

МЕТОДИ МОДЕЛЮВАННЯ ОБ'ЄКТІВ ПРОЕКТУВАННЯ

УДК 621.38.049.77

Д.В. Федасюк, П.В. Сердюк
Національний університет “Львівська політехніка”,
кафедра програмного забезпечення

МАТЕМАТИЧНА МОДЕЛЬ ТЕПЛОЕЛЕКТРИЧНИХ ПРОЦЕСІВ РЕЗИСТОРНОГО НАДПРОВІДНОГО ОБМЕЖУВАЧА СТРУМУ

© Федасюк Д.В., Сердюк П.В., 2005

Наведено математичну модель для аналізу теплоелектричних процесів у резистивному надпровідному обмежувачі струму для захисту мікроелектронних пристроїв. Отримано розв'язок нелінійного нестационарного тривимірного рівняння теплопровідності цієї моделі у аналітичному вигляді. Описано практичні результати модельних експериментів.

This paper presents mathematical model for analysis thermal– and electrical process in resistive superconducting fault current limiter for microelectronics devices protection. Analytical solution for 3–dimensional, nonlinear transitional heat diffusion equation of the model was obtained.

Вступ. Постійне зростання потужностей та інтеграції електронних схем висуває нові завдання забезпечення високої надійності приладів, моделювання критичних електрично–теплових режимів у мікроелектронних схемах. Для підтримки стабільної роботи пристроїв та запобігання виходу їх з ладу внаслідок перевантажень необхідний надійний захист від короткого замикання чи інших критичних явищ. Особливо ця проблема є актуальною для дорогого обладнання, яке може частково або повністю вийти з ладу при критичних електричних чи теплових навантаженнях.

Традиційні засоби захисту не завжди надійні, окрім того впливають на роботу пристроїв у нормальному режимі, спричиняючи утворення додаткового тепла. Деякі з них потребують заміни після електричного перевантаження.

Принципово новим вирішенням проблеми захисту мікроелектронних пристроїв від критичних навантажень може стати використання надпровідників. На теперішній час існує три типи надпровідних обмежувачів струму (НПОС): резисторні, індуктивні та гібридні.

Завдяки нелінійній вольтамперній характеристиці надпровідного матеріалу резисторні НПОС задовольняють головні вимоги струмообмежувачів, а саме: запобігають виходу пристрою з ладу внаслідок критичного струму та не впливають на функціонування електричної системи при нормальному режимі роботи.

Переваги НПОС над традиційними засобами захисту [1, 2]:

- НПОС здатні зменшити значення струму короткого замикання у 3–10 разів.
- НПОС не впливають на функціонування електричної системи при нормальному режимі роботи (електричний опір надпровідного матеріалу дорівнює нулю при значеннях струму, менших за критичний).
- У НПОС малий час активації (на відміну від механічних обмежувачів струму, НПОС надзвичайно швидко переходить у резистивний стан). Ця перевага є надзвичайно важливою, оскільки схеми, переважно, виходять із ладу внаслідок ударного імпульсу короткого замикання, що може значно перевищувати стабілізований струм короткого замикання.
- Автоматичний перехід НПОС у нерезистивний стан після зниження струму з критичної до нормальної робочої величини.

– Не містять вибухонебезпечних та небезпечних для здоров'я речовин, на відміну від електрогазових перемикачів, та деяких інших засобів захисту.

– Простота конструкції резисторних НПОС дозволяє модульність та просте розширення архітектури захисних пристроїв на НПОС.

Зате основний недолік надпровідності, що обмежує використання НПОС для захисту мікроелектронних пристроїв, полягає у тому, що для її підтримки необхідно підтримувати кріогенну температуру. Надпровідні метали та сплави мають характерну критичну температуру T_c переходу від нормального до надпровідного стану. Надпровідний стан можливий лише при температурі, нижчій від критичної. Для керамічного надпровідника $YBa_2Cu_3O_7$ критична температура T_c дорівнює приблизно 90К, а для $HgBa_2Ca_2Cu_3O_{8+x}$ критична температура становить 133 К, і на теперішній час є рекордною за величиною [3].

Резисторні НПОС послідовно включаються в лінію, яку необхідно захистити від короткого замикання. Коли через надпровідник протікає струм густиною, меншою за критичну $i < i_c$, електричний опір та теплове виділення відсутнє (рис. 1). Тому НПОС не спричиняє жодного впливу при нормальному режимі роботи.

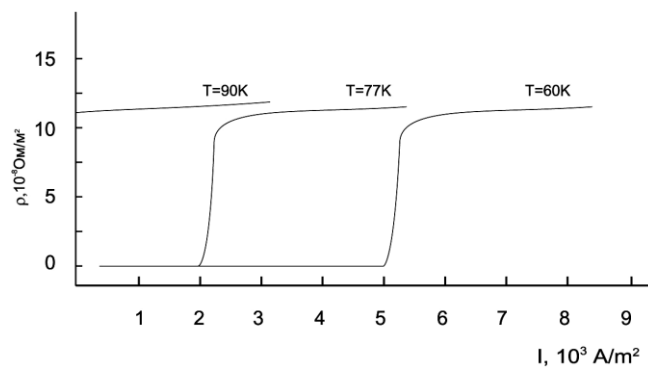


Рис. 1. Залежність питомого опору високотемпературного надпровідника $YBa_2Cu_3O_7$ від густини струму, що протікає через нього при різних температурах матеріалу

Але, коли густина струму сягає певного граничного значення [3], надпровідник переходить у резистивний стан, навіть якщо його температура є нижчою від температури переходу.

Для виготовлення НПОС використовують високотемпературну надпровідну кераміку, яка належить до надпровідників II типу, оскільки для неї критичні значення температури й струму є достатньо високими. Зауважимо, що значення критичної густини струму i_c залежить від температури (рис. 2).

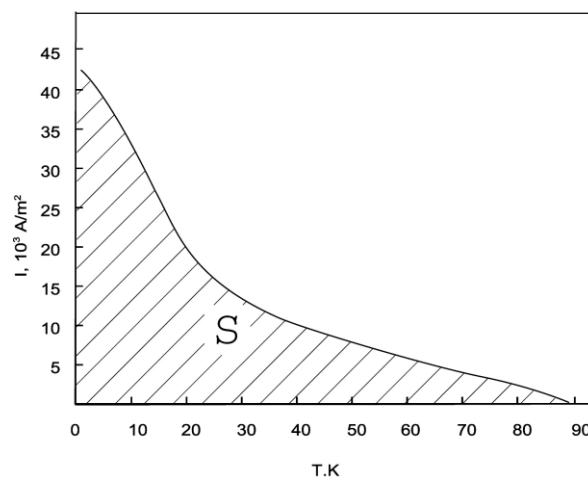


Рис. 2. Залежність значення критичної густини струму від температури для високотемпературного надпровідника $YBa_2Cu_3O_7$ за відсутності зовнішнього магнітного поля. Заштрихованою областю S позначені значення густини струму і температури, при яких $YBa_2Cu_3O_7$ перебуває у надпровідному стані

Для визначення оптимальних параметрів НПОС необхідне моделювання цього пристрою для визначення його необхідних характеристик. Особливу увагу під час проектування потрібно звернути на моделювання теплових і електричних процесів у НПОС, так як вони є визначальними для таких важливих характеристик пристрою, як опір елемента, час відновлення після короткого замикання, витрати рідкого азоту на охолодження пристрою.

При числовому аналізі теплових процесів у надпровідниках виникає проблема збіжності розв'язку фізико-математичної моделі даних процесів, тому що їх описують системою нелінійних диференціальних рівнянь. На теперішній час існує лише декілька підходів до побудови й розв'язування математичної моделі теплових процесів у надпровідниках, однак усі вони орієнтовані на вирішення часткових проблем і немає єдино прийнятого підходу до проблеми теплового моделювання, який би дозволяв легко й зручно моделювати теплові та електричні процеси у надпровідниках.

У праці [4] наведена електрична аналогова модель для резисторних НПОС, що мають конструкцію подвійної неіндуктивної спіралі. У цій моделі враховані особливості конструкції даного НПОС.

У роботах [5, 6] запропонована модель, яка дозволяє аналізувати вплив температури, електричного поля та механічні напруження у критичних режимах резисторного НПОС із використанням QMG-надпровідних матеріалів. Для розв'язування такої задачі використовували метод скінченних елементів.

Моделюванню електрично-магнітних ефектів у надпровідних пластинах при густині струму, більшій за критичну, присвячена робота [7].

Однією з проблем високотемпературної кераміки є температурна нестабільність надпровідного стану внаслідок наявності домішків, зернистості та дефектів. Локальний вихід матеріалу з надпровідного стану поблизу границь зерна, дефектів, мікротріщин, спричиняє виділення теплоти Джоуля, що може спричинити частковий або повний вихід з надпровідного стану навіть при струмі, меншому за критичний. У роботі [8] розглядається модель теплових процесів, що виникають навколо плоского дефекту у надпровіднику. Зокрема у роботі [9] розглядаються теплові процеси у резисторному НПОС за наявності дефекту. У [10, 11] розглядається вплив іншого дефекту – границь зернистості матеріалу. Модель впливу контакту надпровідник-метал проаналізовано [12, 13, 14].

Побудова фізико-математичної моделі теплоелектричних процесів у надпровідному елементі обмежувача струму. Розглянемо резисторний НПОС [15, 16], конструкція якого зображена на рис. 3. Елемент поміщено у рідкий азот для підтримки надпровідного стану. На золоті контакти, що під'єднані до надпровідної пластини, подається струм I . Надпровідна пластинка з матеріалу YBCO знаходиться на сапфіровій підкладці для механічної стабільності елемента.

Змоделюємо теплові процеси, що відбуваються в надпровідній пластині наведеної конструкції. Для моделювання теплових процесів використаємо тривимірну модель пластини.

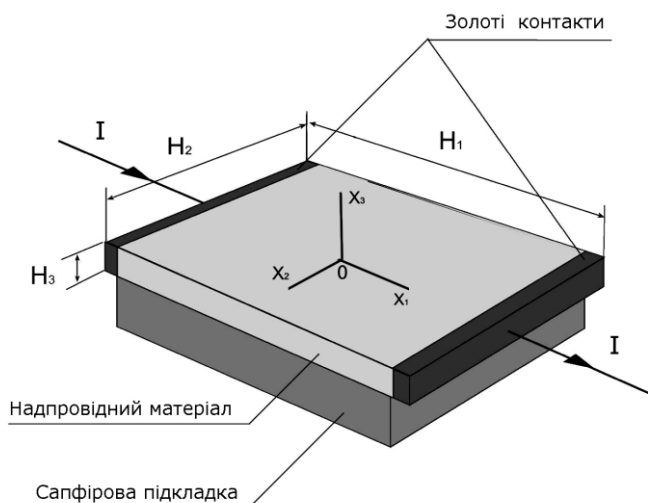


Рис. 3. Схема конструкції резисторного НПОС

У надпровідній пластині відбуватиметься тепловиділення від внутрішнього нагрівання струмом, інтенсивність якого залежить від температури та струму. Розглядатимемо три теплоелектричні режими:

– *нормальний режим*, коли елемент знаходиться в надпровідному стані, а густина струму i_n менша за критичну $i_n < i_c$, тепло в надпровіднику не виділяється;

– *критичний режим*, коли густина струму в елементі значно перевищує критичну $i_k \gg i_c$, у надпровіднику виділяється тепло, надпровідник переходить або знаходиться в резистивному стані. Для критичного режиму роботи вважатимемо струм сталим та рівномірно розподіленим. Припущення мотивоване тим, що в межах короткого електричного перевантаження не відбувається суттєвого перерозподілу опору;

– *режим відновлення*, при якому спрацьовують допоміжні засоби захисту й струм у НПОС відсутній, надпровідник охолоджується рідким азотом і поступово повертається в надпровідний стан.

Прийняті припущення й аналіз елемента щодо граничних умов :

1. Введемо систему координат з осями паралельними граням надпровідного елемента і з початком координат у центрі площини надпровідної плівки, що стикається з підкладкою (рис. 3) . Температурне поле симетричне щодо площин $x_1 = 0, x_2 = 0$. У зв'язку з цим розглядатимемо одну четверту конструкції надпровідного елемента, для якої $x_1 \geq 0, x_2 \geq 0$. На площинах $x_1 = 0, x_2 = 0$ приймемо, що тепловий потік дорівнює нулю.

2. Вважатимемо, що сапфірова підкладка не має значення в електро- і теплопереносі. Тому на границі надпровідного матеріалу й підкладки введемо умову рівності нулю теплового потоку.

3. Тепло, що виділятиметься на одиниці поверхні контакту, дорівнює $i^2 \rho_c H_2 H_3$, де ρ_c – питомий електричний опір поверхні контакту. Потік тепла від контакту в рідкий азот дорівнює $\beta_c (T - T_0) H_2 H_3$, а потік від контакту в надпровідник $\lambda_c \frac{\partial T}{\partial x_1} H_2 H_3$, де β_c – коефіцієнт охолодження контакту рідким азотом, λ_c – тепловий опір контакту, T_0 – температура рідкого азоту. Знехтуємо нагріванням контакту, тоді з умови теплової рівноваги впливає рівність тепла, що виділяється у контакт, і суми теплових потоків від контакту в надпровідник та рідкий азот

$$i^2 \rho_c = \beta_c (T - T_0) + \lambda_c \frac{\partial T}{\partial x_1}. \quad (1)$$

Теплові процеси в надпровіднику описуються нелінійним рівнянням другого порядку

$$c(T) \rho \frac{\partial T}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x_1} \left(\lambda(T) \frac{\partial T}{\partial x_1} \right) + \frac{\partial}{\partial x_2} \left(\lambda(T) \frac{\partial T}{\partial x_2} \right) + \frac{\partial}{\partial x_3} \left(\lambda(T) \frac{\partial T}{\partial x_3} \right) + f(i, T), \quad (2)$$

де $f(i, T)$ – функція внутрішнього джерела, $c(T)$ і $\lambda(T)$ – відповідно коефіцієнти теплоємності та теплопровідності надпровідного матеріалу, ρ – густина матеріалу.

Враховуючи припущення щодо електричних режимів, ми можемо з достатньою точністю виразити тепло, що виділяється в надпровідному елементі, такою функцією:

$$f(i, T) \approx \begin{cases} 0, & \text{при } i < i_c(T) \text{ і } T < T_c; \\ \rho_n (1 + \alpha_\rho (T - T_c)) i^2, & \text{при } i > i_c(T) \text{ або } T > T_c. \end{cases} \quad (3)$$

де T_c – критична температура надпровідника, $i_c(T)$ – критична густина струму надпровідника для даної температури, ρ_n – питомий електричний опір надпровідного матеріалу при критичній температурі, α_ρ – коефіцієнт, що характеризує зростання питомого електричного опору при збільшенні температури.

Теплофізичні параметри апроксимуємо розривними функціями

$$c \approx \begin{cases} c_s, & \text{при } T < T_c; \\ c_n, & \text{при } T > T_c. \end{cases} \quad \lambda \approx \begin{cases} \lambda_s, & \text{при } T < T_c; \\ \lambda_n, & \text{при } T > T_c. \end{cases} \quad (4)$$

Cryogenics. – Seoul, Korea. – 2002. – p.15. 11. D. Agassi, D. K. Christen and S. J. Pennycook. Flux pinning and critical currents at low-angle grain boundaries in high-temperature superconductors// *Applied physics letters*.–October 2002. – vol. 81, number 15, p. 71. 12. J. Rymaszewski, R. Pawlak. Structural and electrical properties of metal–superconductor diffusion contact // *MIXDES*. – Wroclaw, Poland. – June 2002. – p. 283–286. 13. J. Rymaszewski. Numerical simulation of thermal phenomena in metal–superconductor junction // *MIXDES*. – Lodz, Poland. – June 2003. – p. 346–351. 14. J. Leszcynski, J. Rymaszewski, E. Korzeniewska. Thermal phenom in diffusion contact region of Au/bulk superconductor YBaCuO // *MIXDES*. – Zakopane, Poland. – June 2001. – p. 283–286. 15. H. R. Semerad, H. Kinder, J. Grundmann, H. Mosebach, and others. Current limiting properties of YBCO films on sapphire substrates // *EUCA 99*. – Barcelona, Spain. – 14. – 17.09 1999. p. 30–32. 16. S. Sugita, H. Ohsaki. FEM Analysis of Current Limiting Characteristics of Superconducting Thin Film Current Limiting Device by the Current Vector potential Method // *Applied Superconductivity, IEEE Transactions*. – June 2003. – Vol. 13, Issue: 2. – p. 2020 – 2023. 17. Kim, S.B., Ishiyama, A., Okada, H., and Nomura, S. Normal zone propagation properties in Bi–2223/Ag superconducting multifilament tapes // *Cryogenics*. – 1998. – 38 n. 8, – p. 823.

УДК 004.415.2 : 681.533

П.Ю. Денисюк, В.М. Теслюк, М.Є. Перейма
Національний університет “Львівська політехніка”,
кафедра систем автоматизованого проектування

МАТЕМАТИЧНА МОДЕЛЬ БАЗОВОЇ КОНСТРУКЦІЇ ГІДРАВЛІЧНОЇ МІКРОПОМПИ З П'ЄЗОЕЛЕКТРИЧНИМ ПРИВОДОМ ДЛЯ КОМПОНЕНТНОГО РІВНЯ ПРОЕКТУВАННЯ

© Денисюк П. Ю., Теслюк В. М., Перейма М. Є., 2005

Запропоновано математичну модель базової конструкції гідравлічної мікропомпи з п'єзоелектричним приводом для проектування на компонентному рівні. Використано метод скінченних різниць для розв'язання задачі для визначення переміщень та напружень. Наведені результати залежностей вихідних характеристик від прикладеної електричної напруги.

In this paper mathematical model of basic constructions of hydraulic micropump with piezoelectric actuator for design on a component level. The method of eventual differences is used for the solve of task for determination of displacements and tensions. Resulted results of dependences of initial characteristics from the enclosed the voltage.

Вступ. Третє тисячоліття пов'язане з бурхливим розвитком мікроелектромеханічних технологій. До цих пристроїв належать мікроелектромеханічні системи [1, 2].

Використання нових підходів під час проектування мікрогідравлічних пристроїв дає поштовх та прискорює розвиток гідравлічних МЕМС, як окремої науки. Завдяки використанню нових підходів у керуванні роботою мікропристроїв, які базуються на електромагнітній, термодинамічній, п'єзоелектричній та електростатичній природі, було створено низку пристроїв, які отримали назву гідравлічні мікроелектромеханічні системи (ГМЕМС).

До п'єзоелектричних пристроїв належать і мікропомпи з п'єзоелектричним приводом, які використовуються при побудові мікрогідравлічних систем та в промисловості (фармацевтичній, хімічній, військовій тощо).

Складність виготовлення та проектування таких пристроїв визначається їхніми малими розмірами. По-друге, складові елементи ГМЕМС виконують значні механічні переміщення в часі. По-третє фізичний принцип роботи цих пристроїв базується на стику таких наукових галузей: мікромеханіки, електрики, мікрогідравліки, мікроелектроніки, біології тощо [3]. Це все накладає вимоги щодо конструктивного виконання та врахування параметрів зовнішнього середовища.