н. Импульсное сопротивление цилиндрического провода с током молнии // Техническая электродинамика.— 1996.— № 3.— С.3-9. Автор провёл анализ полученных результатов, сформулировал выводы.
12. Баранов М.И., Кузнецов С.А. Приближённый расчет нестационарных процессов при разряде коаксиальной формирующей линии на многопроводную воздушную линию // Электричество.— 1992.— № 12.— С. 14-22. Автор выполнил обоснование метода решения, анализ результатов и разработку рекомендаций.
13. Баранов М.И., Бондина Н.Н. Нестационарные электромагнитные и тепловые процессы в цилиндрических проводниках при воздействии на них тока молнии // Электричество.— 1992.— № 10.— С. 9-15. Автор выполнил математическое моделирование, обоснование основных идей, анализ результатов расчётов.
14. Баранов М.И., Кузнецов С. А. Анализ разряда коаксиальной формирующей линии на основе разложения решения в ряд Фурье // Электричество.— 1992.— № 8.— С. 15-23. Автор принял участие в разработке математической модели и формировании выводов.
15. Баранов М.И., Бондина Н.Н. Импульсное электрическое поле вблизи проводов воздушной линии при воздействии на них тока молнии // Электричество.— 1992.— № 7.— С. 7-12. Автор провёл выбор метода решения и анализ результатов.
16. Баранов М.И., Бондина Н.Н. Нестационарный поверхностный эффект в цилиндрических токопроводах с грозвым импульсом тока // Электричество.— 1990.— № 2.— С. 61-64. Автором разработана теория нестационарного поверхностного эффекта в ступенчатых проводах.
17. Баранов М.И., Бондина Н.Н. Расчет активного сопротивления и индуктивности цилиндрического проводника с импульсным током // Электричество.— 1990.— № 1.— С. 81-87. Автором разработана методика расчёта интегральных электрических параметров цилиндрических проводников, выполнен анализ и формулирование выводов.
18. Баранов М.И., Кузнецов С. А. Расчет электрических параметров многопроводных линий высоковольтных испытательных установок // Электричество.— 1988.— № 8.— С. 59-61. Автором разработана методика расчёта электрических параметров воздушных линий.
19. Баранов М.И., Белый И. В. Переходный процесс при разряде конденсатора на коаксиальную систему цилиндрических проводников с активно-индуктивной нагрузкой // Электричество.— 1978.— № 8.— С. 33-37. Автор получил формулы для расчёта операторных опор цилиндрических проводников.
20. Баранов М.И., Бондина Н.Н. О применении и численном решении некоторых типов специальных уравнений в теории расчета электротехнических устройств с

- импульсными электромагнитными полями // Теоретическая электротехника.— Львов: Вища школа.— Изд-во при Львов. ун-те, 1988.— вып. №44.— С. 12-16. Автором проведен анализ результатов решения специальных уравнений.
21. Баранов М.И., Кузнецов С. А., Шукин И. С. Расчет индуктивности, емкости и волнового сопротивления многопроводных линий с круглыми проводниками// Теоретическая электротехника.— Львов: Вища школа.— Изд-во при Львов. ун-те, 1987.— вып. № 42.— С. 29-35. Автором выполнена разработка методики расчета электрических параметров многопроводных линий.
 22. Baranov M. I. Calculation of energy release in cylindrical conductors of high voltage electrophysical systems // Electrical Technology.— 1992.— № 2.— P. 1-8, Oxford (Great Britain).
 23. Baranov M. I., Bondina N. N. Electromagnetic and thermal transients processes in cylindrical conductors due to lightning current strikes // Electrical Technology.— 1992.— № 4.— P. 19-32, Oxford (Great Britain). Автором разработана математическая модель, выполнен анализ результатов расчета.
 24. Baranov M. I., Kuznetsov S. A. Calculation of nonstationary processes in the high voltage electrophysical installations by the method of numerical Laplace transformation // Proc. 7 th International Symp. on High Voltage Engineering.— Vol. 8.— Dresden (Germany).— 1991.— P. 115-117. Автор выполнил математическое решение задачи, провел анализ результатов численных расчетов.
 25. Baranov M. I., Bondina N. N. Nonstationary electromagnetic and thermal processes in cylindrical and thermal processes in cylindrical conductors with lightning current // Proc. 7 th International Symp. on High Voltage Engineering.— Vol. 8.— Dresden (Germany).— 1991.— P. 159-161. Автором проведена разработка математической модели та сформулированы выводы.
 26. Baranov M. I., Bondina N. N. Nonstationary skin-effect in the wires of high voltage aerial line and deformation of pulse wave of lightning current // Proc. 11th International Wroclav Simp. and Exhibition on Electromag. Compatibility.— Part2.— Wroclav (Poland).— 1992.— P. 411-414. Автор провел выбор метода решения, анализ та формулирование выводов.
 27. Баранов М. И., Бондина Н. Н., Кравченко В. И., Нескородов Г. Ф. Нестационарные процессы в металлических объектах электроэнергетических и аэрокосмических систем при воздействии на них тока молнии // Сб. науч. докл. I-го международн. симпозиума по ЭМС.— Часть 3.— Санкт-Петербург (Россия).— 1993.— С. 683. Автором выполнена разработка математических моделей электротепловых процессов у проводных объектах.
 28. Baranov M. I., Bondina N. N. Nonstationary skin-effect in the wires of high voltage aerial line and damping of nanosecond current pulse // Proc. 12th International Wroclav Simp. and Exhibition on Electromag. Compatibility.— Wroclav (Poland).— 1994.— P. 259-262. Автор провел анализ результатов численных расчетов та формулирование выводов.
 29. Baranov M. I. Estimation of ultimate current loadings for cylindrical conductors being influenced by the lightning current // Proc. 9 th International Symp. on High Voltage Engineering.— Vol. 6.— Graz (Austria).— 1995.— P. 6805-1—6805-4.
 30. Baranov M. I., Bondina N. N. The impedance boundary conditions for conductors of different shape affected by EMP // Proc. 13 th International Wroclav Symp. and Exhibition on Electromag. Compatibility.— Wroclav (Poland).— Paper № 132.— 1996. Автором разработано обобщенное граничное соотношение импульсной электродинамики для проводных объектов разной геометрической формы.

31. Baranov M. I., Bondina N. N. The Leontovich boundary conditions for conducting bodies of finite thickness with nonstationary electromagnetic field // Proc. 10 th International Symp. on High Voltage Engineering.— Vol. 6.— Montreal (Canada).— Paper № 3495.— 1997.— P. 265-267. Автором виконано формулювання приблизних граничних умов для імпульсного електромагнітного поля на поверхні провідних об'єктів.
32. Baranov M. I., Isakova A. V., Kravchenko V. I. The experimental investigation of electrothermal effects produced by spark channel of a lightning on the metal sheathing of the flying objects // Proc. 24 th International Conf. on Lightning Protection.— Birmingham (Great Britain).— Paper № 282.— 1998. Автор прийняв участь у експериментальних дослідженнях, провів аналіз та формулювання висновків.
33. Баранов М. И. Приближенный расчет активного сопротивления и индуктивности цилиндрических проводников с током молнии // Материалы 1-ой всесоюзной научн.-техн. конф. по стойкости РЭС (Харьков).— Часть 2.— М.: НТЦ "Информтехника".— 1991.— С. 159-161.
34. Баранов М. И. К расчету нестационарных электротепловых процессов в цилиндрических проводах при воздействии на них тока молнии // Материалы 1-ой всесоюзной научн.-техн. конф. по стойкости РЭС (Харьков).— Часть 2.— М.: НТЦ "Информтехника".— 1991.— С. 162-164.
35. Баранов М. И., Бондина Н. Н. Моделирование нелинейных процессов в цилиндрических проводниках при воздействии на них тока молнии // Материалы 4-ой научн.-техн. конф. по проблемам нелинейной электротехники.— Киев.— 1992.— С. 42-43. Автором виконана розробка математичної моделі, проведено аналіз результатів розрахунків.

анотації:

Баранов М. И. Перехідні процеси при діянні великих імпульсних струмів та сильних імпульсних магнітних полів на провідні об'єкти.— Рукопис.

Дисертація на здобуття наукового ступеня доктора технічних наук по спеціальності 05.09.13 — техніка сильних електричних та магнітних полів.— Харківський державний політехнічний університет, Харків, 1999.

Дисертація присвячена розробці нових науково обґрунтованих технічних рішень у галузі техніки сильних електричних та магнітних полів, які забезпечують розв'язання значної науково-прикладної комплексної проблеми забезпечення електромагнітної, електротермічної та електромеханічної стійкостей ряду провідних об'єктів сильнострумової імпульсної техніки, електроенергетики, зв'язку, авіаційної та ракетно-космічної техніки до діяння ВІС та СІМП природного та штучного походження.

Отримані у роботі результати теоретичних і експериментальних досліджень знайшли практичне застосування при розробці та створенні унікальних випробних ВЕФУ для одержання ВІС та потужних ЕМІ, у технології МІОМ при визначенні електротермічної стійкості кабельно-провідникової продукції ВЕФУ, стисненні тисненням СІМП трубчастих металевих заготовок та при забезпеченні захисту від блискавки об'єктів ракетно-космічної техніки.

Ключові слова: провідні об'єкти, великі імпульсні струми, сильні імпульсні магнітні поля, перехідні процеси, електромагнітна, електротермічна та електромеханічна стійкість.

Baranov M.I. The transient processes arising under action of the heavy pulsed currents and strong pulsed magnetic fields that affect the conductive objects.— Manuscript.

The thesis for the doctor's degree of the technical sciences in speciality 05.09.13— the strong electric and magnetic fields engineering.— Kharkov State Polytechnical University, Kharkov, 1999.

The dissertation is devoted to the development of the new scientifically substantiated technical solutions in the field of the engineering of strong electrical and magnetic fields which contribute to the solution of the significant scientifically-&-applied complex problem of providing the electromagnetic, electrothermal and electromechanical stability of a number of the conductive objects of the heavy-current pulsed equipment, electric power engineering, communication, aviation and rocket-&-space equipment affected by HPC and SPMF of the natural and artificial origin. The results of the theoretical and experimental investigations obtained in the paper found the practical application during the development and creation of the unique testing HEPUs that generate HPC and powerful EMP, in the technology of the MPMT while defining the electrothermal stability of the cable-&-conductive products for HEPUs, compression of the tubular metal blanks by the SPMF pressure and while providing the lightning immunity of the objects of the rocket -&-space engineering.

Key words: conductive objects, heavy pulsed currents, strong pulsed magnetic fields, transient processes, electromagnetic, electrothermal and electromechanical stability.

Баранов М. И. Переходные процессы при воздействии больших импульсных токов и сильных импульсных магнитных полей на проводящие объекты.— Рукопись.

Диссертация на соискание ученой степени доктора технических наук по специальности 05.09.13 — техника сильных электрических и магнитных полей.— Харьковский государственный политехнический университет, Харьков, 1999.

Диссертация посвящена разработке новых научно обоснованных технических решений в области техники сильных электрических и магнитных полей, которые обеспечивают решение важной комплексной научно-прикладной проблемы обеспечения электромагнитной, электротермической и электромеханической стойкостей ряда проводящих объектов сильноточной импульсной техники, электроэнергетики, связи, авиационной и ракетно-космической техники к воздействию БИТ и СИМП естественного и искусственного происхождения. В работе изложены основы теории нестационарного линейного поверхностного эффекта в сплошных и полых круглых цилиндрических проводниках с азимутальным или аксиальным внешним ИМП, изменяющимся во времени по законам импульсного тока молнии 2/50 мкс и экспоненциально затухающего по синусоиде импульсного разрядного тока ВЭФУ с ЕНЭ. Приведена новая методика расчета с учетом влияния нестационарного поверхностного эффекта наведенных импульсных напряжений и токов в электрически коротком ЭККС с круглой сплошной цилиндрической оболочкой, испытывающей воздействие ПУМ с импульсным током молнии 2/50 мкс, которая позволила разработать практические рекомендации по повышению электромагнитной стойкости ЭККС к воздействию ПУМ. Разработаны новые методики по расчету в переходном режиме процесса импульсного энерговыделения и интегральных электрических параметров (активного сопротивления, индуктивности, добротности) для сплошных и полых круглых цилиндрических проводников с импульсным током молнии 2/50 мкс и экспоненциально затухающим по синусоиде импульсным разрядным током ВЭФУ с ЕНЭ. Разработаны новые методики для аналитического расчета переходных электромагнитных процессов в простейшей однородной двухпроводной ВЛ с микросекундным импульсным током молнии 2/50 мкс и наносекундным импульсом разрядного тока ВЭФУ 5/200 нс. Приведены новые методики для численного расчета волновых электромагнитных процессов при разряде однородной одинарной КФЛ конечной длины через идеальный ключ или сильноточный газовый коммутатор на сосредоточенную активную нагрузку или однородную многопроводную ВЛ конечной длины со сплошными и полыми круглыми цилиндрическими проводами и с произвольной нагрузкой. Сформулировано обобщенное граничное соотношение

импульсной электродинамики между компонентами ИЭМП произвольной временной формы на поверхности неподвижного проводящего объекта произвольной геометрической формы. Введено и математически определено понятие переходного поверхностного сопротивления для неподвижных проводящих объектов, испытывающих воздействие ИЭМП. Получены формулы для аналитического расчета переходных поверхностных сопротивлений применительно к испытываемым воздействию БИТ и СИМП неограниченным по длине и произвольного поперечного сечения неподвижным проводящим пластины, сплошного и полого круглых цилиндров при их одно- и двустороннем электромагнитном возбуждении аксиальным или азимутальным ИМП. Подобные формулы получены также для двухпроводного коаксиального кабеля, проводящих сплошной прямоугольной шины, сплошного и полого шаров. Разработаны приближенные граничные условия для проводящих объектов плоской, цилиндрической, прямоугольной и сферической форм, испытывающих воздействие ИЭМП произвольной временной формы. Разработаны основы теории нестационарного нелинейного поверхностного эффекта в сплошных и полых круглых цилиндрических проводниках, испытывающих аксиальное воздействие импульсного тока молнии $2/50$ мкс, экспоненциально затухающего по синусоиде импульсного разрядного тока ВЭФУ с ЕНЭ и импульсного тока КЗ промышленной частоты. Предложены новые методики по определению электротермической стойкости голых и изолированных круглых цилиндрических проводов и кабелей с ПВХ, Р и ПЭ изоляцией со сплошной жилой при воздействии на них тока молнии $2/50$ мкс и тока затухающего по синусоиде разряда ВЭФУ с ЕНЭ. Определены предельно допустимые и критические значения плотности тока для голых и изолированных круглых цилиндрических проводов и кабелей с ПВХ, Р и ПЭ изоляцией, испытывающих импульсное воздействие тока молнии $2/50$ мкс, затухающего по синусоиде разрядного тока ВЭФУ в ЕНЭ и тока КЗ промышленной частоты. Установлены границы применимости простейшей нелинейной электротепловой модели для круглых сплошных медных и алюминиевых цилиндрических проводов с указанными импульсными токами. Разработаны основы теории электромагнитного и электромеханического эффектов при ПУМ с током молнии $2/50$ мкс в тонкостенную металлическую обшивку летательного аппарата, позволившие сформулировать критерий электромеханической стойкости при ПУМ плоского элемента металлической обшивки ЛА и разработать практические рекомендации по ее повышению к электродинамическому действию ПУМ. Показано, что применение листового дуралюмина с поверхностными плакирующими алюминиевыми слоями для обшивки ЛА обеспечивает при ПУМ повышение ее стойкости к электротермическому действию сильноточного канала молнии. Разработаны основы теории краевого механического эффекта при сжатии круглой тонкостенной цилиндрической металлической оболочки давлением СИМП в индукторе с КМП прямоугольного поперечного сечения в рабочей зоне. Результаты расчетов краевого механического эффекта подтверждены экспериментальными данными. Полученные в работе результаты теоретических и экспериментальных исследований нашли практическое применение при разработке и создании уникальных испытательных ВЭФУ для получения БИТ и мощных ЭМИ, в технологии МИОМ при определении электротермической стойкости кабельно-проводниковой продукции ВЭФУ с ЕНЭ, сжатии давлением СИМП трубчатых металлических заготовок и при обеспечении молниестойкости объектов ракетно-космической техники.

Ключевые слова: проводящие объекты, большие импульсные токи, сильные импульсные магнитные поля, переходные процессы, электромагнитная, электротермическая и электромеханическая стойкость.