

Крищук В. Н.¹, Шило Г. Н.², Каспирович Н. А.³, Огренич Е. В.⁴¹Канд. техн. наук, професор, Запорожский национальный технический университет, Украина²Канд. техн. наук, доцент, Запорожский национальный технический университет, Украина³Аспирант, Запорожский национальный технический университет, Украина⁴Асистент, Запорожский национальный технический университет, Украина

ОПТИМИЗАЦИЯ ОРЕБРЕННОГО КАНАЛА В СИСТЕМАХ ПРИНУДИТЕЛЬНОГО ВОЗДУШНОГО ОХЛАЖДЕНИЯ РЭА

Рассмотрена возможность использования оребренного канала, как упрощенной модели для анализа тепловых режимов радиоэлектронной аппаратуры кассетного типа с высоким удельным тепловыделением при принудительном воздушном охлаждении.

Исследованы тепловые характеристики оребренного канала. Получены соотношения для оптимальных размеров конструкции оребренного канала, которые позволяют минимизировать тепловое сопротивление. Разработан итерационный алгоритм оптимизации.

Показан пример проектирования оребренного канала с оптимальным тепловым режимом. В результате оптимизации конструкции оребренного канала тепловое сопротивление уменьшилось на 35 %.

Ключевые слова: оребренный канал, тепловая модель, тепловое сопротивление, принудительное воздушное охлаждение, системы инженерного анализа, радиоэлектронная аппаратура.

ВВЕДЕНИЕ

Обеспечение теплового режима является одной из важных задач, возникающих при проектировании радиоэлектронной аппаратуры. Особенно эта задача становится актуальной для мобильной радиоэлектронной аппаратуры кассетного типа, которая характеризуется высоким удельным тепловыделением [1, 2]. В радиоэлектронной аппаратуре кассетного типа используется плотное размещение однотипных блоков. Примером такой конструкции может послужить твердотельный передатчик [3]. Чаще всего такие устройства требуют принудительного воздушного охлаждения и оребрения поверхности наиболее теплонагруженных блоков. Поэтому тепловую модель конструкции можно представить в виде оребренного канала с принудительным воздушным охлаждением.

В литературе рассмотрены методы оптимизации параметров оребрения поверхностей при естественном воздушном охлаждении, позволяющие минимизировать массу [4]. Такие методы основаны на применении упрощенных аналитических формул и не позволяют оптимизировать параметры при принудительном воздушном охлаждении. В качестве еще одного способа оптимизации используется физическое моделирование [5], которое характеризуется значительной трудоемкостью и материальными затратами.

Последние годы для решения задач теплового проектирования используются программные средства инженерного анализа [6, 7]. В радиоэлектронной аппаратуре такой подход позволил значительно повысить точность методов оптимизации конструкций герметичных блоков РЭА [8] и параметров ребристых радиаторов [9] с естественным воздушным охлаждением.

Целью работы является исследование тепловых характеристик оребренного канала при принудительном воздушном охлаждении с использованием средств инженерного анализа и разработка метода оптимизации оребренного канала.

Для достижения поставленной цели необходимо для оребренного канала решить следующие задачи:

- создать тепловую модель,
- исследовать тепловые характеристики,
- определить оптимальные соотношения конструктивных параметров,
- разработать алгоритм оптимизации.

1 ТЕПЛОВЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ОРЕБРЕННОГО КАНАЛА

Исследования тепловых характеристик модели оребренного канала проводились с использованием модуля инженерного анализа системы автоматизированного проектирования Solid Works. При построении тепловой модели в системе инженерного анализа были приняты следующие ограничения:

- коэффициент теплопроводности материала не зависит от температуры;
- боковые стенки оребренного канала адиабатические;
- для обеспечения принудительного охлаждения на вход подается постоянный воздушный поток на расстоянии 100 мм, который задается объемным расходом воздуха;
- мощность задавалась на внешние поверхности основания оребренного канала.

Тепловая модель оребренного канала состоит из двух устройств. Трехмерная модель канала представлена на рис. 1, где показаны конструктивные элементы канала: 1 – основание, 2 – оребрение. Габаритные размеры устройств: H – высота канала, L – длина канала и D – ширина канала. Стрелкой показано направление воздушного потока.

Площадь поперечного сечения оребренного канала показана на рис. 2, где d_p – толщина основания канала; l_k – расстояние между устройствами в канале; d_r – толщина ребра; l_r – высота ребра.

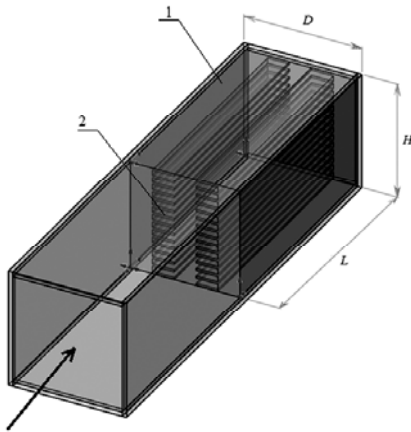


Рисунок 1 – Тепловая модель оребренного канала

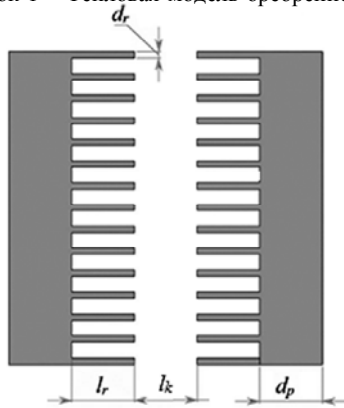


Рисунок 2 – Поперечное сечение оребренного канала

Моделирование проводилось для канала, который имел параметры: длина канала – 100 мм, высота канала – 50 мм, ширина канала – 50 мм, расстояние между устройствами 10 мм. Рассеиваемая мощность – 50 Вт. Температура окружающей среды 50°C.

Исследовали зависимость максимальной температуры канала от параметров оребрения: длина ребра, ширина ребра, количество ребер. Габаритные размеры канала: высота, длина, ширина не изменялись.

Результаты моделирования представлялись в виде тепловых характеристик зависимостей теплового сопротивления от параметров оребрения.

Зависимость теплового сопротивления канала от количества ребер представлено на рис. 3, где R_t – тепловое сопротивление, n – количество ребер.

Тепловое сопротивление определяется с помощью выражения:

$$R_t = \frac{t_{\max} - t_c}{P}, \quad (1)$$

где t_{\max} – максимальная температура в канале; t_c – температура окружающей среды; P – рассеиваемая мощность.

Как видно из рис. 3, эта тепловая характеристика имеет экстремум, что позволяет провести оптимизацию количества ребер. Для тепловых характеристик такого вида можно использовать математическую модель в виде:

$$R_t(n) = g_1 \cdot n + \frac{g_2}{n}, \quad (2)$$

где g_1, g_2 – коэффициенты модели.

Для определения коэффициентов модели составили систему уравнений в двух точках графика, расположенных по разные стороны от области минимума. Решение системы представляется в виде соотношений:

$$g_1 = (R_{t_2} - \frac{g_2}{x_2}) \cdot \frac{1}{x_2},$$

$$g_2 = (R_{t_{(k-1)}} \cdot x_{(k-1)} - \frac{R_{t_2} \cdot (x_{(k-1)})^2}{x_2}) \div (1 - \frac{(x_{(k-1)})^2}{(x_2)^2}). \quad (3)$$

Зависимость теплового сопротивления оребренного канала от толщины ребра представлено на рис. 4. Эта характеристика также имеет экстремум. Математическая модель этой характеристики аналогична виду (2) и имеет подобные выражения для определения коэффициентов.

Предложенные тепловые модели могут быть использованы для оптимизации оребренного канала.

Зависимость теплового сопротивления от длины ребра имеет монотонно-убывающий вид (рис. 5).

В процессе проектирования канала длина ребра выбирается максимально возможной с целью получения наименьшего значения теплового сопротивления.

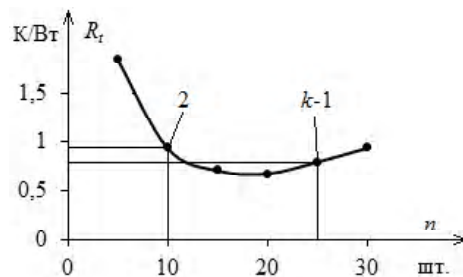


Рисунок 3 – Зависимость теплового сопротивления канала от количества ребер

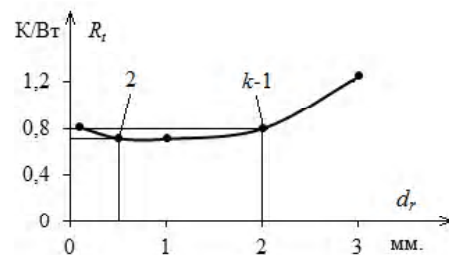


Рисунок 4 – Зависимость теплового сопротивления канала от толщины ребра

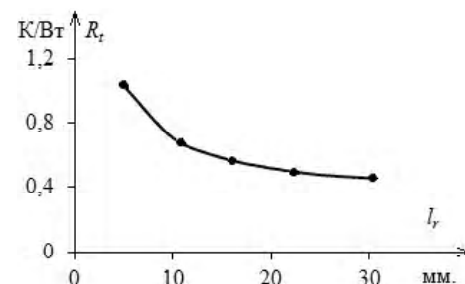


Рисунок 5 – Зависимость теплового сопротивления канала от длины ребра

2 ОПТИМИЗАЦІЯ ОРЕБРЕННОГО КАНАЛА

Исследование тепловых характеристик оребреного канала показало, что выбором каналов можно существенно снизить перегревы устройств. Оптимизация параметров оребреного канала производится для целевой функции:

$$R_l(n, d_r) \rightarrow \min. \quad (4)$$

В процессе оптимизации учитывались ограничения на размеры канала:

$$H=H_k, L=L_k, D=D_k$$

где H_k, L_k, D_k – номинальные значения конструктивных параметров, полученные на этапе проектирования устройства.

При этих ограничениях высота ребер определяется с помощью соотношений

$$l_r = \frac{1}{2}(D - l_k - 2 \cdot d_p). \quad (5)$$

Математическая модель (2) позволяет определить оптимальное количество ребер с помощью соотношения:

$$n = \sqrt{\frac{g_2}{g_1}}. \quad (6)$$

Аналогично определяется оптимальное значение толщины ребра. Это позволяет при оптимизации параметров оребреного канала использовать последовательный итерационный алгоритм, в котором проводится оптимизация одного из параметров, а результаты этой оптимизации используются при оптимизации следующего параметра.

Шаг 1. – Задаются начальные значения: длины ребра, количества ребер и толщины ребра. С помощью моделирования определяется тепловое сопротивление оребрения канала по заданной мощности и допустимому перепаду температур.

Шаг 2. – Моделируются тепловые режимы канала при изменении оптимизируемого параметра на величину $\pm 20\%$ и определяются коэффициенты g_1 и g_2 .

Шаг 3. – Определяется оптимальное значение параметра.

Шаг 4. – Устанавливается оптимальное значение параметра.

Шаг 5. – Повторяем шаг 2, 3 для следующего параметра.

Шаг 6. – Проверяется условие завершения алгоритма:

$$\frac{R_t(k) - R_{t_0}(k-1)}{R_{t_0}^k} \leq \varepsilon,$$

где k – номер итерации; ε – погрешность вычислений.

Если условие не выполняется, то переход на шаг 2, иначе – конец алгоритма.

3 ЭКСПЕРИМЕНТЫ И РЕЗУЛЬТАТЫ

Разработанный алгоритм использован для оптимизации оребреного канала, параметры которого приводятся ниже.

Мощность канала $P = 50$ Вт, температура окружающей среды $t_c = 50$ °С, коэффициент черноты поверхности тепловода 0,91, погрешность вычислений алгоритма оптимизации соответствует $\varepsilon = 0,05$.

В качестве начального приближения при оптимизации были выбраны размеры оребреного канала: $n=10$, $l_r=10$ мм и $d_r=1$ мм. Результаты оптимизации конструкций оребреного канала приведены в табл. 1.

Проведенная оптимизация показала, что после 9 итераций была достигнута требуемая точность, тепловой режим улучшен, тепловое сопротивление уменьшилось на 35%.

ВЫВОДЫ

Предложенный метод оптимизации оребреного канала с использованием современных систем автоматического проектирования позволяет реализовать допустимый тепловой режим работы устройства. Процедура оптимизации реализована в виде итерационного алгоритма. Алгоритм обладает достаточно высокой сходимостью.

Сравнение величины теплового сопротивления исходного оребреного канала и полученного в результате оптимизации показало, что оптимизация приводит к улучшению теплового режима, а тепловое сопротивление уменьшилось на 35%.

БЛАГОДАРНОСТИ

Работа выполнена в рамках выполнения научно-исследовательской темы Запорожского национального технического университета «Информационные технологии проектирования теплонагруженных радиоэлектронных аппаратов» (номер гос. регистрации 0113U001096).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Ненашев А. П. Конструирование радиоэлектронных средств / А. П. Ненашев. – М. : Высш. шк., 1990. – 432 с.
2. Дульнев Р. Н. Тепло- и массообмен в радиоэлектронной аппаратуре / Р. Н. Дульнев. – М. : Высш.шк., 1984. – 247 с.
3. Пат. 13704 Україна, МПК G01S 7/36 H04B 15/00. Пристрій для подавлення пасивних завод / Каспирович О. Г., Лаврентьев В. М., Май І. Д., Пресняк І. С.; заявник та патентовласник КП «НВК «Іскра» № u200509636; заяв.13.10.2005; опубл.17.04.2006, Бюл. № 4, 2006.
4. Ройзен Л. И. Теловой расчет оребрённых поверхностей / Л. И. Ройзен, И. Н. Дулькин; под. ред. В. Г. Фастовского. – М. : Энергия, 1977. – 256 с.

Таблица 1 – Параметры оребреного канала

№ итерации	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
n , шт.	10	15	15	18	21	22	22	23	24	24
d_r , мм.	1	0,9	0,7	0,6	0,49	0,4	0,3	0,35	0,27	0,24
R_{t_0} , °С/Вт	1,071	0,7086	0,7656	0,7462	0,7252	0,711	0,701	0,688	0,687	0,683

5. Drogenik U. Analysis of Theoretical Limits of Forced-Air Cooling Using Advanced Composite Materials With High Thermal Conductivities / U. Drogenik, A. Stupar, J.W. Kolar // *IEEE Transactions on Components, Packaging, and Manufacturing Technology*. – 2011. – Vol. 1, № 4. – P. 528–535.
 6. Алямовский А. А. Инженерные расчеты в Solid Works Simulation / А. А. Алямовский. – М. : ДМК Пресс, 2010. – 464 с.
 7. Гончаров П. С. Практическое использование NX / П. С. Гончаров, М. Ю. Ельцов, С. Б. Коршиков, И. В. Лаптев, В. А. Осюк. – М. : ИД ДМК Пресс, 2010. – 504 с.
 8. Гапоненко Н. П. Оптимизация объема герметичных блоков радиоэлектронной аппаратуры / Н. П. Гапоненко, О. В. Сиротюк, Е. В. Огренич, Ю. А. Лопатка, Е. К. Арешкин // *Прикладная радиоэлектроника*. – 2012. – Т. 11, № 3. – С. 155–158.
 9. Шило Г. Н. Проектирование радиаторов с оптимальными массогабаритными параметрами / Г. Н. Шило, Н. П. Гапоненко, Е. В. Огренич // *Технология и конструирование в электронной аппаратуре*. – 2011. – № 1–2. – С. 30–33.
- Статья поступила в редакцию 21.05.2014.
После доработки 28.05.2014.

Кришук В. М.¹, Шило Г. М.², Каспирович Н. О.³, Огренич Е. В.⁴

¹Канд. техн. наук, проф., Запорізький національний технічний університет, Україна

²Канд. техн. наук, доцент, Запорізький національний технічний університет, Україна

³Аспірант, Запорізький національний технічний університет, Україна

⁴Асистент, Запорізький національний технічний університет, Україна

ОПТИМИЗАЦИЯ ОРЕБРЕННОГО КАНАЛУ В СИСТЕМАХ ПРИМУСОВОГО ПОВІТРЯННОГО ОХОЛОДЖЕННЯ РЕА

Розглянуто можливість використання оребреного каналу, як спрощеної моделі для аналізу теплових режимів радіоелектронної апаратури касетного типу з високим питомим тепловиділенням при примусовому повітряному охолодженні.

Досліджено теплові характеристики оребреного каналу. Отримано співвідношення для оптимальних розмірів конструкції оребреного каналу, які дозволяють мінімізувати тепловий опір. Розроблено ітераційний алгоритм оптимізації.

Наведено приклад проектування оребреного каналу з оптимальним тепловим режимом. В результаті оптимізації конструкції оребреного каналу тепловий опір зменшився на 35 %.

Ключові слова: оребрений канал, теплова модель, тепловий опір, примусове повітряне охолодження, системи інженерного аналізу, радіоелектронна апаратура.

Krischuk V. N.¹, Shilo G. N.², Kaspyrovych N. A.³, Ogrenich E. V.⁴

¹Ph.D, Professor, Zaporozhye National Technical University, Ukraine

²Ph.D., Associate Professor, Zaporozhye National Technical University, Ukraine

³Postgraduate student, Zaporozhye National Technical University, Ukraine

⁴Assistant, Zaporozhye National Technical University, Ukraine

FINNED CHANNEL OPTIMIZING IN RADIO ELECTRONIC DEVICES FOR FORCED AIR COOLING SYSTEMS

The finned channel is used as a simplified model for the analysis of thermal conditions of cartridge design electronic equipment with a high power density for forced air cooling. The finned channel thermal model and method of its creating are described by the computer-aided engineering systems. Clearance limitations of the radio electronic units and the manufacturing limitations on width of fins and their numbers are considered during creating the thermal model.

The finned channel thermal characteristics that include the thermal resistance dependence on parameters of fins (width, length, number) are investigated. The approximating functions for these dependencies are proposed.

To minimize the thermal resistance the correlations for finned channel having the optimal sizes are obtained. The iteration optimization algorithm is developed. This approach provides high accuracy. In the algorithm the thermal conditions are calculated by the computer-aided engineering systems.

The example of designing the finned channel with optimal thermal conditions is showed. As a result of optimizing the finned channel thermal resistance decreased by 35 %.

Keywords: finned channel, thermal model, thermal resistance, forced air cooling, computer-aided engineering systems, electronic equipment.

REFERENCES

1. Nenashev A. P. *Konstruirovaniye radioelektronnykh sredstv*. Moscow, Vyssh. shk., 1990, 432 p.
2. Dulnev R. N. *Teplo- i massoobmen v radioelektronnoy apparature*, Moscow, Vyssh. shk., 1984, 247 p.
3. Kaspirovich O. G., Lavrentev V. M., May I. D., Presnyak I. S. Pat. 13704 Ukrainya, MPK G01S 7/36 H04B 15/00. Pristrlly dlya podavleniya pasivnykh zavod ; zayavnik ta patentovlasnik KP «NVK «lskra». No. u200509636; zayav.13.10.2005; opubl.17.04.2006, Byul. No. 4, 2006.
4. Royzen L. I., Dulkan I. N. pod. red. V. G. Fastovskogo *Telovoy raschet orebrennykh poverhnostey*. Moscow, Energiya, 1977, 256 p.
5. Drogenik U., Stupar A., Kolar J. W. Analysis of Theoretical Limits of Forced-Air Cooling Using Advanced Composite Materials With High Thermal Conductivities, *IEEE Transactions on Components, Packaging, and Manufacturing Technology*, 2011, vol. 1, No. 4, pp. 528–535.
6. Alyamovskiy A. A. *Inzhenernyie rascheti v Solid Works Simulation*. Moscow, DMK Press, 2010, 464 p.
7. Goncharov P. S., Eltsov M. Yu., Korshikov S. B., Laptev I. V., Osiyuk V. A. *Prakticheskoe ispolzovanie NX*. Moscow, ID DMK Press, 2010, 504 p.
8. Gaponenko N. P., Sirotyuk O. V., Ogrenich E. V., Lopatka Yu. A., Arshkin E. K. Optimizatsiya ob'ema germetichnykh blokov radioelektronnoy apparaturyi, *Prikladnaya radioelektronika*, 2012, Vol.11, No. 3, pp. 155–158.
9. Shilo G. N., Gaponenko N. P., Ogrenich E. V. *Proektirovaniye radiatorov s optimalnyimi massogabaritnyimi parametrami, Tehnologiya i konstruirovaniye v elektronnoy apparature*, 2011, No. 1–2, pp. 30–33.