

Є.В. Левус, О.Є. Білас
Національний університет "Львівська політехніка",
кафедра програмного забезпечення автоматизованих систем

ВІЗУАЛІЗАЦІЯ РЕЗУЛЬТАТІВ ТЕПЛООВОГО ПРОЕКТУВАННЯ МІКРОЕЛЕКТРОННИХ ПРИСТРОЇВ САМООРГАНІЗАЦІЙНИМИ КАРТАМИ

© Левус Є.В., Білас О.Є., 2008

Нейронні мережі довели свою цінність як генератори гіпотез у циклі проектування різноманітних об'єктів. У статті пропонується підхід використання самоорганізаційних карт Кохонена у задачах теплового проектування мікроелектронних пристроїв для визначення напрямку пошуку теплофізичних і конструктивних параметрів, на основі яких формуються типові рішення для забезпечення заданого температурного режиму функціонування мікроелектронних пристроїв.

Neural networks have proved their value as hypothesis generators in the cycle of different objects designing. In this article the approach of using self-organizing Kohonen map in the problems of thermal designing of microelectronic devices for determination of the search direction of thermo-physical and design parameters, and for elaboration on their bases of standard solutions for providing normal temperature condition of microelectronic device functioning, has been suggested.

Вступ

Головною метою теплового проектування мікроелектронних пристроїв (МЕП) є вироблення рішення стосовно теплофізичних та конструкційних параметрів, за яких забезпечується необхідний температурний режим функціонування пристрою. У час розвитку наноелектроніки проблеми, пов'язані з виникненням небажаних теплових ефектів в МЕП, значно загострюються і вимагають ефективного вирішення. Характерним для сучасного стану проблеми є постійне випередження розвитку досягнень мікроелектроніки над можливостями наявних методів і засобів теплового проектування МЕП [1].

Задача забезпечення необхідного температурного режиму зводиться до знаходження у величезному "просторі параметрів", що містить приблизно сотні тисяч різноманітних елементів, таких значень, за яких отримані значення температури не будуть перевищувати допустимі. Класичний підхід до розв'язування таких задач полягає в тому, щоб аналізувати температурний режим при різних варіантах параметрів і вибирати необхідний. Цей підхід часто згадується як "висококількісний перебір" і передбачає деякий випадковий пошук у параметричному просторі [2]. Випадковість пошуку рекомендується дещо знижувати на основі задання напряму пошуку, що передбачає втручання досвідченого проектувальника в роботу алгоритму пошуку [2, 3].

Нейронні мережі можуть бути використані для перетворення сліпого пошуку параметрів на інформативний пошук. Нейронні мережі довели свою цінність як генератори гіпотез у циклі проектування різноманітних об'єктів. Вони допомагають автоматизувати виділення ознак і в такий спосіб уможливають аналіз великої кількості даних [3, 4].

Постановка задачі

Досліджуваний об'єкт – конструкція МЕП з кристалами на жорстких виводах ("Flip-Chip"-технологія). МЕП цього класу мають багато конструктивних, технологічних та експлуатаційних переваг, що зумовило надзвичайне поширення структур з кристалами на жорстких виводах, в сучасній мікроелектроніці та їхнє застосування в різноманітних приладах. Моделювання та дослідження температурних полів МЕП з кристалами на жорстких виводах становить особливий інтерес з погляду теорії та практики проектування, оскільки такі конструкції передбачають використання набору різноманітних засобів для організації тепловідведення з метою забезпечення нормального температурного режиму функціонування.

Аналіз особливостей структури та процесів тепловідведення у конструкціях МЕП з кристалом на жорстких виводах викликає необхідність створення універсальної моделі, яка б мала можливість враховувати різні варіанти тепловідведення в конструкціях МЕП з кристалами на жорстких виводах, проте бажано, щоб це врахування не ускладнювало значно сам алгоритм теплового проектування.

Наявність різних конструктивних засобів із забезпечення температурних режимів МЕП з кристалами на жорстких виводах дає змогу поділити їх на групи (рис. 1).

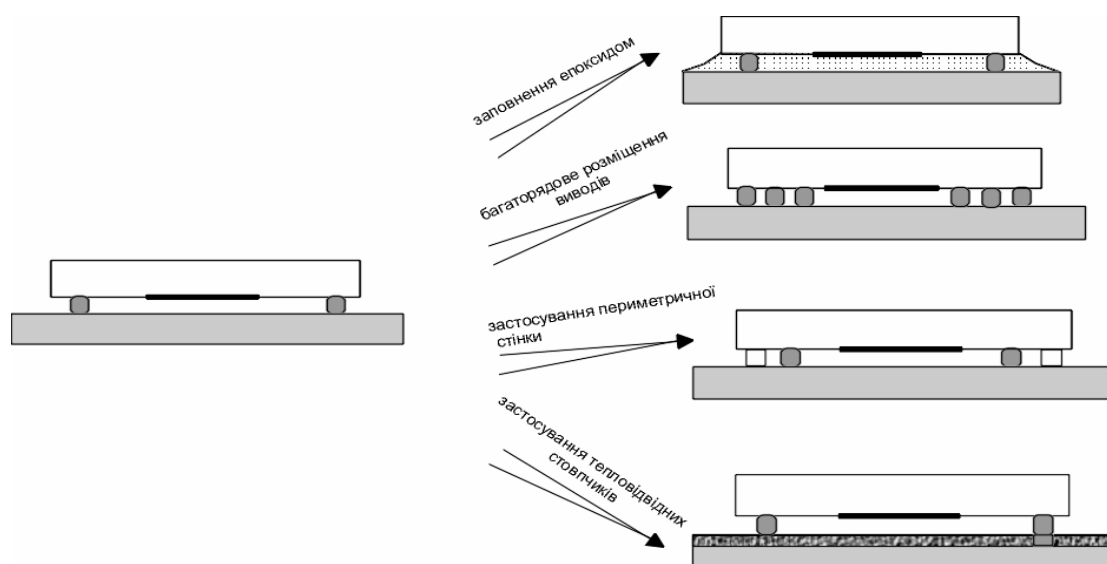


Рис.1. Конструкції МЕП з кристалом, встановленим на жорсткі виводи з різними способами тепловідведення

У таких конструкціях основними складовими є кристал з джерелами тепла, підшарок та жорсткі виводи (рис.2). Кристал за допомогою жорстких виводів кріпиться до підшарку. Кристал і підшарок в загальному випадку є багатошаровими структурами. Конкретна конструкція МЕП визначає геометричну форму жорстких виводів, матеріал, з якого їх виготовляють, а також їхній тип, який визначається залежно від глибини контакту з багатошаровим підшарком. Розрізняємо виводи двох типів: сигнальні (перший тип) та конструктивні (другий тип) [1]. Виводи першого типу під'єднуються до комутаційних площадок на підшарку; виводи другого типу встановлюються переважно на нікелеві стовпчики, які розташовані у верхньому шарі підшарку. Саме завдяки виводам другого типу забезпечується добре тепловідведення в підшарок. Виводи мають доволі малий поперечний переріз, що ускладнює тепловідведення з кристала у підшарок.

Опис базової теплової моделі являє собою певну комбінацію конкретних значень параметрів моделі, які специфікують конструктивні, фізичні, електричні та інші характеристики. Варіанти

теплової моделі можуть відрізнятися не лише кількісними показниками (наприклад, питомою теплопровідністю підшарку), але й конструктивними параметрами (наприклад, кількістю та типом виводів у структурі).

Список параметрів вибору задають область пошуку стосовно вироблення рекомендації для зменшення теплового опору конструкції. Саме згідно з цими параметрами формуються різні варіанти теплової моделі конструкції.

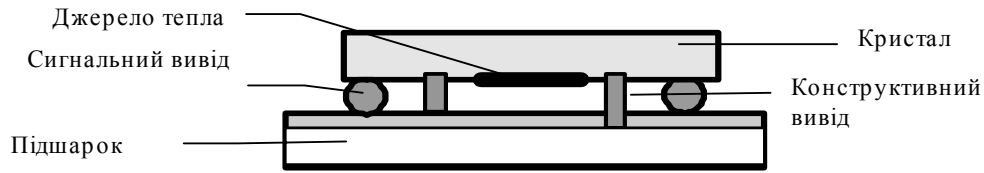


Рис. 2. Схематичне зображення базової конструкції МЕР

Розміри та матеріал підшарку, кількість виводів, їхні розміри, тип та матеріал, способи тепловідведення з поверхонь кристала та підшарку – це теплофізичні та конструкційні параметри, вибір певних значення яких проектувальником дає можливість забезпечити необхідний температурний режим [2, 3].

Для цього об'єкта розроблено числово-аналітичний метод температурного аналізу [5]. Цей метод зарекомендував себе як швидкий та точний порівняно з аналогічними, що дає можливість отримати велику кількість результатів обчислювальних експериментів за короткий час. Об'єднане розв'язання системи диференціальних рівнянь теплопровідності, що задовольняє граничні умови, знаходимо у вигляді тригонометричних рядів Фур'є відповідно для кожної з підобластей в області кристала та підшарку [5]. Ці розв'язки дають змогу обчислювати температурне поле в довільній точці конструкції залежно від дії джерел тепла, їхнього розміщення та конструктивно-топологічних характеристик жорстких виводів, на які встановлений кристал, а також теплофізичних параметрів кристала та підшарку (1).

$$T_1^{(j)}(x_1, y_1, z_1) = H_{00}^{(j)}(z_1 - z_1^{(j-1)}) + G_{00}^{(j)} + \sum_{n=1}^{\infty} (H_{n0}^{(j)} e^{\gamma_{n0}(z_1 - z_1^{(j-1)})} + G_{n0}^{(j)} e^{-\gamma_{n0}(z_1 - z_1^{(j-1)})}) \cos \frac{n\pi x_1}{K_1} + \sum_{m=1}^{\infty} (H_{0m}^{(j)} e^{\gamma_{0m}(z_1 - z_1^{(j-1)})} + G_{0m}^{(j)} e^{-\gamma_{0m}(z_1 - z_1^{(j-1)})}) \cos \frac{m\pi y_1}{K_2} + \sum_{n=1}^{\infty} \sum_{m=1}^{\infty} (H_{nm}^{(j)} e^{\gamma_{nm}(z_1 - z_1^{(j-1)})} + G_{nm}^{(j)} e^{-\gamma_{nm}(z_1 - z_1^{(j-1)})}) \cos \frac{n\pi x_1}{K_1} \cos \frac{m\pi y_1}{K_2} \quad (1)$$

$H_{00}^{(j)}$, $G_{00}^{(j)}$, $H_{n0}^{(j)}$, $G_{n0}^{(j)}$, $H_{0m}^{(j)}$, $G_{0m}^{(j)}$, $H_{nm}^{(j)}$, $G_{nm}^{(j)}$ ($j = \overline{1, N}$) – невідомі коефіцієнти, які визначаються з граничних умов задачі теплопровідності.

Кластеризація варіантів базових конструкцій МЕР

Під час оброблення даних, що не підлягають класифікації, з метою виділення структур, класів, образів, множин подібних об'єктів використовуються методи кластеризації. Мета подібних задач полягає в розділенні векторів вхідних сигналів на кластери-підгрупи, зокрема відображенням сформованих кластерів на площині або в тривимірному просторі.

Часто основою розв'язання таких задач є нейропарадигма, відома під назвою самоорганізаційних карт. Однією із найбільш популярних та ефективних архітектур, що працюють за таким принципом, є карта Кохонена. Така нейромережа після навчання дає змогу отримати на виході карту в топографічному вигляді, на якій точки-вектори автоматично групуються в кластери [6].

Таку карту використано як ефективний інструмент для подання числових результатів моделювання температурних полів базової конструкції МЕР з кристалом на жорстких виводах. Масив результатів моделювання для різних варіантів базової конструкції розміру $n \times m$, де $n-1$ – кількість параметрів, вплив яких є істотним на формування значень температури, m – кількість варіантів базової конструкції. Елементи масиву є вхідними даними для розв'язання задачі забезпечення необхідного температурного режиму функціонування МЕР.

Для візуалізації та аналізу теплової моделі МЕР за 8 параметрами побудовано самоорганізаційну карту розміром 8×8 . Задавалися параметри теплової моделі конструкції типу "Flip Chip", які визначають тепловідвід з верхньої та нижньої граней кристала та підшарку (рис. 2). Зазначені параметри (табл. 1) використовуються у раніше розробленій моделі [7] для обчислень невідомих коефіцієнтів (1).

Таблиця 1

Параметри, які беруть участь у формування самоорганізаційної карти

№	Вхідний параметр	Позначення в тепловій моделі	Пояснення
1	параметр 1	α_{T1}	значення коефіцієнта теплообміну верхньої грані кристала з середовищем
2	параметр 2	$T_{сер1}$	температура середовища в області верхньої грані
3	параметр 3	β_{T2}	значення коефіцієнта теплообміну нижньої грані підшарку з середовищем
4	параметр 4	α_{T2}	значення коефіцієнта теплообміну верхньої грані підшарку з середовищем
5	параметр 5	$T_{сер2}$	температура середовища в області підшарку
6	параметр 6	$kp1+kp2$	кількість жорстких виводів
7	параметр 7	$kp1$	кількість виводів першого роду
8	параметр 8	$T_1^{(1)} (x_{дж}, u_{дж}, h_k)$	максимальна температура конструкції

Параметр 8, яким є максимальна температура конструкції, аналітично обчислено (1) для більше ніж 50 експериментів.

Дані попередньо нормалізовано за середнім значенням. Результати кластерного аналізу (табл. 2) подано самоорганізаційною картою.

Таблиця 2

Значення температури по кластерах

Значення температури, °C	Номер експерименту	Номер кластера	Номер кластера
303.70	Row_1	H	8
324.40	Row_13	H	8
290.20	Row_14	H	7
310.40	Row_16	H	8
287.50	Row_24	G	8
106.20	Row_35	B	6
105.40	Row_36	B	6
104.70	Row_37	B	6
102.40	Row_39	A	6
261.80	Row_40	H	1
101.80	Row_41	A	6
261.30	Row_42	H	1
260.70	Row_43	H	1
79.20	Row_46	A	8
81.00	Row_47	A	8
82.10	Row_48	A	8

Самоорганізаційна карта (рис. 3) візуалізує велику кількість результатів обчислювальних експериментів (більше ніж 400). Серед цих даних важливо вибрати лише ті, які є перспективними з погляду знаходження областей пошуку параметрів, і використати для початкового проектного рішення стосовно забезпечення заданого температурного режиму.

Розмір квадрата-кластера залежить від кількості експериментів, які потрапили у кластер. Білий колір кластера Н8 відображає експеримент із найвищим значенням максимальної температури конструкції. Чорний колір відображає низьке значення останнього параметра. Зміна градацій сірого позначає зміну цього параметра, шкалу значень параметра наведено на рис. 3.

Як показано на рис. 3, кластер Н8 містить 3 експерименти, із значеннями максимальної температури конструкції більше ніж 300 градусів, від 303,7 градусів для експерименту № 1 до 324,4 градуса для експерименту № 13. Це є кластер з “неперспективними” даними з погляду забезпечення необхідного температурного режиму.

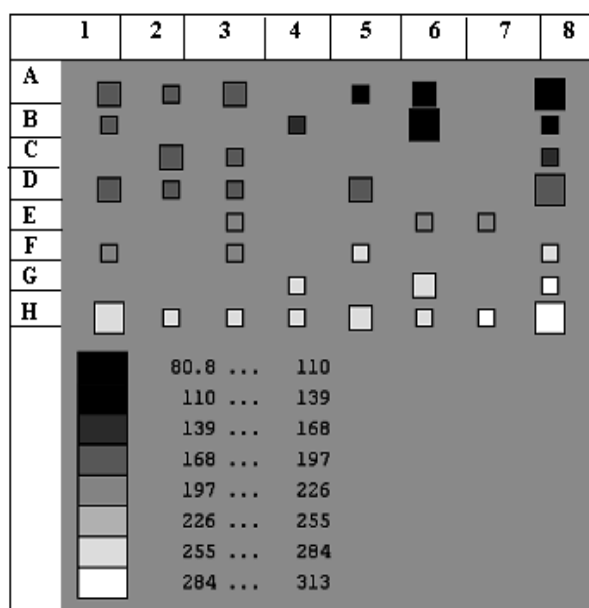


Рис. 3. Самоорганізаційна карта результатів обчислювальних експериментів з кластеризацією згідно із значеннями температури

Експериментами із високими значеннями максимальної температури конструкції є також № 14 і № 24, які, проте, віднесені до різних кластерів – Н7 і G8 відповідно. Це викликано, значною мірою, різницею параметрів 2 і 5, а також 7 і 8. Останнє твердження збігається з припущенням, закладеним у тепловій моделі, про лінійність у певних межах температур.

Експерименти із кластера Н1 мають теж достатньо високі значення максимальної температури конструкції, проте в них значення параметрів 6 і, особливо, 8 є значно більшими. Це вказує на перспективність пошуку у напрямку збільшення загальної кількості жорстких виводів.

Значення максимальної температури конструкції є практично ідентичними в експериментах, що потрапили в кластери А6 і В6, проте значення параметра 7 у експериментах кластера В6 від 3 до 8 разів перевищує його значення для експериментів кластера А6, а значення параметра 8 в експериментах кластера А6 від 1.5 до 2 разів перевищують ці самі значення для експериментів кластера В6.

У кластері А8 згруповано експерименти із ще нижчими значеннями максимальної температури конструкції, але значення параметрів 1,2 і 7 є значно більшими. У кластера В8 лише значення 7 параметра є меншим, ніж у експериментів кластера А8. Це вказує на ефективність засобів тепловідведення з верхньої грані кристала.

Експерименти із кластера G8 мають в два рази нижчі значення параметра δ , ніж експерименти кластера A8, і, разом з тим, вони більші, ніж в експериментах кластера H8. Тобто таке проміжне значення цього параметра знайшло відображення і на карті, де цей кластер між кластерами A8 і H8. Хоча значення параметра δ відрізняється для кластерів H8, G8 і A8, він впливу на розподіл експериментів не має. Це вказує, що за особливих умов теплообміну кількість жорстких виводів не є впливовою на пониження теплового опору.

Для цієї самої базової моделі здійснено кластеризацію та аналіз за відсотковим значенням кількості виводів першого типу у загальній кількості виводів (табл. 3).

Результати кластерного аналізу подано самоорганізаційною картою (рис. 4). Шкала з градацією сірого відображає частку виводів першого типу у загальній кількості жорстких виводів: $kp1+kp2$.

Таблиця 3

Значення відсоткового вмісту виводів першого типу по кластерах

Відсоток виводів першого типу	Номер кластера	Номер кластера
100	H	8
100	E	3
100	H	8
100	H	8
100	F	3
100	A	3
25	A	5
13	A	5
6	A	5
19	B	8
100	F	8
0	E	7
42	E	7

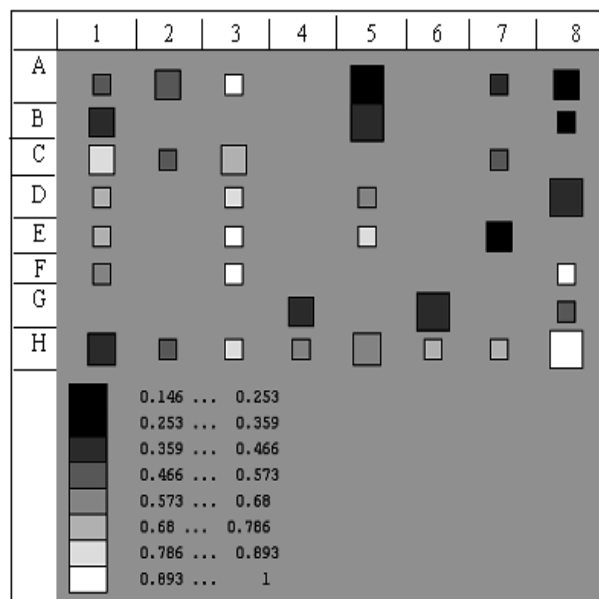


Рис. 4. Самоорганізаційна карта результатів обчислювальних експериментів з кластеризацією згідно з часткою виводів першого типу

Експерименти із таким високим відсотковим значенням сформували кластери Н8, Е3, F3, А3, F8. Проте в кластер Н8 потрапили значення трьох експериментів № 1, 13 і 16, тоді як інші кластери сформували по одному експерименту кластерами із малим відсотком виводів першого роду у загальній кількості виводів є А5, В8 та Е7. У кластер Е7 потрапили експерименти № 50 та 52, у першому з яких відсоток виводів першого роду дорівнює 0, а в другому 42, проте всі інші параметри практично однакові. У кластері А5 експерименти 38, 39 та 41 мають також всі параметри практично рівні, але частка виводів першого роду зменшувалась від 0,25 до 0,13 та 0,06 відповідно.

Останнє твердження є підставою для типового рішення, що збільшення виводів другого типу від діапазоні від 75 % загальної кількості не є істотним для пониження теплового опору конструкції.

Отримані результати вказують на перспективність застосування нейронних мереж у складних задачах теплового проектування МЕР.

Висновки

Розв'язування задачі забезпечення заданого температурного режиму в конструкціях МЕР полягає у виробленні рішення стосовно теплофізичних та конструктивних параметрів, за яких забезпечується необхідний температурний режим функціонування пристрою, є нетривіальною проблемою, для якої не існує точного методу для знаходження розв'язку.

Пропонується при розв'язуванні таких нетипових задач теплового проектування МЕР використовувати нейронні мережі для перетворення сліпого пошуку параметрів на інформативний. Нейронні мережі довели свою цінність як генератори гіпотез в циклі проектування різноманітних об'єктів. Вони допомагають автоматизувати виділення ознак і в такий спосіб уможливають ефективний аналіз великої кількості даних.

За результатами теплового моделювання МЕР з кристалами на жорстких виводах побудовано самоорганізаційні карти, які завдяки своїм властивостям серед великої кількості обчислювальних експериментів, групуючи за певною ознакою, вказують на області пошуку параметрів. Це є ефективним для вироблення початкових типових рішень з метою пониження теплового опору конструкції.

1. Fedasyuk D., Levus Ye., Yaroshchuk N., Petrov D. *The mechanism of the relational database architecture for the microelectronic components thermal design in the Internet // Proceedings of International Conference MIXDES`2005. – 2005. – Krakow, Poland. P.261–266.* 2. Чорна Н.Я., Левус Є.В., Федасюк Д.В. *Забезпечення заданого теплового режиму в мікроелектронних пристроях з використанням нейромережових технологій / “Комп’ютерні системи проектування” Вісник Нац. унів. “Львівська політехніка”. – 2005. – №.548. – С.38–43.* 3. Bilas O., Levus Ye., Yakovyna V. *Self-organising map as a tool of modelling the design parameters of microelectronics devices for ensuring the specified temperature condition / Proceedings of the International Conference on Computer Science and Information Technologies. – Lviv, Ukraine. – 2006. – P. 74–76.* 4. Hopfield J.J., Tank D.W. *Neural computation of decision in optimization problems // Biol. Cybernet., 1985. V. 52. P. 141–152.* 5. Levus Ye., Fedasyuk D. *Mathematical Model of the Thermal Gradients in the Flip-Chip Structure // Proceedings of the VIIIth International Conference CADSM`2005. – 2005. – Lviv-Polyana. – P.289–292.* 6. Levus Ye., Bilas O. *Self-organizing neural networks as instrumental tools for thermal design of microelectronic devices // Second Intern. Conf. “Computer Science and Information Technologies (CSIT`2007)”: Proc. – Lviv, 2007. – P.104–105.* 7. Федасюк Д.В., Левус Е.В., Петров Д.В. *Конструктивные методы обеспечения тепловых режимов в кристаллах ИС, установленных на жесткие выводы // Информационные технологии в проектировании и производстве. – 2002. – №2. – С.51–57.*