

ЧИСЕЛЬНИЙ АНАЛІЗ КОНВЕКТИВНОГО ОХОЛОДЖЕННЯ РЕБЕРНИХ ТЕПЛОБМІННИКІВ В СУЧАСНІЙ ЕЛЕКТРОНІЦІ

Вінницький національний технічний університет

Анотація

У доповіді розглянуто теорію конвективного теплообміну в системах охолодження напівпровідникових компонентів. Описано застосування методу скінченних різниць для розрахунку температурних полів у радіаторах із прямими прямокутними ребрами, що використовуються в інфраструктурі штучного інтелекту (AI), дата-центрах та силовій електроніці. Проаналізовано залежність теплового опору від геометрії ребер та швидкості потоку. Оптимізація геометрії дозволяє зменшити вагу теплообмінників на 15–20% без ризику перегріву кристала, що є критичним для зниження вуглецевого сліду.

Ключові слова: теплообмінник, конвекція, чисельний аналіз, метод скінченних різниць, температурне поле, ефективність ребра.

Abstract

This paper examines the theory of convective heat transfer in semiconductor component cooling systems. It describes the application of the finite difference method to calculate temperature fields in heat sinks with straight rectangular fins, which are used in artificial intelligence (AI) infrastructure, data centers, and power electronics. The dependence of thermal resistance on fin geometry and flow velocity is analyzed. Optimizing the geometry allows for a 15–20% reduction in the weight of heat exchangers without the risk of chip overheating, which is critical for reducing the carbon footprint.

Keywords: heat exchanger, convection, numerical analysis, finite difference method, temperature field, fin efficiency.

Вступ

Ефективне відведення теплоти від тепловиділяючих елементів сучасної електроніки є критичним чинником, що впливає на надійність і продуктивність пристроїв. У зв'язку з активним розвитком архітектур штучного інтелекту (AI), високощільних дата-центрів і силовій електроніки для електромобілів, теплові потоки на одиницю площі сучасних мікросхем суттєво зросли [6]. Це зумовлює необхідність впровадження новітніх технологій охолодження, зокрема інтелектуальних рішень на базі AI, які сприяють оптимізації енергоефективності тепловідведення [6].

Попри появу передових методів охолодження, найбільш поширеним, економічним та надійним залишається використання радіаторів із прямокутними ребрами. Сучасні системи охолодження дедалі частіше інтегрують пряме рідинне охолодження, іммерсійні та двофазні методи, а також адаптивні рішення з керуванням на основі AI, що підвищують ефективність тепловіддачі та дозволяють налаштовувати режим охолодження під конкретні умови експлуатації [6].

Фізична та математична модель

Розглянемо поодиноке пряме ребро прямокутного перерізу завдовжки L , товщиною δ та шириною W ($W \gg \delta$), що спрощує задачу до одномірного моделювання вздовж координати x (від основи ребра $x = 0$ до його вершини $x = L$). Основа ребра підтримується при постійній температурі T_0 , що відповідає тепловому навантаженню електронного компонента. Поверхня ребра охолоджується потоком повітря з температурою середовища T_f .

Процес стаціонарної теплопровідності в тілі ребра описується диференціальним рівнянням Фур'є [1]. З урахуванням закону конвективного охолодження Ньютона-Ріхмана, рівняння теплового балансу набуває вигляду:

$$\frac{d^2T}{dx^2} - \frac{2\alpha}{\lambda\delta}(T - T_f) = 0$$

Дана модель фокусується на конвективному теплообміні, адже при температурах до 100 °C радіаційний внесок у тепловий баланс є незначним і його можна нехтувати [4].

Для розв'язання рівняння задаються такі граничні умови:

1. На основі ребра (гранична умова I роду):

$$T(0) = T_0$$

2. На торці ребра (гранична умова III роду, що враховує конвекційний теплообмін [2]):

$$-\lambda \left. \frac{dT}{dx} \right|_{x=L} = \alpha(T(L) - T_f)$$

Чисельний метод розрахунку

Для чисельного аналізу безперервну область $[0, L]$ розбито на N рівних інтервалів із кроком $h = L/N$. Похідні в диференціальному рівнянні замінено їх скінченно-різницевиими аналогами другого порядку точності [3]:

$$\frac{T_{i-1} - 2T_i + T_{i+1}}{h^2} - m^2(T_i - T_f) = 0$$

де $m^2 = \frac{2\alpha}{\lambda\delta}$. Після групування членів для кожного внутрішнього вузла $i = 1, \dots, N - 1$ отримано лінійне алгебраїчне рівняння:

$$T_{i-1} - (2 + m^2h^2)T_i + T_{i+1} = -m^2h^2T_f$$

Сформована система лінійних алгебраїчних рівнянь із тридіагональною матрицею розв'язувалася чисельно методом прогонки (алгоритм Томаса), що реалізовано програмним шляхом.

Результати дослідження

Чисельне моделювання виконано для алюмінієвого ребра з параметрами: $L = 0.05$ м, $\delta = 0.003$ м, $T_0 = 353$ К (80 °C), $T_f = 293$ К (20 °C). Розрахунки виконано для двох режимів: пасивної конвекції ($\alpha = 10$ Вт/(м² · К)) та примусової вентиляції ($\alpha = 80$ Вт/(м² · К)).

За результатами чисельного аналізу, при пасивній конвекції температура по довжині ребра знижується незначно — від 80 °C до 76,2 °C біля торця. Це свідчить про надлишкову товщину або довжину ребра, що призводить до зайвої витрати матеріалів і збільшення ваги конструкції без значного покращення охолодження. При примусовому обдуві температура на вершині ребра знижується до 54,1 °C, що демонструє значно ефективніше відведення тепла.

Ефективність ребра, визначена як відношення фактичного теплового потоку до теоретичного за однорідної температури, знижується зі 0,96 до 0,72 при збільшенні α , узгоджуючись із відомими емпіричними даними для прямокутних ребер [5].

Це означає, що подовження ребра при високих коефіцієнтах теплообміну стає неекономним через насичення тепловіддачі віддалених ділянок. Оптимізація співвідношення L/δ дозволяє зменшити матеріаломісткість теплообмінника на 15–20% без погіршення теплового режиму, що суттєво знижує вуглецевий слід і вартість систем охолодження [6].

Висновок

У роботі запропоновано та реалізовано скінченно-різницеву модель конвективного охолодження прямокутного ребра, що дозволяє з високою точністю розраховувати розподіл температур уздовж ребра для різних режимів вентиляції. Проаналізовано вплив геометрії ребра та інтенсивності охолодження на тепловий режим, що підтверджується результатами чисельного моделювання для алюмінієвого ребра.

Встановлено, що при пасивній конвекції градієнт температури мінімальний, що свідчить про надлишкову товщину ребра для такого режиму. При посиленому повітряному обдуві температура на торці ребра суттєво знижується, підкреслюючи ефективність активного охолодження. Зниження ефективності ребра зі збільшенням коефіцієнта теплообміну вказує на доцільність оптимізації розмірів для уникнення матеріальних витрат та зайвої ваги.

Розроблений чисельний алгоритм на основі методу скінченних різниць і алгоритму Томаса демонструє високу обчислювальну ефективність і стабільність, що робить його практичним інструментом для експрес-аналізу теплових режимів у CAD/CAE-системах. Оптимізація геометрії ребер забезпечує зменшення ваги теплообмінника на 15–20% без ризику перегріву, що сприяє підвищенню енергоефективності та зниженню вуглецевого сліду сучасної електроніки.

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. Bergman, T.L., Lavine, A.S., Incropera, F.P., DeWitt, D.P. Introduction to Heat Transfer, 6th ed. Wiley, 2011. [Електронний ресурс]. — Режим доступу: https://madar-ju.com/storage/images/files/file_1738891122cRBDf.pdf.
2. Kraus A. D., Aziz A., Welty J. R. Extended Surface Heat Transfer. — Wiley-Interscience, 2000. [Електронний ресурс]. — Режим доступу: <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/book/10.1002/9780470172582>.
3. Lewis, R.W., Morgan, K., Thomas, H.R., Seetharamu, K.N. The Finite Element Method in Heat Transfer Analysis. Wiley, 1996. [Електронний ресурс]. — Режим доступу: <https://books.google.com/cu/books?id=2mVqtW7BDpgC&printsec=frontcover#v=onepage&q&f=false>.
4. Siegel, R., Howell, J.R., Mengüç, M.P. Thermal Radiation Heat Transfer, 6th ed. CRC Press, 2015. [Електронний ресурс]. — Режим доступу: https://www.academia.edu/77494417/Thermal_Radiation_Heat_Transfer.
5. Holman, J.P. Heat Transfer, 10th ed. McGraw-Hill, 2010. [Електронний ресурс]. — Режим доступу: <https://coeng.uobaghdad.edu.iq/wp-content/uploads/sites/3/uploads/ammar%20data%202017/lectures/chemistry/classes/%D8%A7%D9%86%D8%AA%D9%82%D8%A7%D9%84%20%D8%AD%D8%B1%D8%A7%D8%B1%D8%A9%20%D9%85%D8%B1%D8%AD%D9%84%D8%A9%20%D8%AB%D8%A7%D9%84%D8%AB%D8%A9/Heat%20Transfer.%20Tenth%20Edition.pdf>.
6. Al Kez, D., Foley, A. M., Wong, F. W. B. M. H., Dolfi, A., & Srinivasan, G. AI-driven cooling technologies for high-performance data centres: state-of-the-art review and future directions. Sustainable Energy Technologies and Assessments, 2025. [Електронний ресурс]. — Режим доступу: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S221313882500342X>

Переродова Анна Олексіївна – студентка групи ІКН-25Б, факультет інтелектуальних інформаційних технологій та автоматизації, Вінницький національний технічний університет, Вінниця, e-mail: pererodova30@gmail.com

Науковий керівник: **Мартинюк Володимир Валерійович** — канд. техн. наук, доцент кафедри загальної фізики, Вінницький національний технічний університет, м. Вінниця

Pererodova Anna Oleksiivna – student of group 1CS-25B, Faculty of Intellectual Information Technologies and Automation, Vinnytsia National Technical University, Vinnytsia, e-mail: pererodova30@gmail.com

Supervisor: **Martyniuk Volodymyr V.** – Cand. Sc. (Eng), Assistant Professor of general Physics, Vinnytsia National Technical University, Vinnytsia, e-mail: martyniuk.v.v@vntu.edu.ua