

Висновки

Розглянутий вище приклад показує доцільність застосування мереж Петрі при проектуванні MEMS на системному рівні для аналізу динаміки системи та визначення низки вихідних параметрів.

1. Gupta R.K., Zorian Y. *Introducing in Core-Based System Design // Design & Test of Computer, Oct/Dec, 1997.* 2. Биосенсоры // *Итоги науки и техники. Сер. Биотехнология. М.: ВИНТИ, 1990. Т. 26.* 3. Krishnamoorthy U., Solgaard O. *Self-Aligned Vertical Comb-drive Actuators for Optical Scanning Micromirrors // 2000 IEEE/LEOS International Conference on Optical MEMS, Okinawa, Japan, Sep. 2001.* 4. Krishnamoorthy, U., Li, K., Yu, K., Lee, D., Heritage, J.P and Solgaard, O. *Dual-Mode micromirrors for Optical Phased Array Applications // Transducers'01, Munich, Germany, June 2001.* 5. Torsten Gerlach, Helmut Wurmus *Working principle and performance of the dynamic micropump // Sensors and Actuators A50, 1995. – P.135–140.* 6. Тернер Э., Карубе И. *Биосенсоры: основы и приложения. – М., 1992.* 7. Fatikow, S and Rembold, U, (1997). *Microsystems Technology and Microrobotics, Springer, New York.* 8. Петренко А. И., Семенов А. И. *Основы построения систем автоматизированного проектирования, – К., 1984.* 9. Петренко А. И. *Основы автоматизации проектирования. – К., 1982.* 10. Дж. Питерсон. *Теория сетей Петри и моделирование систем. – М., 1984.* 11. Котов В.Е. *Сети Петри. – М., 1984.*

УДК 004.942.001.57

П.В. Сердюк

Національний університет “Львівська політехніка”
кафедра програмного забезпечення

КОНСТРУКТИВНО-ПАРАМЕТРИЧНИЙ СИНТЕЗ ОБМЕЖУВАЧІВ СТРУМУ НА ОСНОВІ ТОНКОЇ НАДПРОВІДНОЇ ПЛАСТИНИ

© Сердюк П.В., 2006

Розглянуто аспекти проектування надпровідних обмежувачів струму. Запропонований ефективний алгоритм синтезу конструктивних параметрів пристрою на підставі одновимірної математичної моделі теплоелектричних процесів у тонкій надпровідній пластині.

In this article designing principles of resistive fault current limiters are concerned. Effective algorithm of synthesis of construction parameters based on the one-dimensional mathematical model of thermoelectrical processes in thin superconducting film is proposed.

Вступ

Принципово новим розв'язанням проблеми захисту електронних пристроїв та схем від електричного перенавантаження (короткого замикання, електромагнітного імпульсу, удару блискавки тощо) стало використання надпровідних обмежувачів струму (НПОС). Принцип дії резисторних надпровідних обмежувачів струму полягає у нелінійній вольт-амперній характеристиці надпровідного матеріалу. У разі перевищення густини струму у надпровіднику певного критичного значення матеріал переходить із надпровідного у нормальний стан і його опір різко зростає.

Ми розглядаємо резисторні НПОС із надпровідної кераміки, виготовлені у вигляді пластини методом епітаксiального нарощування на діелектричній підкладці [1]. Перевага такого методу полягає у тому, що виготовлені таким способом плівки мають малу кількість дефектів. Для підкладки використовують спеціальні матеріали LaAlO_3 або MgO , кристалічна структура яких подібна до структури надпровідної кераміки. Коефіцієнти температурного розширення цих матеріалів і надпровідної кераміки є близькими, що дає змогу вберегти надпровідні пластини від механічного пошкодження під час їхнього виготовлення.

Процеси, що відбуваються у надпровідниках під час критичних навантажень, достатньо складні для описання та досліджень, оскільки електричні та теплофізичні характеристики надпровідного матеріалу нелінійно залежать від температури й струму. Це спричиняє значні обчислювальні затрати на аналіз математичних моделей НПОС, що зазначено у роботах [2, 3, 4]. У зв'язку з цим під час проектування НПОС доцільно використовувати математичні моделі теплоелектричних процесів у надпровідниках, які достовірно описують теплоелектричні процеси, і, разом із тим, не вимагають значних обчислювальних ресурсів на їхній аналіз.

У роботі [5, 6] була запропонована модель аналізу теплоелектричних процесів НПОС, яка, використовуючи деякі припущення, давала змогу отримати розв'язок задачі знаходження розподілу температури у НПОС для заданої конструкції у аналітичному вигляді. Інший спосіб зменшення часових затрат під час проектування полягає у врахуванні особливостей конструкції НПОС, а саме можливості використання одновимірної моделі для аналізу теплоелектричних процесів у надпровіднику, що є припустимим, якщо товщина надпровідної пластини значно менша від інших геометричних розмірів пластини, і розподіл струму й температури можна вважати рівномірним по довжині й ширині пластини. **Мета досліджень цієї роботи** – створення автоматизованого методу синтезу конструктивних параметрів резистивного НПОС, що має конструкцію тонкої надпровідної пластини.

Постановка задачі

Під час пошуку оптимальних параметрів НПОС необхідно враховувати, насамперед, параметри пристрою чи схеми, яку необхідно захистити: її електричний опір, індуктивність та ємність, максимальне допустиме навантаження й струм. Окрім того, визначальними для параметрів НПОС будуть характеристики критичного навантаження: сила й довжина критичного навантаження, які можна передбачити, знаючи тип можливого критичного навантаження. Треба також врахувати, чи схема працює при змінному чи постійному струмі, оскільки опір надпровідного матеріалу при змінному струмі значно вищий за його опір при постійному струмі та залежить від частоти струму.

Область параметричного пошуку конструктивних параметрів НПОС задається такими змінними:

- 1) Геометричними параметрами надпровідної пластини: її довжиною l , товщиною h та шириною a .
- 2) Матеріалом конструкції та способом її виготовлення. До них можна зарахувати:
 - a. Матеріал надпровідного елемента. Як правило, для виготовлення резисторних НПОС використовують надпровідну кераміку YBCO чи Bi-2122.
 - b. Спосіб виготовлення, що впливає на кількість можливих дефектів під виготовлення пластини.
 - c. Матеріал підкладки : LaAlO_3 , MgO чи інший.
 - d. Тип криогенного охолоджувача: рідкий азот чи гелій.
 - e. Наявність чи відсутність шунта.

Зауважимо, що пошук оптимальних параметрів матеріалу конструкції та способу виготовлення ведеться у невеликій дискретній області значень і може відбуватись методом перебору, тоді як пошук оптимальних геометричних параметрів конструкції НПОС відбувається у неперервній області значень і потребує відповідних методів синтезу.

У НПОС можна виділити три основні теплоелектричні режими:

- 1) Нормальний режим, коли струм у електричній системі перебуває у допустимих межах, опір НПОС незначний.
- 2) Критичний режим, коли внаслідок непередбачуваних обставин (коротке замикання тощо) електричне навантаження перевищує допустиме. У цьому режимі опір НПОС значно більший за опір у нормальному режимі роботи;
- 3) Режим відновлення, коли опір НПОС повертатиметься до початкового значення після критичного навантаження.

Під час проектування НПОС необхідно орієнтуватись на досягнення таких цілей:

1) Мінімізація впливу критичного режиму на схему. Потрібно врахувати як вплив ударного струму короткого замикання, так і вплив стабілізованого струму короткого замикання.

2) Уникнути чи зменшити вплив НПОС у нормальному електричному режимі роботи схеми. Наявність дефектів у надпровідному матеріалі може спричинити додатковий опір НПОС, теплову нестабільність у нормальному режимі роботи і додаткові втрати криогенного охолоджувача.

3) Мінімізація впливу відновлення НПОС після критичного навантаження. У критичному режимі НПОС набуде певної температури, і потребуватиме деякого часу для того, щоб повернутись до температури рідкого азоту. При змінному струмі чи наявності дефектів можлива ситуація, що НПОС не повернеться до початкового стану.

4) Економічна доцільність використання НПОС. Окрім коштів, що потребує виготовлення НПОС, необхідно також врахувати витрати на поновлення криогенного охолоджувача у НПОС.

Відповідну цільову функцію задачі синтезу можна виразити так:

$$F(l, a, h, M) = F_c(\tau_c, I_c(t)) + \omega_r \sqrt{\int_{\tau_c}^{\tau_c + \tau_r} (I_n - I_r(t))^2 dt} + \omega_n Q_n + \omega_{costs} P_{costs} \rightarrow \min, \quad (1)$$

де M – дискретний параметр, що визначає спосіб виготовлення НПОС, $F_c(\tau_c, I_c(t))$ – оцінка негативного впливу критичного режиму на схему, що може бути обчислена як сума впливу ударного струму критичного замикання та впливу струму стабілізованого критичного замикання:

$$F_c(\tau_c, I_c(t)) = \omega_{im} \sqrt{\int_0^{\tau_{im}} (I_n - I_c(t))^2 dt} + \omega_{st} |I_n - I_{c.st}|, \quad (2)$$

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 у нормальному режимі; τ_c – час критичного режиму; τ_r – час відновлення НПОС після критичного режиму; $I_r(t)$ – струм у схемі за режиму відновлення; Q_n – тепловиділення у НПОС у нормальному режимі; P_{costs} – вартість виготовлення; $\omega_{im}, \omega_{st}, \omega_r, \omega_n, \omega_{costs}$ – вагові коефіцієнти, що визначаються проектувальником відповідно до ступеня важливості тих чи інших характеристик пристрою.

Обмеження, які необхідно враховувати у проектуванні НПОС:

1) Обмеження на значення струму у схемі при критичному режимі. У разі критичного навантаження струм у схемі не повинен перевищувати значення, за якого елементи схеми можуть бути частково або повністю виведені з ладу. У цьому аспекті необхідно враховувати на лише зростання опору НПОС на необхідну величину, а й такі особливості надпровідної кераміки:

а. Наявність дефектів у надпровідному матеріалі чи на контактах може спричинити локальний вихід із стану надпровідності НПОС. Опір НПОС може бути недостатній для обмеження струму, і схема може бути пошкоджена.

б. НПОС можуть досягати свого максимального електричного опору за рахунок нагрівання, тому при критичному навантаженні електричний опір НПОС зростає до максимального значення протягом певного часу, що може негативно вплинути на електричну схему.

2) Конструкторські обмеження НПОС: кошти виготовлення, обмеження на геометричні розміри конструкції, запас рідкого азоту тощо.

3) Обмеження на температуру надпровідного матеріалу. Якщо надпровідний матеріал нагріватиметься до високих температур (500 К), НПОС може вийти з ладу. Виходом із такої ситуації може бути використання запобіжників, механічних реле чи іншого додаткового захисту схеми.

Розглянемо такі обмеження задачі оптимізації. Обмеження задачі оптимізації на обмеження струму у нормальному й критичному режимі матиме вигляд:

$$\frac{U_0}{R} < i_c(T_0) \cdot a \cdot h < \frac{U_c}{R}, \quad (3)$$

де U_0 , U_c – навантаження відповідно у нормальному і критичному режимах НПОС; R – опір схеми у нормальному режимі роботи; $i_c(T_0)$ – критична густина струму у НПОС за температури криогенного охолоджувача T_0 .

Зауважимо, що окрім мінімізації впливу критичного замикання, можна задати обмеження на значення стабілізованого та ударного струму у критичному режимі:

$$\int_0^{\tau_{im}} (I_n - I_c(t))^2 dt \leq P_{\max}, \quad I_{\min} \leq I_{c.st} \leq I_{\max}. \quad (4)$$

Конструкторські обмеження на геометричні розміри пластини:

$$h_{\min} \leq h \leq h_{\max}, a_{\min} \leq a \leq a_{\max}, l_{\min} \leq l \leq l_{\max}. \quad (5)$$

Обмеження на температуру надпровідного матеріалу матимуть вигляд

$$\forall x \in V_{SFCL} : T(x) \leq T_{\max}. \quad (6)$$

де V_{SFCL} – область надпровідного обмежувача струму.

Алгоритм та результати обчислень

Точку оптимуму знаходили методом спряжених градієнтів. Під час обчислення використовувалась одновимірна модель теплоелектричних процесів у надпровідному обмежувачі струму. Алгоритм обчислень зображений на рис 1. Для пошуку глобального екстремуму значення цільової функції обчислюється у вузлах сітки допустимої області задачі оптимізації. Кожна точка, значення цільової функції у якій є меншим за значення цільової функції у всіх сусідніх точках, розташована поблизу точки локального екстремуму і її значення брали за початкове у пошуку оптимуму методом спряжених градієнтів.



Рис. 1. Алгоритм синтезу параметрів НПОС

Під час конструктивно-параметричного пошуку застосовували такі обмеження на геометричні розміри:

$$h_{\min} = 10^{-6} \text{ м} \leq h \leq h_{\max} = 10^{-4} \text{ м}; a_{\min} = 10^{-3} \text{ м} \leq a \leq a_{\max} = 0,1 \text{ м}; l_{\min} = 0,1 \text{ м} \leq l \leq l_{\max} = 1 \text{ м}.$$

Обмеження на внутрішню максимальну температуру становило: $T < T_{\max} = 400 \text{ К}$.

Для тестових обчислень бралися параметри надпровідного матеріалу, наведені у табл. 1.

Таблиця 1

Параметри числового експерименту

Електричний опір схеми у нормальному режимі роботи $R = 5 \text{ Ом}$	Теплопровідність пластини $\lambda = 15 \text{ Дж} / \text{мК}$	Навантаження на схему під час критичного режиму $U_c = 250 \text{ В}$	Питома електрична провідність пластини у надпровідному стані $\sigma_n = 10^{11} \text{ Ом}^{-1} \cdot \text{м}^{-1}$
Температура криогенного охолоджувача $T_0 = 77,3 \text{ К}$	Питома теплоємність пластини $c = 150 \text{ Дж} / \text{кг} \times \text{К}$	Навантаження на схему під час нормального режиму $U_0 = 5 \text{ В}$	Питома електрична провідність пластини у нормальному стані $\sigma_s = 10^5 \text{ Ом}^{-1} \cdot \text{м}^{-1}$
Критична температура $T_c = 89 \text{ К}$	Питома густина пластини $\rho = 5500 \text{ кг} / \text{м}^3$	Час критичного навантаження $\tau_c = 0,2 \text{ мс}$	Критична густина струму $i_c(T_0) = 10^8 \text{ А} / \text{м}^2$

Розглядалися декілька варіантів НПОС, вагові характеристики яких наведено у табл. 2.

Таблиця 2

Обмеження пошуку точки оптимуму

НПОС “гарячого типу”	$\omega_{c.st} = 1$	$\omega_{im} = 0$	$\omega_r = 1$	$\omega_n = 10^7$	$\omega_{cos ts} = 0$
НПОС “холодного типу”	$\omega_{c.st} = 10^4$	$\omega_{im} = 10$	$\omega_r = 10^4$	$\omega_n = 10^2$	$\omega_{cos ts} = 0$
НПОС із усередненими характеристиками	$\omega_{c.st} = 10$	$\omega_{im} = 1$	$\omega_r = 1$	$\omega_n = 10^6$	$\omega_{cos ts} = 0$

У результаті синтезу були отримані різні варіанти НПОС, конструктивні параметри і характеристики яких наведені у табл. 3.

Таблиця 3

Оптимальні геометричні параметри конструкції НПОС та відповідні характеристики пристрою

	НПОС “гарячого типу”	НПОС “холодного типу”	НПОС із усеред. характеристик.
Товщина, м	$9,018 \cdot 10^{-5}$	$4,99 \cdot 10^{-5}$	$4,31 \cdot 10^{-5}$
Ширина, м	0,0093	0,0055	0,0062
Довжина, м	0,1244	0,573	0,1276
Макс. температура у критичному режимі, К	98,2	73,6	82,5
Відхилення струму від норми у критичному режимі, А	107,90	5,1404	3,326
Відхилення струму від норми у режимі відновлення, А	17,42	0,692	13,32
Опір НПОС у норм. режимі, Ом	$1,48 \cdot 10^{-5}$	$2,02 \cdot 10^{-4}$	$4,77 \cdot 10^{-5}$
Значення цільової функції	$1,04 \cdot 10^{-3}$	$2,03 \cdot 10^{-3}$	49,4

На рис. 2. зображена зміна значення струму у схемі у часі під час критичного режиму та режиму відновлення для різних конструкцій, знайдених запропонованим методом оптимального пошуку.

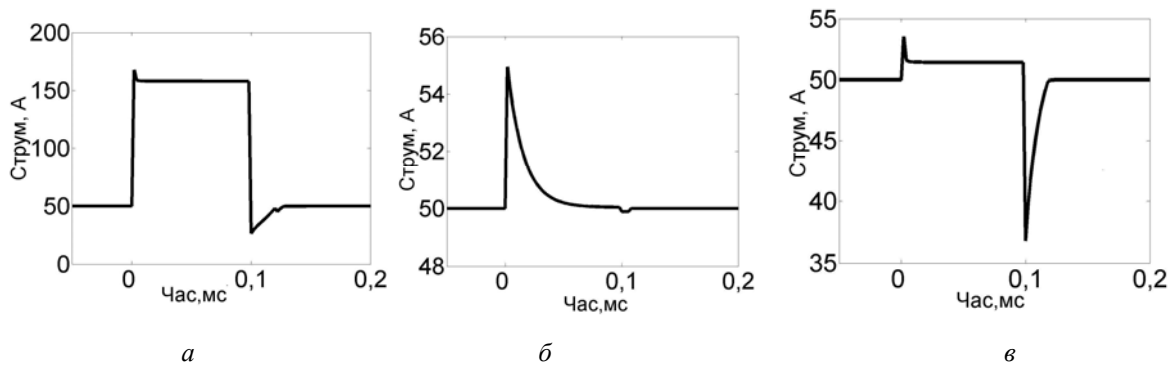


Рис. 2. Обчислена зміна струму у схемі з резистивним НПОС у часі для оптимальних параметрів конструкції НПОС: а – НПОС “гарячого типу”; б – НПОС “холодного типу”; в – НПОС із усередненими характеристиками

НПОС “холодного типу” матиме найкращі характеристики щодо захисту електричних схем від короткого замикання, але серед знайдених варіантів він найчастіше потребуватиме заміни криогенного охолоджувача у ньому. НПОС “гарячого типу” потребуватиме мінімальної кількості рідкого азоту за рахунок зниження характеристик захисту. Відповідно НПОС із усередненими характеристиками матиме проміжні характеристики між заданими варіантами.

Висновок

Сформульована задача синтезу конструктивних параметрів НПОС щодо вимог цього захисного пристрою, враховані специфічні показники і поведінка надпровідного обмежувача струму під час критичного перевантаження електричної системи, режиму її відновлення, та нормальної роботи схеми. Дослідження показали, що автоматизований синтез конструктивних параметрів НПОС на підставі одновимірної моделі теплоелектричних процесів НПОС дає змогу ефективно знаходити параметри захисного пристрою, оптимальні щодо заданих вимог. За рахунок зниження вимірності відповідної математичної моделі, що використовувалась для аналізу характеристик НПОС, наведений алгоритм синтезу достатньо швидкий і гнучкий, що дає змогу широко його застосовувати у проектуванні НПОС, що мають конструкцію тонкої надпровідної пластини.

1. Vendik O.G., Vendik I.B., Kholodniak D.V. Applications of high-temperature superconductors in microwave integrated circuits// Mater. Phys. Mech. – 2000 – № 2(2000). – P. 15–24. 2. Kajikawa K., Funaki K., Hayashi H., Terazono K. and others. Numerical study on fundamental properties of a resistive type fault current limiter with QMG bulk superconductor reinforced by metal bypass// IEEE Transactions on Applied Superconductivity. – 2004. – Vol. 14, No. 2 (2004.6) – P. 847–850. 3. Kajikawa K., Takahashi Y., Enpuku K., Funaki K. and others. Finite Element Analysis of Thermal and Mechanical Behaviour in Model Fault Current Limiter with QMG Bulk Superconductor// 19 International Conference on Magnet Technology Booklet. – Genoa, Italy. – 2005. – No. MOA10P03. – P. 21–24. 4. Zeimetz B., Tanida K. and others. Thermal instability and current-voltage scaling in superconducting fault current limiters// Superconducting Sci. Technol. – 2004. – № 17(2004). – P. 657–662. 5. Федасюк Д.В., Сердюк П.В. Математична модель теплоелектричних процесів резисторного обмежувача струму // Вісник Національного університету “Львівська політехніка”. – 2005 – № 548. – С. 97–106. 6. Fedasyuk D.V., Serdyuk P.V. Mathematical modeling of thermoelectrical processes in resistive superconducting fault current limiter// proceeding of conference TCSET’2006. – March 2006. – Lviv–Slavsko, Ukraine. – P. 77–80.