

хвилях і з успіхом може застосовуватись при розробці інших пристроїв функціональної мікроелектроніки.

1. Л.М.Смеркло. Удосконалення методів комплексної автоматизації розробки конструкторської документації мікроелектронної апаратури.//Вісник ДУ "Львівська політехніка". – 1998. – №327. – С. 93 – 99. 2. AutoCAD версія 10. Руководство пользователя.

УДК 621.3.049.52

Д. Федасюк, Д. Петров

Національний університет "Львівська політехніка", кафедра САПР

АЛГОРИТМ АВТОМАТИЧНОГО СИНТЕЗУ ТЕПЛОЕЛЕКТРИЧНИХ СІТОК ДЛЯ ТЕПЛООВОГО МОДЕЛЮВАННЯ МЕП РІЗНОГО КОНСТРУКТИВНО-ТЕХНОЛОГІЧНОГО ВИКОНАННЯ

© Федасюк Д., Петров Д., 2002

Наводиться розроблений авторами алгоритм автоматичного синтезу оптимальних теплоелектричних сіток для теплового моделювання МЕП різного конструктивно-технологічного виконання. Проводиться порівняльний аналіз ефективності запропонованого алгоритму та підходу на основі ручної побудови сіткових моделей на прикладі теплового моделювання тестової структури ГІС.

Author's algorithm of automated synthesis of the optimal thermal electrical grids for thermal modeling of different constructional and technological design of MED is given. Comparing analysis of effectiveness of this algorithm and approach based on manual building of grid model on the example of GIC test structure thermal modeling is conducted.

I. Вступ

Одним з методів розв'язання задач теплового моделювання мікроелектронних пристроїв (МЕП) є добре відомий метод теплоелектричної аналогії, який базується на аналогії між тепловими та електричними явищами [1]. Внаслідок цілої низки переваг метод теплоелектричної аналогії широко використовується в системах теплового моделювання [2, 3].

Застосування методу теплоелектричної аналогії починається з покриття досліджуваної конструкції МЕП просторовою сіткою, внаслідок чого конструкція стає розбитою на елементарні комірки. Кожній комірці відповідає заступна теплоелектрична схема. Ці схеми об'єднуються в загальну теплоелектричну схему конструкції, яка є об'єктом подальшого моделювання з використанням методів схематичного аналізу. Схематично процес формування теплоелектричної сітки для деякої структури МЕП наведено на рис. 1.

Формування оптимальних теплоелектричних сіток є досить складним завданням і, по суті, являє собою пошук компромісу між точністю сіткової моделі та її розмірністю. Перший параметр визначає точність результатів теплового моделювання, а другий впливає на необхідні для моделювання обчислювальні ресурси. Невдало побудована теплоелектрична сітка може призвести до суттєвих похибок в результатах або потребувати невиправдано завищених обчислювальних ресурсів.

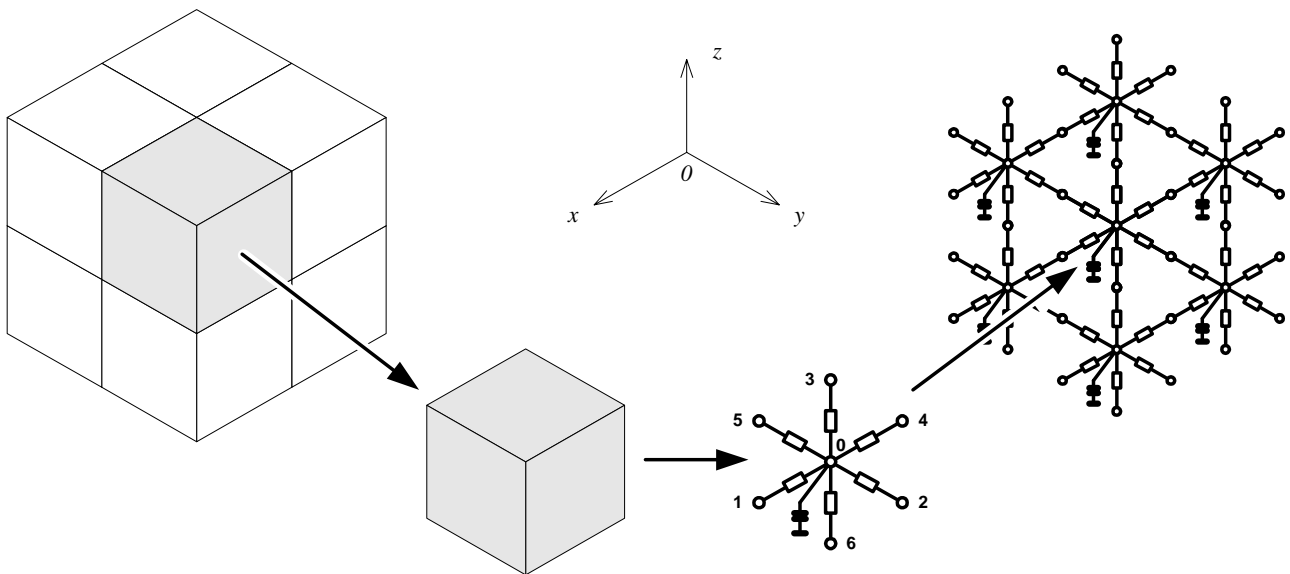


Рис. 1. Формування теплоелектричної сітки

Авторами розроблений новий підхід до побудови сіткових моделей, який забезпечує синтез оптимальних теплоелектричних сіток. На відміну від існуючих рішень [3, 4] запропонований алгоритм виконує синтез теплоелектричних сіток в автоматичному режимі і може бути застосований до моделювання МЕР різного конструктивно-технологічного виконання.

II. Алгоритм синтезу теплоелектричних сіток

В основі запропонованого алгоритму лежить багатокрокова корекція теплоелектричної сітки на основі аналізу температурного градієнта [5]. Корекція теплоелектричної сітки здійснюється для зменшення кроку сітки в областях з великим температурним градієнтом. Збільшення кроку сітки в областях з малим температурним градієнтом алгоритмом не передбачається, оскільки початкова сітка формується, виходячи з геометрії об'єкта моделювання і крок сітки не може бути збільшений без спотворення геометричних параметрів об'єкта.

На рис. 2 показано запропонований алгоритм синтезу теплоелектричних сіток. Наведений алгоритм має загальний характер, обумовлений абстрагуванням від конкретних задач теплового моделювання і зосередженням уваги на основних аспектах оптимізації сіткових моделей. Практична реалізація запропонованого алгоритму потребує його адаптації під конкретні задачі моделювання.

Розроблений алгоритм орієнтований на роботу з прямокутними сітковими моделями, які є найбільш поширеними та універсальними. При застосуванні алгоритму всі непрямокутні елементи МЕР мають бути апроксимовані прямокутними елементами.

Наведений на рис.2 алгоритм синтезу теплоелектричних сіток складається з чотирьох основних етапів: початкової дискретизації простору, утворення теплоелектричної схеми, розрахунку теплоелектричної схеми та корекції теплоелектричної сітки.

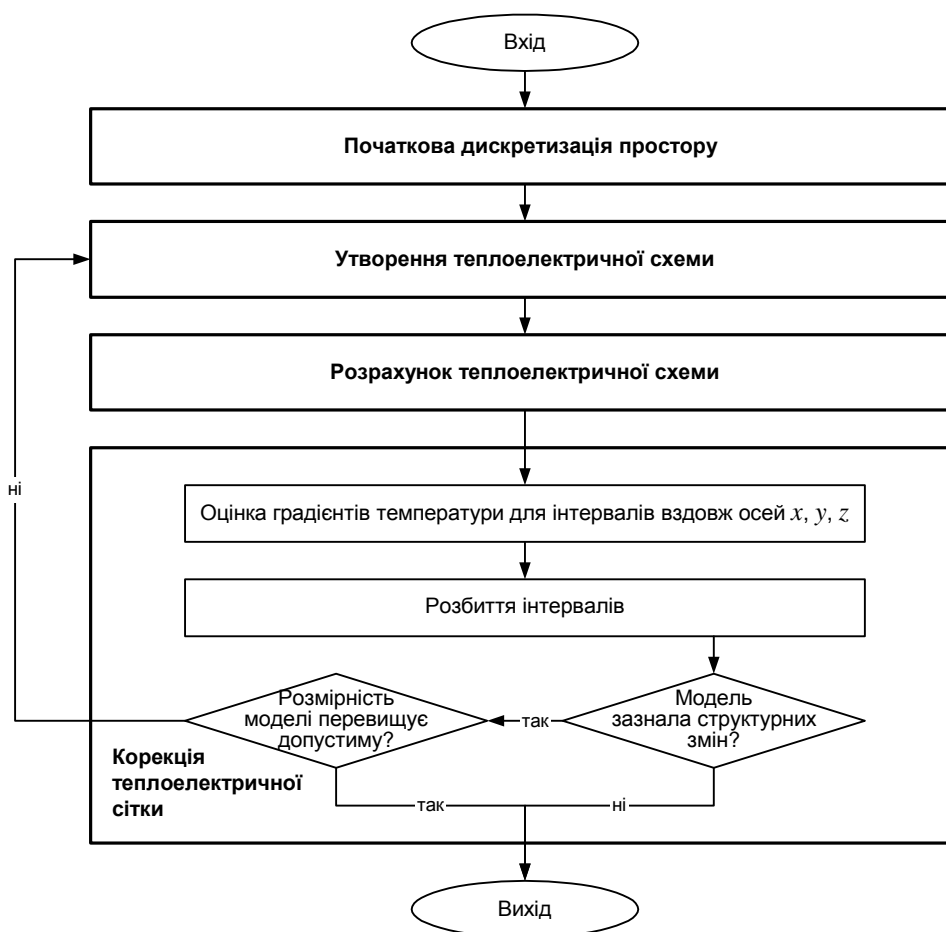


Рис. 2. Загальний алгоритм синтезу теплоелектричних сіток

1. Початкова дискретизація простору

На етапі початкової дискретизації простору формується наближена сіткова схема на підставі геометричних характеристик конструкції МЕП. Така початкова сіткова схема виступатиме структурним каркасом для початкової теплоелектричної сітки і об'єктом оптимізації в ході наступних ітерацій.

Початкова дискретизація простору відбувається шляхом аналізу геометрії об'єкта дослідження, в ході якого формуються початкові просторові інтервали (кроки сітки) по координатних осях x , y та z . В процесі аналізу геометрії об'єкта враховуються не лише фізичні структури, але й теплові джерела та стоки теплоти.

Результатом початкової дискретизації простору є обмежена прямокутна область, розбита на елементарні комірки за допомогою інтервалів, віднесених до координатних осей x , y та z . В загальному випадку інтервали є нерівномірними як для різних координатних осей, так і в межах однієї координатної осі.

Кількість інтервалів по координатних осях x , y та z визначає розмірність майбутньої сіткової моделі n , яка дорівнює кількості елементарних комірок в сітковій моделі:

$$n = n_x \cdot n_y \cdot n_z, \quad (1)$$

де n_x , n_y , n_z – кількості інтервалів по осях x , y та z відповідно.

2. Утворення теплоелектричної схеми

Етап утворення теплоелектричної схеми передбачає побудову загальної теплоелектричної схеми для дискретизованої просторової області, що складається з множини елементарних комірок. Утворена теплоелектрична схема буде об'єктом розрахунку на наступному етапі алгоритму.

Кожній комірці, що належить об'єкту дослідження, відповідає деяка елементарна теплоелектрична схема, яка з'єднується із аналогічними схемами з прилеглих комірок, утворюючи в такий спосіб загальну теплоелектричну схему, подібну до зображеної на рис. 1.

Теплоелектрична схема, що ставиться у відповідність елементарній комірці, залежить від вирішуваної задачі моделювання, положення елементарної комірки в просторовій області, а також наявності віднесених до комірки теплових джерел та стоків теплоти. В загальному випадку заступна теплоелектрична схема містить шість провідностей та одну ємність, з'єднаних між собою, як показано на рис. 1.

3. Розрахунок теплоелектричної схеми

Етап розрахунку теплоелектричної схеми полягає в моделюванні загальної теплоелектричної схеми, сформованої на попередньому етапі за допомогою методів схемотехнічного аналізу. Після розрахунку стають відомими температури у вузлах теплоелектричної схеми, що дозволяє провести цілеспрямовану корекцію теплоелектричної сітки.

Розрахунок теплоелектричної схеми є досить складною процедурою, алгоритм виконання якої залежить від вирішуваної задачі моделювання.

4. Корекція теплоелектричної сітки

Етап корекції теплоелектричної сітки є найбільш важливим з точки зору оптимізації сіткових моделей, оскільки саме на цьому етапі відбувається цілеспрямована корекція теплоелектричної сітки в напрямку підвищення точності моделі при збереженні її мінімальної розмірності.

Корекція теплоелектричної сітки починається з оцінки відносних градієнтів температури δT для кожного з інтервалів вздовж координатних осей x , y та z . Вказані градієнти визначаються як максимальні різниці температур між центральним вузлом елементарної комірки та її поверхневими вузлами, віднесені до загального перепаду температури на всій конструкції:

$$\begin{aligned}\delta T_x &= \frac{\max(|T_1 - T_0|, |T_4 - T_0|)}{T_{max} - T_{min}} \\ \delta T_y &= \frac{\max(|T_2 - T_0|, |T_5 - T_0|)}{T_{max} - T_{min}}, \\ \delta T_z &= \frac{\max(|T_3 - T_0|, |T_6 - T_0|)}{T_{max} - T_{min}}\end{aligned}\quad (2)$$

де T_0 - T_6 – температури у вузлах 0-6 заступної схеми елементарної комірки, зображеної на рис. 1, відповідно; T_{max} , T_{min} – максимальна та мінімальна температура на вузлах всієї сіткової моделі, відповідно. За температурний градієнту інтервалу приймається найбільший температурний градієнт серед градієнтів температури всіх комірок, що потрапляють в цей інтервал, по відповідній координатній осі.

Наступним кроком є розбиття інтервалів, яке полягає в тривіальному діленні інтервалів навпіл. Численні дослідження, проведені авторами, показали, що в переважній більшості випадків саме ділення навпіл дозволяє досягнути найвищої точності за найменший час. Розбиттю підлягають лише ті інтервали, відносні температурні градієнти яких перевищують наперед задану точність теплоелектричної сітки ε_c :

$$\delta T > \varepsilon_c. \quad (3)$$

У більшості випадків доцільно обмежувати ріст розмірності сіткової моделі внаслідок розбиття інтервалів. При впровадженні такого обмеження серед інтервалів, для яких виконується умова (3), розбиттю підлягають лише ті, які мають найвищі температурні градієнти. Обмеження росту розмірності сіткової моделі дозволяє скоротити розмірність моделі при збереженні її точності.

Якщо в процесі корекції теплоелектричної сітки остання зазнала структурних змін, то повертаються на етап утворення теплоелектричної схеми і розпочинають нову ітерацію за умови, що розмірність сіткової моделі n не перевищує наперед задану величину n_c :

$$n \leq n_c. \quad (4)$$

Як показали численні дослідження, проведені авторами, обмеження розмірності сіткової моделі, задане нерівністю (4), може бути критерієм завершення алгоритму на рівні з точнісним критерієм, який може бути одержаний з умови (3). В обох випадках одержується теплоелектрична сітка з оптимальним співвідношенням між точністю та розмірністю.

III. Практичне застосування алгоритму

З метою апробації запропонованого алгоритму було виконане моделювання тестової структури ГІС з відомим температурним режимом [6]. Тестова структура ГІС зображена на рис. 3.

Для моделювання поруч із реалізацією запропонованого алгоритму використовувалася система теплового аналізу STEA, яка базується на ручному синтезі теплоелектричних сіток [2]. В таблиці наведені температури в центратах теплових джерел ГІС, розраховані обома методами, а також одержані в результаті фізичного експерименту, точність вимірювання температури в якому становила ± 3 °С.

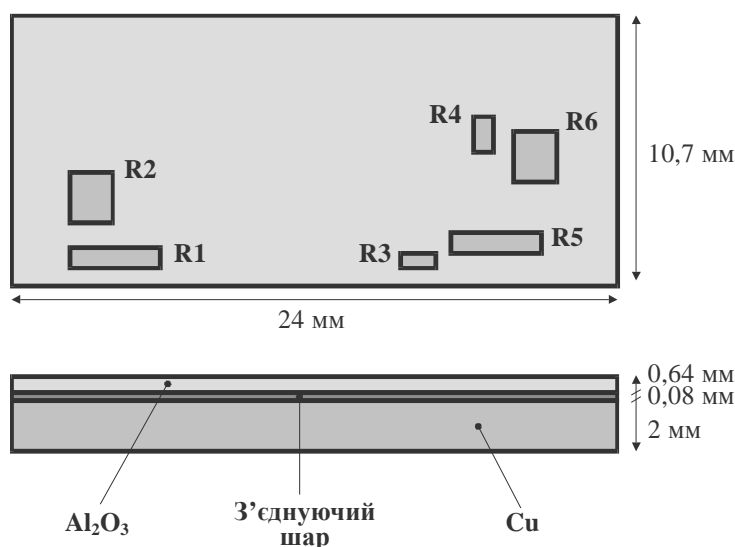


Рис. 3. Тестова структура ГІС

Результати температурного аналізу ГІС

| Метод | Сітка | Температура в центрі джерела, °С | | | | | | Похибка, % | |
|-------------------------|-------------------|----------------------------------|------|------|------|------|------|------------|--------|
| | | R1 | R2 | R3 | R4 | R5 | R6 | Макс. | Серед. |
| Вимірювання | – | 37,0 | 57,0 | 81,5 | 64,0 | 40,0 | 64,0 | - | - |
| Система STEA | 18×14×5 (1260) | 40,6 | 58,1 | 83,2 | 68,8 | 41,3 | 63,7 | 9,7 | 4,2 |
| Запропонований алгоритм | 20×14×4 (1120) | 38,6 | 58,9 | 82,7 | 66,1 | 40,7 | 63,4 | 4,3 | 2,5 |

Порівняльний аналіз результатів моделювання, наведених в табл. 1, показує, що для однієї й тієї ж розмірності теплоелектричної сітки запропонований алгоритм автоматичного синтезу теплоелектричних сіток дозволяє одержати більш точні результати, ніж оснований на ручному синтезі сіткових моделей.

IV. Висновки

Авторами запропонований підхід до автоматичного синтезу оптимальних теплоелектричних сіток, призначених для теплового аналізу МЕП різного конструктивно-технологічного виконання. Апробація розробленого алгоритму підтвердила його перевагу в точності сіткових моделей над ручним методом побудови теплоелектричних сіток. Для тестової структури ГІС спостерігалось зменшення похибки результатів моделювання у два рази.

1. Федасюк Д. В. *Методи та засоби теплового проектування мікроелектронних пристроїв*. – Львів. – 1999. 2. Федасюк Д. В., Петров Д. В., Левус Є. В. *Застосування теплоелектричної аналогії в тепловому моделюванні МЕП // Вісник ДУ “Львівська політехніка”*. – 1998. – № 352. – С. 42 – 51. 3. Федасюк Д., Петров Д., Левус Є. *Аналіз сучасних систем теплового моделювання МЕП // Вісник ДУ “Львівська політехніка”*. – Львів. – № 387. – 2000. – С. 398 – 403. 4. *Thermal Network Modeling Handbook*. K&K Associates for the National Aeronautics and Space Administration. – 2000. 5. Чудаков А. Д. *Электрические моделирующие сетки и их применение*. – М., – 1968. 6. M. Janicki, A. Napieralski, D. Fedasyuk, D. Petrov “*Thermal modelling of hybrid circuits: simulation method comparison*” // *Microelectronics Reliability Journal*, №40 (2000), PP. 541-546.