

Національний університет “Львівська політехніка”

Сердюк Павло Віталійович

УДК 004.942:621.382

**МАТЕМАТИЧНЕ ТА ПРОГРАМНЕ ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ
ТЕПЛОВОГО ПРОЕКТУВАННЯ РЕЗИСТОРНИХ НАДПРОВІДНИХ ОБМЕЖУВАЧІВ
СТРУМУ ДЛЯ ЗАХИСТУ МІКРОЕЛЕКТРОННИХ ПРИСТРОЇВ**

Спеціальність 05.13.12 – системи автоматизації проектувальних робіт

АВТОРЕФЕРАТ

дисертації на здобуття наукового ступеня
кандидата технічних наук

Львів – 2007

Дисертацією є рукопис.

Робота виконана на кафедрі програмного забезпечення
Національного університету “Львівська політехніка”

Науковий керівник: доктор технічних наук, професор
Федасюк Дмитро Васильович,
Національний університет “Львівська політехніка”
завідувач кафедри програмного забезпечення,
директор Інституту комп’ютерних наук та інформаційних технологій,

Офіційні опоненти: доктор технічних наук, професор
Недоступ Леонід Аврамович,
Національний університет “Львівська політехніка”
завідувач кафедри теоретичної радіотехніки та радіовимірювання,

доктор технічних наук,
старший науковий співробітник
Попович Василь Степанович,
Інститут прикладних проблем механіки і математики імені
Я.С.Підстригача НАН України, м. Львів,
заступник директора з наукової роботи,

Провідна установа: Національний технічний університет України "Київський
політехнічний інститут",
кафедра систем автоматизованого проектування.

Захист відбудеться “19” червня 2007 р. о 16⁰⁰ год. на засіданні спеціалізованої вченої ради Д
35.052.05 в Національному університеті “Львівська політехніка” за адресою: 79013, м. Львів, вул. С.
Бандери, 12.

З дисертацією можна ознайомитися у науково-технічній бібліотеці Національного університету
“Львівська політехніка” за адресою: 79013,

м. Львів, вул. Професорська, 1.

Автореферат розісланий “18” травня 2007 р.

Вчений секретар спеціалізованої вченої ради,

доктор технічних наук, професор

Бунь Р. А.

ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

Актуальність теми. Принципово новим розв'язанням проблеми захисту електронних пристроїв і схем від критичних електричних навантажень стало використання надпровідників. Надпровідні обмежувачі струму (НПОС) мають ряд переваг над традиційними засобами захисту електроприладів, а саме: вони надзвичайно чутливі до критичних режимів, так як час переходу з надпровідного в нормальний стан при перевищенні струмом критичної величини є дуже малий ($\approx 10^{-12}$ с) у порівнянні з традиційними засобами захисту; НПОС не впливають на функціонування електричної системи при нормальному режимі роботи; автоматично відновлюють роботу після зниження струму з критичної до нормальної робочої величини.

Математичні моделі теплоелектричних процесів резисторних НПОС, описані у роботах В. Zeimetz, К. Tanida, D.E. Eves, К. Kajikawa, К. Funaki, S. Sugita, Н. Ohsaki включають опис тривимірних теплових та електричних процесів і нелінійні залежності теплоелектричних характеристик надпровідного матеріалу від температури та струму, внаслідок чого характеризуються високою складністю математичного опису, а їх аналіз потребує великої кількості обчислень. Інша категорія математичних моделей електричних процесів НПОС, розроблених дослідниками L. Ye, A. Campbell, T. Nuh, J. Lee, враховує лише вплив електричних процесів, тому має низький рівень достовірності.

Внаслідок зазначених недоліків існуючого математичного забезпечення відсутні засоби теплового проектування, які ефективно розв'язують задачу нестационарного аналізу теплоелектричних процесів та задачу синтезу конструктивних параметрів надпровідних обмежувачів струму. У зв'язку з цим виникла актуальна потреба у розробці ефективних математичних моделей теплоелектричних процесів резисторних надпровідних обмежувачів струму з високою швидкістю аналізу, відповідних методів обчислення й алгоритмів, прикладного математичного, інформаційного та програмного забезпечення як складових системи автоматизованого теплового проектування резисторних НПОС.

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами. Тематика роботи пов'язана з виконанням держбюджетних тем Національного університету "Львівська політехніка" ДБ/Сервер – "Розробка засобів моделювання критичних теплових режимів МЕР на основі прогресивних технологій проектування" (дисертантом розроблено алгоритми аналізу математичних моделей теплових процесів із нелінійними залежностями теплофізичних характеристик від температури), яка виконувалася у період з 2003 по 2004 р. (номер державної реєстрації 0104U002326) і ДБ/НМ – "Математичне та програмне забезпечення мережевих систем теплового проектування сучасних МЕР" (дисертантом розроблено математичні моделі резисторних НПОС, методи та алгоритми їх

аналізу, описані результати чисельних експериментів), яка виконувалася в 2006-2007 рр. (номер державної реєстрації 0106U000260).

Мета й задачі дослідження. Метою досліджень є розробка математичного і програмного забезпечення теплового проектування резисторних надпровідних обмежувачів струму для захисту мікроелектронних пристроїв.

Для досягнення мети дослідження розв'язано задачі:

1. Аналіз актуального стану, потреб і сучасних задач математичного моделювання теплоелектричних процесів у надпровідних матеріалах та огляду сучасних засобів проектування резисторних надпровідних обмежувачів струму.
2. Формалізація й обґрунтування відповідних математичних моделей теплоелектричних процесів у резисторних НПОС, які враховують нелінійні залежності теплоелектричних характеристик надпровідного матеріалу від температури та струму.
3. Побудова та обґрунтування чисельних й аналітичних методів для розв'язування задач, що виникають у процесі аналізу побудованих математичних моделей.
4. Формалізація та розв'язання задачі синтезу конструктивних параметрів резисторних НПОС.
5. Розроблення інформаційного та програмного забезпечення на основі створеного математичного забезпечення.
6. Верифікація розроблених математичних моделей, методів та алгоритмів аналізу шляхом тестових досліджень і визначення точності та достовірності одержаних результатів.
7. Проведення чисельних експериментів на модельних прикладах, дослідження особливостей розподілу температурного й електричного поля у НПОС на основі створеного математичного і програмного забезпечення, розробка методичних вказівок для теплового проектування надпровідних обмежувачів струму.

Об'єкт дослідження - теплоелектричні процеси у резисторних надпровідних обмежувачах струму, струмообмежуючий елемент яких є тонкою надпровідною пластиною на діелектричній підкладці.

Предмет дослідження – методи і засоби теплового проектування резисторних надпровідних обмежувачів струму.

Методи досліджень: математичні моделі теплоелектричних процесів розроблені з використанням теорії теплових та електричних процесів; аналіз математичних моделей базується на методах математичної фізики та чисельних методах обчислень; для створення програмного забезпечення застосована теорія алгоритмів, теорія об'єктно-орієнтованого програмування та обчислювальні засоби пакету Matlab.

Достовірність наукових положень забезпечується коректністю формулювання задач теплового проектування, використанням адекватного математичного апарату для побудови і аналізу математичних моделей, застосуванням випробуваного засобу Matlab для чисельних обчислень, узгодженістю отриманих результатів із відомими частковими результатами.

Наукова новизна одержаних результатів:

1. Вперше формалізовано і розв'язано задачу автоматичного конструктивно-параметричного синтезу резисторних надпровідних обмежувачів струму у вигляді мінімізації цільової функції, що визначає функціональні характеристики цих пристроїв і для обчислення якої використовуються розроблені математичні моделі, що дало змогу автоматизувати процес проектування та зменшити обчислювальні затрати процесу синтезу, враховуючи при цьому нелінійність теплоелектричних процесів резисторного надпровідного обмежувача струму.
2. Побудовано нову одновимірну нестационарну математичну модель теплоелектричних процесів резисторного надпровідного обмежувача струму та розроблено метод її аналізу, який зменшує обчислювальні затрати і допомагає уникнути розбіжності ітераційних процесів при обчисленнях розподілу температури та струму.
3. Розвинуто тривимірну математичну модель резисторного надпровідного обмежувача струму в поєднанні з механічним реле в якості засобу захисту від короткого замикання шляхом урахування повної втрати надпровідності у критичному електричному режимі та відсутності струму в режимі відновлення, що дало можливість застосувати чисельно-аналітичні методи аналізу температурного розподілу.
4. Розроблено метод аналізу побудованої тривимірної нестационарної математичної моделі теплоелектричних процесів надпровідного обмежувача струму, який апроксимує нелінійну залежність електричного опору надпровідного матеріалу від температури кусково-лінійною функцією і дає можливість отримувати розподіл температури у надпровідному обмежувачі струму в чисельно-аналітичному вигляді.

Практичне значення одержаних результатів:

1. На основі розроблених математичних моделей створено комплекс програм для автоматизації теплового проектування резисторних надпровідних обмежувачів струму.
2. Створено базу даних нелінійних залежностей теплоелектричних характеристик надпровідних матеріалів від температури та струму, яка може бути використана при побудові й аналізі інших нелінійних математичних моделей теплових та електричних процесів у надпровідниках.

3. Розроблено математичні моделі теплоелектричних процесів у резисторних НПОС, які можна застосовувати для аналізу теплоелектричних процесів в інших надпровідних приладах, надпровідний елемент яких має вигляд тонкої плівки: резонаторах, кабелях.
4. Розроблено ефективну методику синтезу конструктивних параметрів резисторних надпровідних обмежувачів струму, яка дає можливість визначати оптимальні конструктивні параметри цих пристроїв відповідно до заданих вимог.
5. Проведено тестові теплові дослідження резисторних НПОС, у ході яких одержано результати, що дали змогу оцінити вплив різних параметрів конструкції на вихідні характеристики НПОС.
6. Наукові розробки впроваджені при виконанні робіт за темою “Борт” згідно договору між Львівським науково-дослідним радіотехнічним інститутом і КБ “Причал”, а також використані у навчальному процесі Національного університету “Львівська політехніка” при читанні курсу лекцій і виконанні курсових робіт з дисципліни “Основи автоматизованого проектування складних об’єктів і систем”.

Особистий внесок здобувача – усі теоретичні та практичні результати, викладені у роботі, одержані автором особисто. У роботах, які опубліковані у співавторстві, здобувачеві належать: [1,5] – обґрунтування методів досліджень, розроблення і аналіз тривимірної математичної моделі для аналізу нестационарних теплових процесів у резисторному надпровідному обмежувачі струму для захисту мікроелектронних пристроїв, яка враховує нелінійну залежність теплофізичних характеристик від температури, проведення чисельних експериментів, опрацювання результатів; [3] – побудова математичної моделі нестационарних теплоелектричних процесів електричної схеми з надпровідним обмежувачем струму, що має вигляд тонкої пластини, запропоновано метод аналізу моделі; [4] – формалізація та програмна реалізація задачі автоматизованого конструктивно-параметричного синтезу НПОС, обробка і аналіз отриманих результатів, [6] – побудова та програмна реалізація тривимірної математичної моделі теплоелектричних процесів резисторного НПОС в оболонці Matlab/Femlab/Simulink, проведення чисельних експериментів; [7] – запропоновано алгоритм синтезу конструктивних параметрів на основі розробленого математичного забезпечення, проведення чисельних експериментів, опрацювання результатів.

Апробація результатів дисертації. Результати теоретичних і практичних досліджень доповідалися й обговорювалися на Міжнародній науково-технічній конференції “Сучасні проблеми засобів телекомунікації, комп’ютерної інженерії та підготовки спеціалістів” TCSET’2006 (с. Славсько, 2006р.), Міжнародній науково-технічній конференції “Комп’ютерні науки та інформаційні технології” CSIT-2006 (м. Львів, 2006р.), 1-й міжнародній конференції молодих

науковців “Комп’ютерні науки та інженерія” CSE’2006 (м. Львів, 2006р.), наукових семінарах кафедри “Програмне забезпечення” Національного університету “Львівська політехніка” (2006, 2007рр.).

Публікації. За результатами проведених досліджень опубліковано 7 друкованих праць, з яких 4 праці у наукових фахових виданнях з переліку затвердженого ВАК України (одна одноосібна), 3 тези доповідей у матеріалах міжнародних науково-технічних конференцій.

Структура і обсяг роботи. Дисертаційна робота складається із вступу, чотирьох розділів, висновку, списку використаної літератури та додатку. Загальний обсяг дисертації – 159 сторінок, у тому числі 44 рисунки і 6 таблиць. Список використаної літератури містить 119 найменувань.

ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ

У **вступі** обґрунтовано актуальність теми дисертаційної роботи, сформульовано мету роботи та задачі дослідження, вказано наукову новизну та практичну цінність одержаних результатів, а також подано інформацію про особистий внесок здобувача, апробацію результатів роботи та наявні публікації.

В **першому розділі** викладено принцип дії, специфіку функціонування, особливості конструкцій різних типів надпровідних обмежувачів струму, проведено огляд математичних моделей теплоелектричних процесів у резисторних НПОС і програмних засобів для їх проектування. На підставі аналізу літературних джерел, визначено основні недоліки існуючих програмних засобів аналізу теплоелектричних процесів у резисторних надпровідних обмежувачах струму, формалізовано завдання досліджень.

У **другому розділі** розглянуто побудовані математичні моделі теплоелектричних процесів резисторних надпровідних обмежувачів струму та методи їх аналізу.

Проведено аналіз *тривимірної математичної моделі нестационарних теплоелектричних процесів у резисторних НПОС* (рис. 1), яка враховує нелінійні залежності електричного опору, теплопровідності і теплоємності надпровідного матеріалу від температури та струму. Цю модель формалізовано у вигляді наведених нижче рівнянь електричних і теплових процесів та граничних умов.

Рис.1. Схематична конструкція резисторного НПОС з надпровідної кераміки, виготовленого методом епітаксіального нарощування на діелектричній підкладці.

Електричні процеси у надпровідній пластині описуються рівняннями:

$$\operatorname{div}(\sigma(i,T)\operatorname{grad}V) = 0, \quad E = \operatorname{grad}V, \quad \sigma(i,T) \cdot E = i,$$

де i - густина струму, E - напруженість електричного поля, T - температура, $\sigma(i,T)$ - електрична провідність, V - електричний потенціал. Різниця електричних потенціалів на границях поверхонь контактів дорівнює:

$$\Delta V = U_{sfcl},$$

де U_{sfcl} - падіння напруги на НПОС.

Теплові процеси у надпровідній пластині описуються рівнянням:

$$c(T)\rho \frac{\partial T}{\partial t} = \operatorname{div}(\lambda(T)\operatorname{grad}(T)) + f(i,T),$$

де $c(T)$ і $\lambda(T)$ - відповідно, коефіцієнти теплоємності і теплопровідності надпровідного матеріалу, ρ - густина надпровідного матеріалу, $f(i,T)$ - функція, що виражає тепловиділення у НПОС таким чином:

$$f(i,T) \approx \begin{cases} 0, & \text{при } i < i_c(T) \text{ і } T < T_c; \\ \rho_n(1 + \alpha_\rho(T_k - T_c)) \cdot i^2, & \text{при } i > i_c(T) \text{ або } T > T_c, \end{cases}$$

де ρ_s , ρ_n - питомий електричний опір надпровідника відповідно у надпровідному і критичному стані, T_c - критична температура надпровідника, α_ρ - константа, що виражає ріст електричного опору надпровідника з підвищенням температури. Найнижча температура надпровідника дорівнює температурі $T_0 = 77,3$ К. В інтервалі температури $[T_0, T_c]$ залежність критичного струму від температури апроксимована кусково-лінійною функцією:

$$i_c(T) = \begin{cases} i_c(T_0) \frac{T_c - T}{T_c - T_0}, & T < T_c; \\ 0, & T > T_c. \end{cases}$$

Теплові процеси у діелектричній підкладці описані рівнянням:

$$c_p \rho_p \frac{\partial T}{\partial t} = \lambda_p \operatorname{div}(\operatorname{grad} T),$$

де c_p , λ_p - відповідно, коефіцієнти теплоємності і теплопровідності, ρ_p - густина матеріалу підкладки.

Нелінійну систему рівнянь моделі розв'язано методом скінчених елементів за рахунок використання таких прийомів: автоматичного вибору кроку за часом і його зменшення у випадку розбіжності розв'язку, апроксимація різкого збільшення струму внаслідок короткого замикання поліноміальною функцією, ітераційність обчислень розподілу струму та температури. Недолік моделі полягає у тому, що її аналіз потребує великої кількості обчислень, тому призведе до надмірних часових затрат і неможливості досягнути високої точності результатів внаслідок впливу обчислювальної похибки.

Розроблено *одновимірну математичну модель нестационарних теплоелектричних процесів резисторних НПОС*, при побудові якої використано припущення про однорідність розподілу температури і струму вздовж товщини і довжини пластини, що є адекватним для випадків, коли товщина надпровідної пластини набагато менша за інші геометричні розміри. Проведені модельні експерименти показали, що математична модель ефективна для аналізу теплоелектричних процесів НПОС, надпровідний елемент якого має вигляд тонкої пластини (довжина і ширина ≈ 1 см, товщина ≈ 1 мкм).

Вважатимемо процеси, що відбуваються в надпровідній пластині симетричними відносно середини пластини (рис.2.).

Напруженість електричного поля однакова у будь-якій точці надпровідної пластини і дорівнює:

$$\forall x \in \left[-\frac{h}{2}, +\frac{h}{2} \right]: E = \frac{i(x)}{\sigma(i(x), T(x))} = \frac{U_{sfcl}}{l},$$

де $i(x)$ - густина струму в точці x , $\sigma(T(x), i(x))$ - питома електрична провідність надпровідника у точці x .

З правил Кіргофа, однорідності розподілу струму по ширині пластини і симетрії електричних процесів випливає, що сумарний струм, який протікає через надпровідну пластину, рівний:

$$I = a \int_{-\frac{h}{2}}^{\frac{h}{2}} i(x) dx = 2a \int_0^{\frac{h}{2}} i(x) dx.$$

Рис.2. Схематичне зображення резисторного НПОС на основі тонкої надпровідної пластини.

При побудові моделі використано припущення, що електрична провідність надпровідної кераміки залежить від температури та струму таким чином:

$$\sigma(i, T) = \begin{cases} \sigma_s, & T < T_c \text{ і } i < i_c(T); \\ \sigma: \sigma_s > \sigma > \sigma_n, & i = i_c(T); \\ \sigma_n, & T \geq T_c \text{ або } i > i_c(T). \end{cases}$$

За рахунок зменшення вимірності математичної моделі розроблений метод аналізу потребує меншу кількість обчислювальних ресурсів у порівнянні з затратами аналізу теплоелектричних процесів тривимірної математичної моделі, а також більш швидкої збіжності ітераційних процесів. Під час аналізу електричних процесів обчислювались положення рухомих границь ділянок різного стану в надпровідній пластині (рис. 3) та значення струму в них.

Рис.3. Схематичне зображення перерізу пластини з надпровідної кераміки при наявності в ній ділянок різної провідності (а), залежності густини струму(б) і питомої електричної провідності пластини (в) від відстані до центру симетрії пластини.

Розвинуто модель нестационарних теплових процесів резисторних НПОС у поєднанні з механічним реле для захисту електронних пристроїв від короткого замикання шляхом урахування повної втрати надпровідності у критичному електричному режимі та відсутності струму в режимі відновлення за рахунок роботи механічних засобів захисту, що дало можливість застосувати чисельно-аналітичні методи аналізу температурного розподілу.

За таких умов розподіл струму в НПОС є однорідний і математична модель зводиться до відповідного опису теплових процесів. При цьому залежність електричного струму від часу, а також нелінійні залежності теплоємності та теплопровідності від температури апроксимовано кусково-лінійними або кусково-сталими функціями.

Рівняння теплопровідності у надпровідній пластині має вигляд:

$$c(T)\rho \frac{\partial T}{\partial t} = \operatorname{div}(\lambda(T)\operatorname{grad}T) + f(T),$$

де $f(T)$ - кусково-лінійна функція, яка виражає залежність тепловиділення від температури у надпровіднику, а $c(T)$ і $\lambda(T)$ - кусково-сталі залежності коефіцієнтів теплоємності і теплопровідності надпровідника від температури.

Розроблено метод аналізу теплових процесів у НПОС, що за вищеописаних припущень моделі знаходить розв'язок із наперед встановленою точністю. Загальний розв'язок рівняння теплопровідності представлено у вигляді:

$$T(x,t) = \sum_{i,j,m} \alpha_{m,i,j}(x,t) \cos(k_m^1 x_1) \cos(k_i^2 x_2) \cos(k_j^3 x_3),$$

де $\alpha_{m,i,j}(x,t)$ - кусково-диференційовані неперервні функції, коефіцієнти k_m^1 , k_i^2 і k_j^3 отримано шляхом підстановки загального розв'язку в граничні умови та розв'язанням задач на власні значення.

У цьому ж розділі зроблено прості аналітичні оцінки часу відновлення НПОС після критичного навантаження, розподілу температури НПОС у різних теплоелектричних режимах, умови відновлення надпровідного стану після критичного навантаження.

У третьому розділі розглянуто архітектуру та організацію розробленої системи теплового аналізу та синтезу конструктивних параметрів резисторних надпровідних обмежувачів струму.

На рис. 4 зображено інформаційну модель створеної системи у вигляді UML-діаграми класів, яка дає можливість описувати резисторні НПОС, різні електричні режими схеми, поставлені задачі та вихідні дані.

Рис.4. Інформаційна модель системи автоматизованого проектування НПОС.

Внутрішня структура створеного програмного забезпечення реалізована у вигляді сукупності класів на мові програмування C++, методи для обчислення розподілу температури та струму розроблені у програмній оболонці Matlab і за допомогою компілятора МСС переведені у програмний код мови С. Програмний комплекс реалізований у вигляді динамічної бібліотеки (DLL-dynamic link library), яка може бути приєднана до інших засобів проектування. Використання XML - формату для реалізації бази даних матеріалів і файлу результатів досліджень аналізу розподілу температури та струму дає можливість використовувати існуючі програмні засоби та технології для запису, обробки і аналізу вихідних і вхідних даних задач теплового проектування.

Побудована система характеризується гнучкістю, не вимагає від користувача знання внутрішньої архітектури системи та реалізації закладених у ній методів і алгоритмів. Інформація

про об'єкт проектування включає вхідні дані геометричних параметрів і матеріалів, які використано при його виготовленні. Кожен вхідний геометричний параметр НПОС описується масивом, який може містити більше одного значення. Задача знаходження розподілу температури та струму розв'язується для кожного набору вхідних геометричних параметрів НПОС, що дає можливість аналізувати вплив вхідних параметрів на вихідні характеристики.

Окрім інформації про об'єкт проектування, клас задачі містить параметри електричної схеми і режиму. Задача аналізу містить дані про метод аналізу, задача синтезу – інформацію про обмеження задачі оптимізації і вагові коефіцієнти цільової функції.

Результати зберігаються у окремому класі-контейнері, що може містити не лише розподіл температури і струму, але і залежність інших обчислених вихідних характеристики від заданої кількості вхідних параметрів. Наприклад, містити дані про зміну середньої температури НПОС у часі, значення струму в системі, опору НПОС і т.д.

У четвертому розділі розроблено алгоритм синтезу конструктивних параметрів НПОС, проведено верифікацію створених моделей шляхом порівняння результатів аналізу із результатами, отриманими іншими дослідниками, представлено результати дослідження впливу параметрів НПОС на функціональні характеристики обмежувача струму.

У четвертому розділі також розроблено метод синтезу конструктивних параметрів надпровідного резисторного обмежувача струму на базі квазі-ньютонівського методу оптимізації і розроблених математичних моделей, який дає змогу знайти відповідні оптимальні параметри НПОС із незначними обчислювальними затратами.

Задачу конструктивно-параметричного синтезу НПОС формалізовано як задачу мінімізації цільової функції з відповідними обмеженнями щодо геометричних, теплових та електричних характеристик НПОС:

$$F(l, a, h, M) = \omega_{im} \sqrt{\int_0^{\tau_{im}} (I_n - I_c(t))^2 dt} + \omega_{c.st} |I_n - I_{c.st}| + \omega_r \sqrt{\int_{\tau_c}^{\tau_c + \tau_r} (I_n - I_r(t))^2 dt} + \omega_n Q_n,$$

де l, a, h - геометричні параметри НПОС, M - дискретний параметр, що визначає матеріали конструкції НПОС, τ_{im} - час ударного струму короткого замикання, $I_c(t)$ - струм у схемі під час короткого замикання, $I_{c.st}$ - значення стабілізованого у часі струму короткого замикання, I_n - струм у схемі в нормальному режимі, τ_c - час критичного режиму, τ_r - час відновлення НПОС після критичного режиму, $I_r(t)$ - струм у схемі при режимі відновлення, Q_n - тепловиділення в НПОС у нормальному режимі, $\omega_{im}, \omega_{st}, \omega_r, \omega_n$ - вагові коефіцієнти, що визначаються проектувальником відповідно до ступеня важливості характеристик пристрою.

Для оптимізації цільової функції використано квазі-ньютонівський метод оптимізації, відповідно для знаходження значень цільової функції, її градієнтів і якобіану багатократно розв'язувалась задача аналізу теплоелектричних процесів НПОС (рис. 5).

Рис.5. Блок-схема алгоритму синтезу параметрів НПОС.

Розроблений алгоритм синтезу конструктивних параметрів НПОС базується на кількох-етапній оптимізації, на кожному етапі якої для обчислень знаходився оптимум цільової

функції, а для обчислень значень цільової функції використовувалась одна із розроблених математичних моделей, яка вибиралась виходячи з потреб точності і швидкості даного етапу. На початкових етапах синтезу використано моделі, які потребують найменше обчислювальних ресурсів для її аналізу, на останньому етапі для обчислень використано тривимірну математичну модель, яка адекватно відображає теплоелектричні процеси враховуючи нелінійну залежність теплоелектричних характеристик від температури і струму.

Знайдені на попередньому етапі оптимальні параметри конструкції НПОС використовувались як початкове наближення наступного етапу. Застосування цього алгоритму дало змогу зменшити обчислювальні затрати процесу синтезу в сотні разів.

Розглянуто декілька варіантів обмежувачів струму, ваговими коефіцієнтами цільової функції, синтезовані параметри і вихідні характеристики яких наведені у табл. 1.

Таблиця 1. Оптимальні геометричні параметри конструкції НПОС і відповідні характеристики пристрою.

	НПОС “гарячого типу”	НПОС “холодного типу”	НПОС із усеред. характерист.
Ваговий коефіцієнт $\omega_{c.st}$	1	10^4	10
Ваговий коефіцієнт ω_{im}	0	10	1
Ваговий коефіцієнт ω_r	1	10^4	1
Ваговий коефіцієнт ω_n	10^7	10^2	10^6
Товщина, <i>мм</i>	90,18	49,9	43,1
Ширина, <i>мм</i>	9,3	5,5	6,2
Довжина, <i>см</i>	12,44	57,3	12,76
Макс. температура у критичному режимі, <i>К</i>	98,2	73,6	82,5
Відхилення струму від норми у критичному режимі, <i>А</i>	107,90	5,1404	3,326
Відхилення струму від норми у режимі відновлення, <i>А</i>	17,42	0,692	13,32
Опір НПОС у норм. режимі, <i>Ом</i>	$1,48 \cdot 10^{-5}$	$2,02 \cdot 10^{-4}$	$4,77 \cdot 10^{-5}$

На рис. 6 зображено значення струму в схемі під час критичного режиму та режиму відновлення для різних НПОС, знайдених розробленим методом оптимального пошуку конструктивних параметрів. НПОС “холодного типу” має найкращі струмообмежувальні характеристики, але частіше від інших синтезованих варіантів потребує заміни криогенного охолоджувача у ньому. НПОС “гарячого типу” має найменші розміри і потребує мінімальну кількість азоту, але володіє найгіршими струмообмежувальними характеристиками. Відповідно НПОС із усередненими характеристиками має проміжні властивості двох попередніх варіантів.

Рис.6. Обчислена зміна струму в схемі з резисторним НПОС у часі для оптимальних параметрів конструкції НПОС: НПОС “гарячого типу” (а); б) НПОС “холодного типу”(б), НПОС із усередненими характеристиками (в).

Нижче представлено результати одного із модельних експериментів для визначення впливу товщини НПОС на його характеристики з такими параметрами: критичне навантаження схеми ε_{crit} - 300 В, час критичного навантаження t - 0.16 мс, навантаження в нормальному режимі ε_{normal} - 1.5 В, опір схеми у нормальному режимі - 0.1 Ом, ширина надпровідної пластини - 5 мм, довжина надпровідної пластини - 20 см, товщина – 50 мкм.

Товщина надпровідної пластини впливає на інертність теплових процесів у ній. Як показали розрахунки (рис. 7), НПОС із товщиною надпровідної пластини 100 мкм має найвищу середню температуру 88 К у критичному режимі, тоді як середня температура НПОС із товщиною надпровідної пластини 20 мкм лише 77,9 К (рис.7а).

Рис.7. Обчислена динамічна зміна температури (а) та струму(б) у схемі з резисторним НПОС при різній товщині надпровідної пластини.

На початку критичного режиму струм різко збільшується, але в критичному режимі зменшується у зв'язку з подальшим збільшенням опору НПОС внаслідок нагрівання (рис. 7.б). Чим більша товщина НПОС, тим триваліші процеси відновлення, що є результатом більшого нагрівання у критичному режимі та повільнішого охолодження в режимі відновлення.

Електричний опір НПОС у критичному режимі збільшується внаслідок впливу теплових процесів. Різниця між значення електричного опору НПОС на початку критичного режиму та його значення у стабілізованому режимі критичного навантаження для НПОС із товщиною надпровідної пластини 100мкм становила 25%, а для НПОС із товщиною надпровідної пластини 20мкм - лише 5% (рис. 7.б).

Нелінійна залежність максимального електричного опору НПОС спричинена характером зростання електричного опору (рис. 8.б). При довжині пластини меншій 14 см, вихід із надпровідного стану зумовлений різким перевищенням густини струму критичного значення.

Рис.8. Обчислений опір НПОС у залежності від товщини (а) і довжини (б). Максимальне значення електричного опору НПОС у критичному режимі позначене суцільною лінією, значення електричного опору НПОС на початку критичного режиму позначене штрих-пунктирною лінією.

Для НПОС із довжиною надпровідної пластини, більшою ніж 14 см, значення електричного опору на початку рівне 5.9 Ом, незалежно від довжини пластини. При цьому НПОС з надпровідного

стану вийде лише частково, але теплові процеси можуть спричинити повну втрату надпровідності, що відбудеться, наприклад, при довжині пластини 22см.

Характерним для процесів відновлення є те, що після закінчення критичного режиму в НПОС залишаться надпровідні ділянки, температура яких менша за критичну, тому струм у режимі відновлення може не спричинити появи значного електричного опору. Наприклад, для заданих характеристик НПОС при товщині меншій 92 мкм (рис. 9.а), або при довжині більшій 17 см (рис. 9.б) час відновлення практично рівний нулю.

Рис.9. Обчислена залежність часу відновлення надпровідного обмежувача струму від товщини (а) та довжини (б)

Товщина надпровідної пластини впливає на інертність теплових процесів, тому, незважаючи на те, що для НПОС із більшою товщиною електричний опір є менший, час електричного відновлення буде більший (рис. 9.а). Довжина не впливає на тепловий опір НПОС, але впливатиме на значення температури після закінчення критичного режиму і залежність часу відновлення від довжини має монотонно-спадний характер (рис. 9.б).

ОСНОВНІ РЕЗУЛЬТАТИ ТА ВИСНОВКИ

У дисертації розв'язано наукову задачу розробки програмного і математичного забезпечення теплового проектування резисторних надпровідних обмежувачів струму для захисту мікроелектронних пристроїв за допомогою розроблених математичних моделей, методів їх аналізу та програмно-методичного комплексу, що дало змогу ефективно розв'язувати задачі аналізу теплоелектричних процесів та синтезу конструктивних параметрів резисторних надпровідних обмежувачів струму.

1. Проведено аналіз актуального стану, потреб і сучасних задач в галузі проектування резисторних надпровідних обмежувачів струму, сформульовано основні вимоги до математичного та програмного забезпечення теплового проектування резисторних надпровідних обмежувачів струму.

2. Розвинуто математичну модель резисторного надпровідного обмежувача струму в поєднанні з механічним реле в якості засобу захисту мікроелектронних пристроїв, яка відображає тривимірні нестационарні теплоелектричні процеси у надпровідному обмежувачі струму та враховує нелінійну залежність коефіцієнтів теплоємності, теплопровідності і електричного опору надпровідного матеріалу від температури та струму. Модель адекватно відображає теплоелектричні процеси у критичному режимі при повній втраті надпровідності в резисторних надпровідних обмежувачах струму і у режимі відновлення при відсутності струму в схемі. Розроблено метод розв'язання рівнянь моделі, який апроксимує нелінійні залежності теплофізичних і електричних характеристик надпровідного матеріалу від температури і струму кусково-лінійними та кусково-сталими функціями й дозволяє отримати розв'язок рівняння теплопровідності у чисельно-аналітичному вигляді.
3. Побудовано нову одновимірну нестационарну математичну модель теплоелектричних процесів у резисторному надпровідному обмежувачі струму, конструкція якого представлена тонкою надпровідною пластиною на діелектричній підкладці, яка враховує нелінійну залежність електричних характеристик надпровідного матеріалу від теплоелектричного режиму обмежувача струму та параметри електричного режиму і системи. Розроблено метод розв'язання рівнянь моделі, який забезпечує зменшення часових затрат при проектуванні надпровідного обмежувача струму й уникнення розбіжності ітераційних процесів при обчисленнях.
4. Запропоновано й обґрунтовано алгоритм синтезу конструктивних параметрів надпровідного обмежувача струму, що базується на використанні різних математичних моделей теплоелектричних процесів, суттєво зменшуючи час пошуку оптимальних параметрів обмежувача струму.
5. На базі створених математичних моделей розроблено програмне забезпечення, яке автоматизує розв'язок задач нестационарного аналізу теплоелектричних процесів у резисторних НПОС, синтезу конструктивних параметрів резисторних НПОС та визначення впливу конструктивних параметрів НПОС на їх функціональні характеристики.
6. Проведені чисельні експерименти з метою верифікації розроблених математичних моделей, методів та алгоритмів їх аналізу засвідчили достовірність одержаних результатів аналізу нестационарних теплоелектричних процесів.

СПИСОК ОПУБЛІКОВАНИХ ПРАЦЬ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЙНОЇ РОБОТИ

1. Федасюк Д.В., Сердюк П.В. Математична модель теплоелектричних процесів резисторного надпровідного обмежувача струму // Вісник Національного університету

- “Львівська політехніка”: Комп’ютерні системи. Теорія і практика.- 2005.- № 548.- С. 97-106.
2. Сердюк П.В. Конструктивно-параметричний синтез обмежувачів струму на основі тонкої надпровідної пластини // Вісник Національного університету “Львівська політехніка”: Комп’ютерні системи. Теорія і практика.- 2006.- № 564.- С. 54-59.
 3. Fedasyuk D., Serdyuk P. Thermoelectrical processes simulation in resistive superconducting fault current limiter // International Scientific Journal of Computing.- 2006.- Vol. 5, Issue 1. - P. 100-106.
 4. Федасюк Д.В., Сердюк П.В. Теплоелектричні процеси у обмежувачі струму на основі тонкої надпровідної пластини // Інформаційні технології та комп’ютерна інженерія.- 2006.- №3 (7) .- С. 44-52.
 5. Fedasyuk D.V., Serdyuk P.V. Mathematical modeling of thermoelectrical processes in resistive superconducting fault current limiter // Proceeding of conference “Modern problems of radio engineering, telecommunications and computer science” (TCSET’2006).- Lviv-Slavsko, 2006.- P. 77-80.
 6. Fedasyuk D., Serdyuk P. Simulation of superconducting fault current limiter behaviour with Matlab/Femlab/Simulink environment // Proceedings of the international conference “Computer Science and Information Technologies” (CSIT’2006).- Lviv, 2006.- P. 77-80.
 7. Федасюк Д., Сердюк П. Синтез конструктивних параметрів резисторного обмежувача струму із застосуванням математичних моделей теплоелектричних процесів у надпровідниках // Матеріали 1-ї міжнародної наукової конференції молодих науковців “Комп’ютерні науки та інженерія”.- Львів, 2006.- С. 113-115.

АНОТАЦІЇ

Сердюк П.В. Математичне та програмне забезпечення теплового проектування резисторних надпровідних обмежувачів струму для захисту мікроелектронних пристроїв. – Рукопис.

Дисертація на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук за спеціальністю 05.13.12 – системи автоматизації проектувальних робіт. – Національний університет “Львівська політехніка”, Львів, 2007.

Дисертація присвячена питанням проектування резисторних надпровідних обмежувачів струму – сучасному засобу захисту електричних пристроїв від критичних електричних навантажень.

У дисертаційній роботі розв’язано важливу задачу підвищення ефективності проектування надпровідних обмежувачів струму на основі створених нелінійних математичних моделей, а також

відповідних методів та алгоритмів аналізу розподілу температурного й електричного полів. Розроблене математичне та програмне забезпечення дає можливість ефективно розв'язувати задачі аналізу нестационарних теплоелектричних процесів і задачі конструктивно-параметричного синтезу резисторних надпровідних обмежувачів струму.

Ключові слова: надпровідний обмежувач струму, автоматизоване проектування, теплоелектричний процес, нелінійна математична модель.

Сердюк П.В. Математическое и программное обеспечение теплового проектирования резисторных сверхпроводимых ограничителей тока для защиты микроэлектронных приборов. – Рукопись.

Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 05.13.12 – системы автоматизации проектирования. – Национальный университет “Львовская политехника”, Львов, 2007.

Диссертация посвящена вопросам проектирования резисторных сверхпроводимых токоограничителей – современному средству защиты электрических приборов от критических электрических нагрузок.

В диссертационной работе решена важная задача повышения эффективности проектирования сверхпроводимых ограничителей тока на основе созданных нелинейных математических моделей, а также соответствующих методов и алгоритмов анализа распределения температурного и электрического поля. Разработанное математическое и программное обеспечение дает возможность эффективно решать задачи анализа нестационарных теплоэлектрических процессов и задачи конструктивно-параметрического синтеза резисторных сверхпроводимых ограничителей тока.

Ключевые слова: сверхпроводимый токоограничитель, автоматизированное проектирование, теплоэлектрический процесс, нелинейная математическая модель.

Serdyuk P. V. Mathematical notation and software for the thermal design of superconducting fault current limiters for protection of microelectronic devices. – Manuscript.

Thesis for a Ph.D. degree by the specialty 05.13.12 – computer aided design systems. – Lviv Polytechnic National University, Lviv, 2007.

Dissertation is devoted to the design questions of a resistor superconductor fault current limiter (SFCL), one of the modern protection devices from critical current fault.

The development of new nonlinear mathematical models and appropriate methods and algorithms of analyzing distributed temperature and electrical field in superconductor fault current limiter provide for the solution of the important problem of increase SFCL design efficiency. The developed computer-aided

design system of resistor superconductor fault current limiter provides flexible and effective solution to tasks of analysis of the unstationary thermoelectrical processes and to the task of synthesis resistor superconductor fault current limiter construction parameters.

The first chapter reviews different types and mathematical models of superconducting fault current limiters. Analysis of instruments for modelling thermoelectrical processes in resistive SFCL is performed; imperfections in existing mathematical models CAD system for SFCL are defined.

The second chapter is devoted to the modelling thermoelectrical processes in a resistive superconducting fault current limiter. New nonlinear mathematical models of resistive SFCL, applied to different cases of thermoelectrical regime and construction are presented: model that approaches nonlinear electrical and thermal characteristic by piecewise approximation, one-dimensional model for analysis thermoelectrical processes in thin film and three-dimension nonlinear model that presents nonlinear dependencies of superconductor from temperature and current density. New numerical and half-analytical methods for analysis of the appropriate mathematical models are presented.

In the third chapter the concepts of realization of the developed CAD system are described. Information model of the package is presented as UML class diagram. Analysis algorithms of thermoelectrical processes mathematical models are described. The efficiency of presented algorithms is analyzed. Question of integration created package with existing CAD systems is solved, open XML format of design input and output data is described. Encapsulation principles of the created CAD system are considered, adaptive methods of analysis are reviewed.

In the fourth chapter the results of simulation are presented and compared with published results of other authors. The accuracy of different models is estimated, influence of SFCL parameters such as superconductor film height, width and length on its functional characteristics is investigated. Problem of synthesis resistive superconductive fault current limiter construction parameters is formulated and solved. Effective algorithm of construction parameters synthesis based on the use of different mathematical models with different accuracy and speed of analysis is proposed.

Keywords: superconductor fault current limiter, computer-aided design, thermoelectrical process, nonlinear mathematical model.