

Міністерство освіти і науки України
Національний університет "Львівська політехніка"

ОГРЕНИЧ ЄВГЕН ВІКТОРОВИЧ



УДК 621.396.6.017:004.942

**ВДОСКОНАЛЕННЯ МЕТОДІВ АВТОМАТИЗОВАНОГО
ПРОЕКТУВАННЯ ТЕПЛОВІДВІДНИХ ЕЛЕМЕНТІВ
РАДІОЕЛЕКТРОННИХ АПАРАТІВ**

05.13.12 – Системи автоматизації проектувальних робіт

АВТОРЕФЕРАТ
дисертації на здобуття наукового ступеня
кандидата технічних наук

Львів – 2016

Дисертацією є рукопис.

Роботу виконано у Запорізькому національному технічному університеті Міністерства освіти і науки України.

Науковий керівник: кандидат технічних наук, доцент
Шило Галина Миколаївна,
Запорізький національний технічний університет,
доцент кафедри інформаційних технологій
електронних засобів

Офіційні опоненти: доктор технічних наук, професор
Теслюк Василь Миколайович,
Національний університет "Львівська політехніка",
професор кафедри систем автоматизованого
проектування

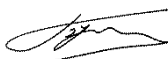
доктор технічних наук, професор
Гоменюк Сергій Іванович,
Запорізький національний університет,
декан математичного факультету

Захист дисертації відбудеться 19 травня 2016 р. о 16⁰⁰ год. на засіданні спеціалізованої вченої ради Д 35.052.05 у Національному університеті "Львівська політехніка" за адресою: 79013, м. Львів, вул. Професорська, 2, ауд. 218.

З дисертацією можна ознайомитись в науково-технічній бібліотеці Національного університету "Львівська політехніка" за адресою: 79013, м. Львів, вул. Професорська, 1.

Автореферат розіслано "15" квітня 2016 р.

Учений секретар
спеціалізованої вченої ради,
доктор технічних наук, професор



Р.А.Бунь

ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

Актуальність теми. Тепловий режим теплонавантажених елементів у радіоелектронних апаратах у більшості випадків забезпечується використанням тепловідвідних елементів або примусовим охолодженням. Обидва ці шляхи вимагають витрат матеріалів та впливають на масогабаритні показники радіоапаратури. Оптимізація конструкцій тепловідвідних елементів може значно знизити їх масу та габарити.

Одним з найбільш розповсюджених тепловідвідних елементів є радіатор. Існує велика кількість конструкцій радіаторів, що не дає змоги в загальному випадку розв'язати задачу оптимізації їх масогабаритних показників. На цей час досліджено тільки прості елементи конструкцій радіаторів штир та ребро, для яких зазначено можливість зменшення ваги в декілька разів. Результати таких досліджень наведено у працях Ройзена та Дулькіна.

Процедури оптимізації складних конструкцій тепловідвідних елементів (ребристі, штирові та ін. види радіаторів) не розроблені в повному обсязі у зв'язку з відсутністю аналітичних описів процесів руху теплоносіїв та поширення тепла в тривимірних конструкціях складної форми. Тому при проектуванні радіаторів використовуються різні стандартизовані конструкції радіаторів, які, на жаль, не дають змоги отримати оптимальні масогабаритні параметри. Вагомий внесок у розвиток методів проектування радіаторів внесли Дульнев, Роткоп, Спокойний.

Існуючі на теперішній час методи аналізу теплових режимів мають невелику точність та не дають можливість враховувати всі особливості фізичних процесів, що виникають при охолодженні теплонавантажених елементів. В працях Baehr, Jiji та Мартиненко наведено експериментальні дослідження процесів руху теплоносія в елементах конструкцій, результати яких можна використовувати для задач аналізу теплових режимів. Однак для задач параметричного синтезу конструкцій тепловідвідних елементів ці методики непридатні.

Для підвищення точності аналізу теплових режимів у методах параметричного синтезу можуть використовуватись засоби інженерного аналізу ANSYS або модулі систем автоматизованого проектування SolidWorks та NX, що дають можливість моделювання тривимірних теплових процесів з урахуванням руху теплоносіїв. Але ці програмні засоби не містять вузькоспеціалізованих програмних модулів для оптимізації тепловідвідних елементів.

Тому на цей час важливою задачею є розробка методів та алгоритмів автоматизованого проектування тепловідвідних елементів радіоелектронних апаратів з оптимальними масогабаритними показниками, які використовують для моделювання теплових процесів системи інженерного аналізу. Це надасть можливість на етапі проектування уникнути тривалих експериментальних

досліджень та значно покращити масогабаритні показники радіоелектронної апаратури.

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами.

Дисертаційна робота виконана в рамках науково-дослідних робіт, що виконувались на кафедрі інформаційних технологій електронних засобів Запорізького національного технічного університету.

НДР «Розробка методів врахування невизначеності параметрів елементів при проектуванні і виробництві електронних апаратів». (2006-2009, підстава для виконання: рішення Науково-технічної ради Інституту інформатики та радіоелектроніки Запорізького національного технічного університету, протокол № 2 від 06.06.06). Автором розроблено методи проектування пластинчастих радіаторів та рекомендації з вибору матеріалів.

НДР «Методи оптимізації параметрів радіоелектронних пристроїв з використанням геометричних моделей допусккових областей». (2007-2009, № держ. реєстр. 0107U000440, пріоритетний напрям відповідно до закону України «Про пріоритетні напрями розвитку науки і техніки»: «Новітні технології та ресурсозберігаючі технології в енергетиці, промисловості та агропромисловому комплексі»). Участь автора полягала в розробці моделей та методів оптимізації параметрів тепловідводів елементів радіоелектронних апаратів за критеріями оптимізації масогабаритних параметрів.

НДР «Об'єктно-орієнтовані методи проектування радіоелектронних апаратів». (2010-2012, № держреєстрації 0110U001141, пріоритетний напрям відповідно до закону України «Про пріоритетні напрями розвитку науки і техніки»: «Новітні технології та ресурсозберігаючі технології в енергетиці, промисловості та агропромисловому комплексі»). Участь автора полягала в розробці методу параметричного синтезу конструкцій ребристих, штирових та пластинчасто-ребристих радіаторів з оптимальними масогабаритними показниками та алгоритмів їх автоматизованого проектування.

НДР «Інформаційні технології проектування теплонавантажених радіоелектронних апаратів». (2013-2014, № держреєстрації 0113U001096, пріоритетний напрям відповідно до закону України «Про пріоритетні напрями розвитку науки і техніки»: «Інформаційні та комунікаційні технології»). Участь автора полягала в розробці програмного та інформаційного забезпечення для проектування тепловідвідних елементів.

Мета і задачі дослідження. Метою роботи є розробка методів та алгоритмів автоматизованого проектування радіаторів та інтегрованих тепловідвідних елементів з оптимальними масогабаритними показниками для охолодження вузлів радіоелектронних апаратів.

Для досягнення поставленої мети необхідно:

- 1) провести аналіз сучасних методів проектування тепловідвідних елементів;
- 2) провести аналіз функціональних можливостей САПР для проектування тепловідвідних елементів;

3) розробити моделі тепловідвідних елементів для оптимізації їх масогабаритних параметрів;

4) розробити метод розв'язання задач оптимізації масогабаритних параметрів тепловідвідних елементів;

5) розробити метод параметричного синтезу тепловідвідних елементів;

6) розробити алгоритми автоматизованого проектування радіаторів та інтегрованих тепловідвідних елементів;

7) розробити автоматизовану систему проектування радіаторів радіоелектронних апаратів.

Об'єктом дослідження є процес автоматизованого проектування тепловідвідних елементів радіоелектронних апаратів.

Предметом дослідження є методи та моделі для автоматизованого проектування тепловідвідних елементів.

Методи дослідження. В процесі розв'язання поставлених задач застосовувались методи багатопараметричної оптимізації та обчислювальної математики. Для моделювання теплових процесів в радіоелектронних апаратах використовувався метод скінченних об'ємів. Метод розв'язання задачі оптимізації тепловідвідних елементів розроблено із застосуванням методу множників Лагранжа.

Наукова новизна одержаних результатів.

1. Вперше розроблено метод параметричного синтезу тепловідвідних елементів, який містить процедури чисельного моделювання теплових режимів та дає можливість проводити оптимізацію масогабаритних параметрів з урахуванням конструктивних та технологічних обмежень, які виникають при проектуванні радіоелектронних апаратів.

2. Вдосконалено моделі для оптимізації параметрів тепловідвідних елементів на основі розроблених цільових функцій за критеріями мінімізації масогабаритних параметрів, які відрізняються від існуючих використанням обмежень у формі функції еліпсоїда, що дає змогу забезпечити збіжність алгоритмів оптимізації.

3. Отримав подальший розвиток метод розв'язання задач оптимізації масогабаритних параметрів тепловідвідних елементів, який, на відміну від існуючих, ґрунтується на використанні методу множників Лагранжа і дає змогу отримати співвідношення для обчислення конструктивних параметрів тепловідводів.

Практичне значення отриманих результатів.

1. Запропоновано масогабаритні критерії проектування радіаторів.

2. Розроблено алгоритми моделювання теплових процесів у тепловідвідних елементах за допомогою системи SolidWorks.

3. Розроблено алгоритми проектування радіаторів радіоелектронних апаратів з оптимальними масогабаритними показниками.

4. Розроблено програмне забезпечення для автоматизованого проектування радіаторів з оптимальними масогабаритними показниками.

Розроблені методи, алгоритми та методику впроваджено в процес проектування радіоелектронних апаратів на ТОВ НВП «Хартрон-Юком» та КП «НВК «Іскра», а також вони використовуються у навчальному процесі Запорізького національного технічного університету з дисципліни “Тепломасообмін в РЕА” напряму 6.050902 “Радіоелектронні апарати” та використовуються в дипломному проектуванні за спеціальністю 7.05090201 “Радіоелектронні апарати та засоби”.

Особистий внесок здобувача. Всі основні положення, що становлять суть дисертації, отримані здобувачем самостійно. У публікаціях, написаних у співавторстві, здобувачу належать: [1,16-18] – розроблено метод та алгоритм параметричного синтезу ребристих радіаторів; [2] – розроблено метод розв’язання задач оптимізації масогабаритних параметрів штирових радіаторів та алгоритм їх параметричного синтезу; [4,14,15,19,20] – розроблено метод розв’язання задач оптимізації масогабаритних параметрів ребристих тепловідвідних елементів; [5] – алгоритм оптимізації теплового опору оребреного каналу; [6,10,11] - запропоновано критерії проектування пластинчастих радіаторів; [7,12,13] – дослідження гофрованих тепловідвідних елементів; [8] – розроблено спосіб оптимізації розташування тепловідвідних елементів для зменшення перегріву друкованих плат в пристроях етажерної конструкції; [9,23] – розроблено алгоритм моделювання теплових процесів в оребрених каналах; [22] – розроблено спосіб оптимізації розташування тепловідвідних елементів для зменшення перегріву друкованих плат у пристроях етажерної конструкції.

Апробація результатів дисертації. Міжнародні конференції «Сучасні проблеми радіоелектроніки, телекомунікацій, комп’ютерної інженерії» TCSET’2006, TCSET’2008 та TCSET’2010 (2006р., 2008р., 2010р., м. Львів - с.м.т. Славське).

Міжнародна конференція «Досвід розробки та застосування приладотехнологічних САПР в мікроелектроніці» CADSM’2007 (2005р., м. Львів - с.м.т. Поляна).

Міжнародні науково-практичні конференції «Сучасні проблеми і досягнення в галузі радіотехніки, телекомунікацій та інформаційних технологій» (2006р., 2008р., 2010р., 2012р. м. Запоріжжя).

Міжнародні конференції «Современные информационные и электронные технологии» СИЭТ-2006, СИЭТ-2007, СИЭТ-2008 та СИЭТ-2009 (2006р., 2007р., 2008р., 2009р. м. Одеса).

Публікації. Результати дисертації опубліковано у 23 наукових працях, у тому числі 7 статей у фахових наукових виданнях [1-7], 14 публікацій у матеріалах науково-технічних конференцій [10-23], один патент [8] та одне авторське свідоцтво на твір [9].

Структура та обсяг роботи. Дисертаційна робота складається зі вступу, чотирьох розділів, висновків і списку використаних джерел (108

найменувань). Загальний обсяг роботи становить 133 сторінки, з них 111 основного тексту. Робота містить 43 рисунки та 10 таблиць.

ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ

У **вступі** наведено загальну характеристику роботи, обґрунтовано актуальність теми, сформульовано мету та визначено задачі дослідження. Розкрито наукову новизну та практичну цінність наукових результатів. Наведено відомості про особистий внесок здобувача та апробацію дисертаційної роботи.

У **першому розділі** проведено аналіз існуючих конструкцій тепловідвідних елементів для охолодження радіоелектронних апаратів. Тепловідвідні елементи можуть забезпечувати теплові режими на різних рівнях компоновки радіоелектронних апаратів: відвід тепла від електрорадіоелементів, функціональних вузлів та блоків. Тепловідвідні елементи, які використовують на цих рівнях, можуть бути виконані у вигляді як окремих деталей, так і бути інтегрованими в конструкцію. Розглянуто пластинчасті, ребристі та штирові радіатори, які використовують в умовах природного охолодження.

На рівні функціональних вузлів необхідно забезпечувати відвід тепла від корпусів потужних напівпровідникових приладів, які широко застосовуються у перетворювальній техніці і у вихідних каскадах систем управління: транзисторів, діодів та мікрозборок. Такі елементи мають обмежену допустиму температуру р-п переходів і потребують додаткового охолодження шляхом встановлення на радіатори. Розрахунок конструктивних параметрів радіаторів проводиться у кожному випадку окремо, що не дає змоги виготовляти елементи разом із радіаторами.

Розглянуто методи проектування тепловідводів з оптимальними масогабаритними параметрами. Для розрахунків конструктивних параметрів у них використовують рівняння, які не враховують всіх фізичних процесів, що відбуваються у радіаторах, а розрахунок проводиться за наближеними співвідношеннями. Тому виникає необхідність дослідження масогабаритних параметрів тепловідведення і знаходження їх оптимальних значень, які б задовольняли як умови тепловіддачі, так і умови мінімальних масогабаритів і які можна було б використовувати в методах проектування радіаторів.

Для проведення розрахунків теплових режимів РЕА обрано чисельний метод – метод скінченних об'ємів. Цей метод покладено в основу програмної системи для моделювання теплових процесів FlowSimulation, що входить до системи автоматизованого проектування SolidWorks.

У **другому розділі** запропоновано та обґрунтовано критерії оптимізації тепловідвідних елементів та проаналізовано можливість їх використання для пластини та ребристого тепловідводу. Також вдосконалено метод формування

моделей меж області працездатності у формі функції еліпсоїда для використання в задачах теплового проектування радіоелектронних апаратів. Отримав подальший розвиток метод розв'язання задач оптимізації масогабаритних параметрів тепловідвідних елементів, який ґрунтується на використанні методу множників Лагранжа.

При проектуванні пластинчатого тепловідводу його товщина обирається з умови мінімальних перепадів температури по ній. Однак, при значному збільшенні товщини пластини це призводить до невиправданого збільшення її маси. З іншого боку, мала товщина збільшує перепади температур і знижує середньоповерхневу температуру тепловідвідного елемента. Тепловий режим джерела тепла тоді забезпечується збільшенням площі радіатора. Якщо таким чином суттєво зменшувати товщину, то це може також привести до збільшення маси у цілому.

Різний внесок цих факторів зумовлює можливість застосування різних критеріїв оптимізації при проектуванні. Для пластинчастих тепловідвідних елементів можуть використовуватися критерії мінімальної маси (M - критерій), мінімальної площі (S - критерій) і масогабаритний критерій:

$$MS = m \cdot S,$$

де m і S – маса і площа тепловідвідного елемента.

Для об'ємних конструкцій тепловідвідних елементів запропоновано також використання M – критерію, а критерії S - та MS – відповідно, перетворюються до V - мінімальної об'єм та MV - комплексний масогабаритний критерій.

У задачі мінімізації маси ребристого тепловідводу запропоновано використовувати критерій оптимальності:

$$m = \rho L \sum_{i=1}^n (d_{pi} l_{pi} + d_{ri} l_{ri}) \rightarrow \min, \quad (1)$$

де ρ - щільність матеріалу тепловідводу; L - висота тепловідводу;

d_{ri}, l_{ri} і d_{pi}, l_{pi} - товщина і довжина ребер і міжреберних ділянок основи;

n - кількість ребер тепловідводу.

Оптимізаційна задача розв'язується при обмеженні:

$$R(d_{pi}, l_{pi}, d_{ri}, l_{ri}) \leq R_{дон}, \quad (2)$$

де $R(d_{pi}, l_{pi}, d_{ri}, l_{ri})$ – функціональна залежність теплового опору від конструктивних параметрів ребристого тепловідводу; $R_{дон}$ - гранично-допустимий тепловий опір тепловідводу.

Обмеження (2) визначає область працездатності. Однак, для вирішення задач проектування тепловідводів отримання аналітичних залежностей для області працездатності є складною задачею. Тому запропоновано метод формування математичної моделі апроксимації межі області працездатності. Для забезпечення збіжності алгоритмів проектування апроксимаційні моделі

меж області працездатності формуються у просторі зворотних величин параметрів. Для теплової лінії ребристого тепловідводу такі параметри можна записати у вигляді:

$$d_{pi} = \frac{1}{x_{1i}}, \quad l_{pi} = \frac{1}{x_{2i}}, \quad d_{ri} = \frac{1}{x_{3i}}, \quad l_{ri} = \frac{1}{x_{4i}}.$$

Оптимальні розміри знаходяться на межі області працездатності. Тоді обмеження (2) перетворюється до вигляду:

$$R(X) = R_{\text{дон}}. \quad (3)$$

Для однієї ділянки теплової лінії область працездатності показано на рис. 1, де Ω_W – область працездатності, B – точка оптимального рішення, x_{m1} і x_{m2} – оптимальні параметри теплової лінії, 1 – межа області працездатності, 2 – апроксимуючий еліпсоїд, 3 – дотична до вихідної функції у точці B . Запропоновано використовувати модель меж області працездатності у формі функції еліпсоїда:

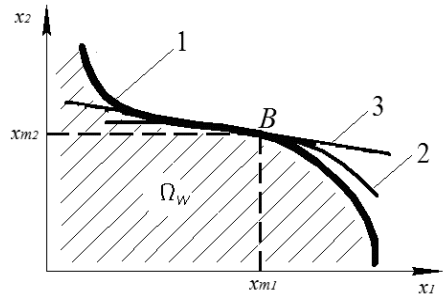


Рисунок 1 – Формування області працездатності

$$h(X) = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^k c_{ij} x_{ij}^2, \quad (4)$$

де c_{ij} – коефіцієнти моделі; $X = \{x_{ij}\}$ – множина геометричних параметрів теплової лінії; k – кількість параметрів, що оптимізуються ($k=4$).

Коефіцієнти моделі визначають з умови збігу дотичної до функції R і еліпсоїда (4). Рівняння дотичної до обмежуючої функції формується з її лінійної моделі:

$$y(X) = a_0 + \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^k a_{ij} x_{ij}, \quad (5)$$

де $a_{ij} = \left. \frac{\partial R}{\partial x_{ij}} \right|_{X_B}$ – лінійні коефіцієнти розкладання обмежуючої функції R у

ряд Тейлора; $X_B = \{x_{Bij}\}$ – множина параметрів елементів, відповідних

граничній точці області працездатності; $a_0 = R_{\text{дон}} - \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^k a_{ij} x_{ij}$.

Вираз для коефіцієнтів граничної функції R записується у вигляді:

$$c_{ij} = \frac{R_{\text{дон}}}{R_{\text{дон}} \cdot a_0} \frac{a_{ij}}{x_{Bij}}. \quad (6)$$

Тоді, для вирішення задач проектування тепловідвідних елементів мінімальної маси необхідно вирішувати задачу нелінійного програмування. Цільову функцію записуємо у вигляді:

$$f(X) = \rho L \sum_{i=1}^n \left(\frac{1}{x_{1i}} \frac{1}{x_{2i}} + \frac{1}{x_{3i}} \frac{1}{x_{4i}} \right) \rightarrow \max. \quad (7)$$

Задачу розв'язуємо при обмеженні:

$$h(X) = R_{\text{дон}}.$$

За допомогою методу множників Лагранжа задачу оптимізації масогабаритних параметрів тепловідвідних елементів зводимо до задачі безумовної оптимізації. Функцію Лагранжа записуємо у вигляді:

$$L(X, \lambda) = f(X) + \lambda h(X),$$

$$L(X, \lambda) = \sum_{i=1}^n \left(\frac{1}{x_{1i}} \frac{1}{x_{2i}} + \frac{1}{x_{3i}} \frac{1}{x_{4i}} \right) + \lambda \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^k c_{ij} x_{ij}^2, \quad (8)$$

де λ – множник Лагранжа.

Оптимальні значення параметрів тепловідводу записуємо у вигляді:

$$x_{1i} = \frac{1}{\sqrt[4]{2\lambda}} 8 \sqrt{\frac{c_{2i}}{c_{1i}^3}}, \quad x_{2i} = \frac{1}{\sqrt[4]{2\lambda}} 8 \sqrt{\frac{c_{4i}}{c_{2i}^3}}. \quad (9)$$

$$x_{3i} = \frac{1}{\sqrt[4]{2\lambda}} 8 \sqrt{\frac{c_{4i}}{c_{3i}^3}}, \quad x_{4i} = \frac{1}{\sqrt[4]{2\lambda}} 8 \sqrt{\frac{c_{3i}}{c_{4i}^3}}. \quad (10)$$

Для досягнення заданої точності розрахунків вирази (9) та (10) запропоновано використовувати в ітераційному алгоритмі.

Застосування розробленого методу розв'язання задач оптимізації масогабаритних параметрів тепловідвідних елементів з критеріями M - , V - та MV - надає можливість зменшувати їх масу, об'єм або масогабарит у кілька разів. Для цього потрібно задати цільові функції та визначити відповідні оптимальні співвідношення параметрів конструкцій.

У третьому розділі вдосконалено моделі оптимізації параметрів тепловідвідних елементів на основі розроблених цільових функцій за критеріями мінімізації масогабаритних параметрів. Розроблено метод параметричного синтезу та алгоритми проектування основних типів тепловідвідних елементів. В конструкціях тепловідвідних елементів теплові процеси мають складний характер, тому було розроблено алгоритми їх

чисельного моделювання за допомогою системи SolidWorks (модуль FlowSimulation).

Метод параметричного синтезу тепловідвідних елементів базується на використанні геометричної та теплової моделей, процедур чисельного моделювання теплових процесів та розроблених оптимізаційних співвідношеннях для різних масогабаритних критеріїв.

При побудові теплової моделі тепловідвідних елементів у системі інженерного аналізу прийнято такі припущення:

- не враховується шорсткість поверхні радіатора;
- в області контакту основи напівпровідникового приладу і радіатора задається постійний тепловий потік;
- не враховується залежність коефіцієнта теплопровідності матеріалу радіатора від температури.

Прийняті припущення значно спрощують завдання дослідження. У разі необхідності ці припущення легко враховувати в процесі моделювання. Побудовані таким чином моделі дозволяють за допомогою систем інженерного аналізу вирішити суміщену задачу теплообміну з урахуванням тривимірного розподілу температури в радіаторі.

Теплову модель ребристого радіатора показано на рис. 2, де d_r , l_r і d_p , l_p – товщини і довжини ребер і міжреберних ділянок основи, L – ширина радіатора. Ω_{VT} – область контакту основи напівпровідникового приладу і радіатора.

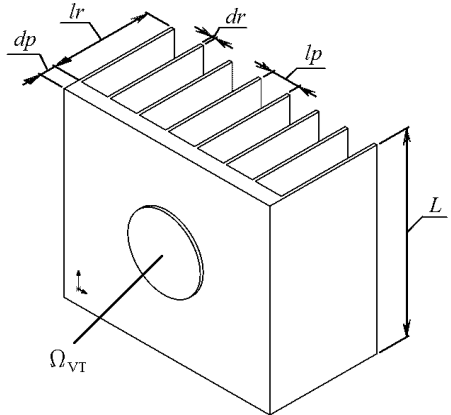


Рисунок 2 – Теплова модель ребристого радіатора

Для вирішення оптимізаційних задач необхідна математична модель залежності теплового опору радіатора від розмірів його елементів аналогічно (4). Для рівних розмірів ділянок тепловідводу та $k=5$ така модель має вигляд:

$$h(X) = \sum_{i=1}^k c_i x_i^2, \quad (11)$$

$$\text{де } c_i = \frac{R_{\text{дон}}}{R_{\text{дон}} - a_0} \frac{a_i}{x_{Bi}}.$$

Оптимізації ребристого радіатора за М - критерієм відповідає цільова функція:

$$m = \rho L[(n-1)d_p l_p + nd_r l_r + nd_p d_r] \rightarrow \min ,$$

де ρ – щільність матеріалу; n – кількість ребер радіатора.

З урахуванням обернення параметрів цільова функція набуває вигляду:

$$f(X) = \rho \frac{1}{x_5} \left(\frac{n-1}{x_1 x_2} + \frac{n}{x_3 x_4} + \frac{n}{x_1 x_3} \right) \rightarrow \max . \quad (12)$$

Розв'язок оптимізаційної задачі проводиться методом множників Лагранжа. Необхідність використання у цьому методі виразу (12) призводить до складної системи нелінійних рівнянь. Для спрощення процедури оптимізації запропоновано модель цільової функції у формі гіперболи:

$$G(X) = \sum_{i=1}^k \frac{g_i}{x_i}, \quad (13)$$

де g_i – коефіцієнти моделі.

Коефіцієнти моделі визначаються з умови тотожності дотичних гіперплощин до гіперповерхонь:

$$b_i = \left. \frac{\partial f(X)}{\partial x} \right|_{X_B}, \quad g_i = -b_i \cdot x_{Bi}^2, \quad (14)$$

де b_i – лінійні коефіцієнти розкладання функції (12) у ряд Тейлора.

Допоміжну функцію у методі множників Лагранжа для М - критерію запишемо у вигляді:

$$L(X, \lambda) = \sum_{i=1}^k \frac{g_i}{x_i} + \lambda \sum_{i=1}^k c_i x_i^2 . \quad (15)$$

У результаті мають місце рівняння виду:

$$-\frac{g_i}{x_i^2} + 2\lambda c_i x_i = 0, \quad (i = \overline{1, k}). \quad (16)$$

Розв'язок системи рівнянь (16) дає оптимальні параметри радіатора при М- критерію:

$$x_i = \left(\frac{g_i}{c_i} \right)^{1/3} \cdot \sqrt{\frac{R_{don}}{\sum_{i=1}^k (c_i \cdot g_i^2)^{1/3}}}, \quad (i = \overline{1, k}). \quad (17)$$

Оптимальні значення розмірів радіатора визначаємо в ітераційному алгоритмі:

Крок 1. – Визначення початкових розмірів радіатора (використовуємо відомі процедури вибору і розрахунку радіаторів).

Крок 2. – Обчислення теплового опору R .

Крок 3. – Визначення параметрів моделей (11) і (13).

Крок 4. – Визначення оптимальних значень розмірів елементів конструкції радіаторів з використанням виразу (17).

Крок 5. – Перевірка умови забезпечення конструктивно-технологічних обмежень; якщо для параметру умова не виконується, то йому задається граничне значення.

Крок 6. – Перевірка умови точності розрахунків:

$$\left| \frac{h(X^{(i)}) - R_{\text{don}}}{R_{\text{don}}} \right| \leq \varepsilon,$$

де ε – похибка обчислень.

Якщо ця умова не виконується, то перехід на крок 2. Інакше – кінець алгоритму. Для обчислення теплового опору R на кроці 2 запропоновано використовувати системи інженерного аналізу.

Метод можна використовувати і при параметричному синтезі інших типів радіаторів, наприклад, штирових і пластинчасто-ребристих. Особливості цих радіаторів враховують у виразах для цільових функцій. Отримано оптимальні співвідношення розмірів для цих типів радіаторів з використанням різних критеріїв проектування.

Особливість застосування запропонованого методу параметричного синтезу розглянуто нижче на прикладі ребристого радіатора з алюмінієвого сплаву АД2 з допустимим вхідним тепловим опором $R_{\text{don}}=2,73$ К/Вт для джерела тепла діаметром 28 мм. Початкові дані для розрахунків: потужність джерела тепла $P=13,3$ Вт, температура навколишнього середовища $t_c=40^\circ\text{C}$, коефіцієнт чорноти поверхні радіатора $\varepsilon=0,91$. Радіатор розташовувався в повітряному середовищі при нормальному атмосферному тиску і режимі руху теплоносія – вільна конвекція. Для знаходження початкового наближення використовувався стандартний радіатор з розмірами $d_p=5$ мм, $l_p=9$ мм, $d_r=1$ мм, $l_r=32$ мм, $L=63$ мм і масою $m=110$ г. Розглядалися М-, V- і MV- критерії.

Оптимальні розміри ребристих радіаторів за різними критеріями представлено в табл. 1.

Таблиця 1 – Розміри ребристого радіатора

Критерії	Геометричні розміри				
	d_p , мм	l_p , мм	d_r , мм	l_r , мм	L , мм
Стандартний радіатор	5	9	1	32	63
М–критерій	1.4	9.6	0.27	59.9	66.2
V–критерій	5.1	7.9	1.1	34.3	64.2
MV–критерій	1.7	10	0.35	55.7	58.7

З табл. 1 видно, що вибір критерію призводить до істотної зміни розмірів ребер і міжреберних ділянок основи. У порівнянні зі стандартним радіатором М- критерій проектування призводив до зменшення товщини основи і ребер більш, ніж в 3 рази. Одночасно збільшувалася довжина ребер і міжреберних ділянок основи. Подібним чином змінювалися розміри і при MV- критерію проектування. Розміри радіаторів у V - критерію мало відрізнялися від стандартного.

Масогабаритні показники ребристих радіаторів наведено в табл. 2.

Таблиця 2 – Параметри ребристого радіатора

Критерій	Геометричні розміри		
	m , г	V , см ³	mV , г·дм ³
Стандартний радіатор	102	165.5	16.9
М–критерій	39.7	281.5	11.2
V–критерій	106.9	162.1	17.3
MV–критерій	43.5	245.3	10.7

Найменшу масу забезпечує М - критерій проектування. У порівнянні зі стандартним, маса зменшилася у 2,5 рази. Об'єм цих радіаторів у порівнянні зі стандартним збільшився в 1,5 рази. До цих показників близькі радіатори MV - критерію проектування. Натомість V - критерій проектування незначно покращує показники стандартного радіатора. З цього виходить, що стандартні радіатори за своїми параметрами близькі до радіаторів мінімального об'єму. Застосування MV- критерію проектування незначно змінює масогабаритні параметри радіатора в порівнянні з радіатором мінімальної маси.

На основі запропонованого методу параметричного синтезу розроблено алгоритми проектування для ребристих, штирових та пластинчасто-ребристих радіаторів.

У четвертому розділі наведено опис розробленого програмного та інформаційного забезпечення системи автоматизованого проектування радіаторів з оптимальними масогабаритними показниками.

Автоматизована система проектування радіаторів радіоелектронних апаратів призначена для автоматизації процесу побудови геометричних моделей радіаторів різних типів та оптимізації їх конструкцій за різними критеріями: критерієм мінімальної маси, мінімального об'єму та комплексним критерієм.

Для розробки автоматизованої системи проектування радіаторів радіоелектронних апаратів використовувався об'єктно-орієнтована технологія проектування. Розроблено UML-модель, яка містить набір діаграм, що відображають різноманітні засоби представлення автоматизованої системи. Для визначення основних етапів процесу проектування радіаторів розроблено

діаграму діяльності. Для опису поведінки автоматизованої системи з точки зору користувача розроблено діаграму варіантів використання автоматизованої системи проектування радіаторів.

Автоматизована система складається з програмних модулів, які забезпечують функціональність системи. Структурну схему розробленої системи наведено на рис. 3. Перелік задач, що вирішуються за допомогою системи: вибір розмірів стандартних радіаторів з бази даних для заданих зовнішніх умов, параметричний синтез конструкцій різних типів радіаторів за заданим критерієм, створення геометричних тривимірних моделей конструкцій радіаторів за допомогою API SolidWorks, генерація звіту з результатами, перегляд вмісту бази даних розмірів стандартних радіаторів, зберігання даних результатів параметричного синтезу на кожній ітерації в базі даних.

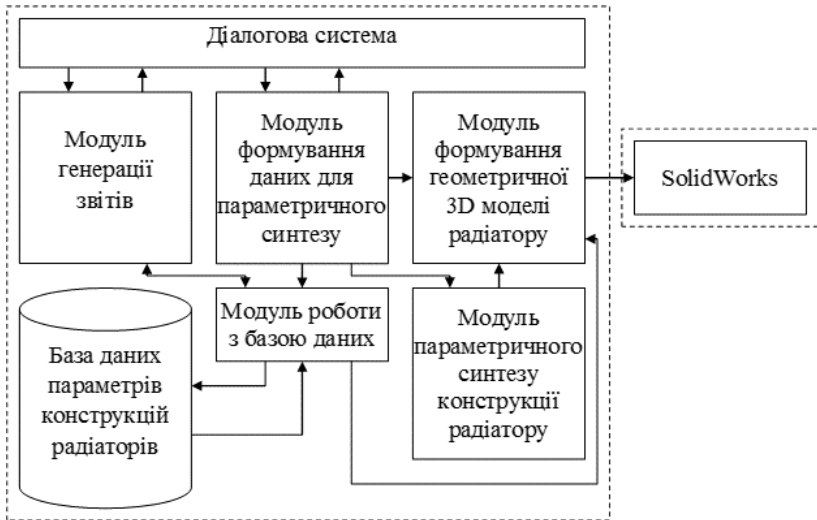


Рисунок 3 – Структурна схема автоматизованої системи

Вхідними даними для роботи системи є максимально допустима температура перегріву джерела тепла, його потужність, температура навколишнього середовища та конструктивно-технологічні обмеження. Результатами роботи системи є файл тривимірної моделі конструкції радіатора та текстові файли звітів.

За допомогою запропонованого програмного забезпечення спроектовано ребристий радіатор (рис. 4), який є несучою конструкцією блоку живлення. Тому товщина основи вибирається з умови забезпечення достатньої жорсткості і міцності. З боку основи вся конструкція блоку накривається кожухом, всередині якого утворюється вимушений потік повітря. Оребрення

обмежується за висотою, яка визначається розміром вікна для установки в шафу.

Початкові дані для проектування радіатора: матеріал радіатора алюмінієвий сплав АМг3, потужність джерела тепла $P = 192\text{Вт}$, температура навколишнього середовища $t_c = 60^\circ\text{C}$, максимально допустимий вхідний тепловий опір $R = 0.104\text{К/Вт}$, коефіцієнт чорноти поверхні радіатора $\varepsilon = 0.91$, швидкість руху повітря $v = 1.5\text{м/с}$, розміри радіатора $d_p = 6\text{мм}$, $l_p = 8\text{мм}$, $d_r = 2\text{мм}$, $l_r = 26\text{мм}$, $L = 150\text{мм}$. При проектуванні радіатора було задано обмеження за параметрами l_r , L .

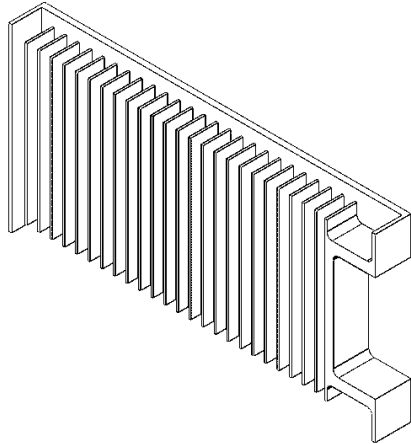


Рисунок 4 – Ребристий радіатор

Використання М – критерію оптимальності призводить до зменшення маси радіатора на 10%. Це досягається за рахунок зменшення кількості ребер та їх товщини. Результати проектування радіатора впроваджено на КП НВК «Іскра».

ОСНОВНІ РЕЗУЛЬТАТИ ТА ВИСНОВКИ

В дисертаційній роботі вирішено важливе наукове завдання вдосконалення методів та алгоритмів автоматизованого проектування радіаторів та інтегрованих тепловідвідних елементів з оптимальними масогабаритними показниками для охолодження вузлів радіоелектронних апаратів. Це дозволило уникнути тривалих експериментальних досліджень, значно покращити масогабаритні показники радіаторів та інтегрованих тепловідвідних елементів. Розроблено автоматизовану систему проектування радіаторів радіоелектронних апаратів, що дає змогу проводити проектування радіаторів з оптимальними масогабаритними параметрами.

В ході проведених досліджень отримано такі результати:

1. Проведено аналіз існуючих конструкцій тепловідвідних елементів, з яких для дослідження обрано найбільш поширені: ребристий, штировий та пластинчасто-ребристий односторонні радіатори. Для підвищення точності розрахунків було обрано модуль FlowSimulation системи автоматизованого проектування SolidWorks як найбільш зручний для проведення розрахунків.

2. Вдосконалено моделі оптимізації параметрів тепловідвідних елементів на основі розроблених цільових функцій за критеріями мінімізації масогабаритних параметрів та використання обмежень у формі функції еліпсоїда, що дає змогу забезпечити збіжність алгоритмів оптимізації.

3. Отримав подальший розвиток метод розв'язання задач оптимізації масогабаритних параметрів тепловідвідних елементів, що ґрунтується на використанні методу множників Лагранжа і дає змогу отримати співвідношення для обчислення конструктивних параметрів тепловідводів.

4. Розроблено алгоритми моделювання теплових процесів у тепловідвідних елементах за допомогою системи SolidWorks.

5. Вперше розроблено метод параметричного синтезу тепловідвідних елементів, який містить процедури чисельного моделювання теплових режимів та дає можливість проводити оптимізацію масогабаритних параметрів з урахуванням конструктивних та технологічних обмежень, які виникають при проектуванні радіоелектронних апаратів.

6. Розроблено автоматизовану систему проектування радіаторів радіоелектронних апаратів, за допомогою якої було спроектовано конструкцію ребристого радіатора з урахуванням габаритних обмежень. Використання М-критерію призвело до зменшення його маси на 10%.

За результатами дисертаційної роботи опубліковано 23 наукові праці, у тому числі 7 статей у фахових наукових виданнях, 14 публікацій у матеріалах науково-технічних конференцій, один патент та одне авторське свідоцтво на твір України.

Дисертаційна робота виконана в рамках науково-дослідних робіт, що виконувались на кафедрі інформаційних технологій електронних засобів Запорізького національного технічного університету.

Розроблені методи, методики та програмне забезпечення впроваджено в процес проектування радіоелектронних пристроїв на ТОВ НВП «Хартрон Юком» та КП «НВК «Іскра», вони також використовуються у навчальному процесі Запорізького національного технічного університету у дисципліні «Тепломасообмін в РЕА» напряму 6.050902 «Радіоелектронні апарати» та в дипломному проектуванні за спеціальністю 7.05090201 «Радіоелектронні апарати та засоби».

СПИСОК ОПУБЛІКОВАНИХ ПРАЦЬ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

1. 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.

2. Гапоненко, Н. П. Проектирование штыревых радиаторов с оптимальными массогабаритными параметрами / Н. П. Гапоненко,

М. С. Марухняк, Е.В. Огренич // Прикладная радиоэлектроника. – 2012. – Т. 11. – №1. – С. 112-115.

3. Огренич, Е. В. Проектирование пластинчато-ребристых радиаторов минимальной массы / Е. В. Огренич // Радиоэлектроника. Информатика. Управление. – 2012. – № 2. – С. 50-52.

4. Проектирование ребристых теплоотводов минимальной массы / Г. Н. Шило, Е. В. Огренич, А. В. Филобок, Н. П. Гапоненко // Радиоэлектроника. Информатика. Управление. – 2010. – №2. – С. 42-47.

5. Оптимизация ребренного канала в системах принудительного воздушного охлаждения РЕА / В. Н. Крищук, Г. Н. Шило, Н. А. Каспирович, Е. В. Огренич // Радиоэлектроника. Информатика. Управление. – 2014. – № 2. – С. 34-37.

6. Гапоненко, Н. П. Проектирование пластинчатых радиаторов с оптимальными массогабаритными параметрами / Н. П. Гапоненко, Е. В. Огренич // Радиоэлектроника. Информатика. Управление. – 2007. – № 1. – С. 22-26.

7. Гапоненко, Н. П. Проектирование гофрированных теплоотводов / Н. П. Гапоненко, Е. В. Огренич // Радиоэлектроника. Информатика. Управление. – 2007. №2. – С. 5-8.

8. Пат. 81042 Україна, МПК8 Н 05 К 7/20. Система охолодження друкованих плат в блоках радіоелектронної апаратури етажерного типу / Г. Н. Шило, Є. В. Огренич, О. В. Сиротюк, М. П. Гапоненко; заявник та патентовласник Запорізький національний технічний університет. – № u201210215; заявл. 28.08.2012; опубл. 25.06.2013, Бюл. № 12. – 3 с.

9. Свідectво про реєстрацію авторського права на твір 56326 України. Автоматизована система оптимізації конструкцій радіаторів для охолодження радіоелектронних апаратів / Є. В. Огренич, О. М. Кагітіна, А. В. Пархоменко, Г. М. Шило; заявник Запорізький національний технічний університет. – опубл. 05.09.2014. – 7 с.

10. Gaponenko, N. Strategy of flanged radiators design / N. Gaponenko, E. Ogrenich // Modern Problems of Radio Engineering, Telecommunications and Computer Science (TCSET'2006) : Proc. of the International Conf. Lviv-Slavske, 28 Feb-04 Mar 2006. – P. 554-556.

11. Гапоненко, Н. П. Исследование массогабаритных показателей теплоотводящих элементов радиаторов / Н. П. Гапоненко, Е. В. Огренич // Современные информационные и электронные технологии (СИЭТ-2006) : труды седьмой междунар. конф. – Т. 2. – Одесса, 2006. – С. 40.

12. Гапоненко, Н. П. Массогабаритные показатели гофрированных радиаторов / Н. П. Гапоненко, Е. В. Огренич // Сучасні проблеми і досягнення в галузі радіотехніки, телекомунікацій та інформаційних технологій : міжнар.

наук.-практ. конф., м. Запоріжжя, Україна, 13-15 квітня 2006р. : тези доп. – Запоріжжя : ЗНТУ, 2006. – С. 42-43.

13. Gaponenko, N. Research of thermal process in goffered heat sink / N. Gaponenko, E Ogrenich // The Experience of Designing and Application of CAD Systems in Microelectronics (CADSM'2007) : Proc. of the International Conf. Lviv-Polyana, 20-24 Feb. 2007. – P. 308-310.

14. Гапоненко, Н. П. Проектирования теплоотводящих элементов электронных аппаратов / Н. П. Гапоненко, Е. В. Огренич // Современные информационные и электронные технологии (СИЭТ-2007) : труды восьмой междунар. конф. – Т. 2. – Одесса, 2007. – С. 262.

15. Gaponenko, N. Optimization of mass and size of heat sinks with finned surfaces / N. Gaponenko, E. Ogrenich // Modern Problems of Radio Engineering, Telecommunications and Computer Science (TCSET'2008) : Proc. of the International Conf. Lviv-Slavske, 19-23 Feb. 2008. – P. 545-546.

16. Гапоненко, Н. П. Проектирование ребристых радиаторов с оптимальными массогабаритными показателями / Н. П. Гапоненко, Е. В. Огренич // Современные информационные и электронные технологии (СИЭТ-2008) : труды девятой междунар. конф. – Т. 2 – Одесса, 2008. – С. 42.

17. Шило, Г. Н. Оптимизация массогабаритных показателей радиаторов с ребристыми поверхностями / Г. Н. Шило, Е. В. Огренич, Н. П. Гапоненко // Сучасні проблеми і досягнення в галузі радіоелектроніки, телекомунікацій та інформаційних технологій : міжнар. наук.-практ. конф., м. Запоріжжя, Україна, 24-26 вересня 2008р. : тези доп. – Запоріжжя : ЗНТУ, 2008. – С. 188-190.

18. Гапоненко, Н. П. Многопараметрическая оптимизация массогабаритных показателей ребристых радиаторов / Н. П. Гапоненко, Е. В. Огренич // Современные информационные и электронные технологии (СИЭТ-2009) : труды десятой междунар. конф. – Т. 1 – Одесса, 2009. – С. 77.

19. Shilo, G. N. Design of finned heatsinks having minimum mass / G. N. Shilo, E. V. Ogrenich, N. P. Gaponenko // Modern Problems of Radio Engineering, Telecommunications and Computer Science (TCSET'2010) : Proc. of the International Conf. Lviv-Slavske, 23-27 Feb. 2010. – P. 301-302.

20. Шило, Г. М. Проектування ребристих радіаторів з оптимальними масогабаритними показниками / Г. М. Шило, Е. В. Огренич, М. П. Гапоненко // Сучасні проблеми і досягнення в галузі радіотехніки, телекомунікацій та інформаційних технологій : міжнар. наук.-практ. конф., м. Запоріжжя, Україна, 22-24 вересня 2010р. : тези доп. – Запоріжжя : ЗНТУ, 2010. – С. 76-78.

21. Огренич, Е. В. Проектування радіаторів з оптимальними масогабаритними показниками / Огренич Е. В. // Сучасні проблеми і досягнення в галузі радіотехніки, телекомунікацій та інформаційних технологій : міжнар. наук.-практ. конф., м. Запоріжжя, Україна, 19-21 вересня 2012р. : тези доп. – Запоріжжя : ЗНТУ, 2012. – С. 284-285.

22. Исследование тепловых характеристик оребренного канала при принудительном воздушном охлаждении / Г. Н. Шило, Н. А. Каспирович, Е. В. Огренич, Н. П. Гапоненко // Современные информационные и электронные технологии (СИЭТ–2013) : труды четырнадцатой междунар. конф. – Т. 2. – Одесса, 2013. – С. 44-45.

23. Кагитина, О. Н. Автоматизированная система оптимизации конструкций радиаторов для охлаждения радиоэлектронной аппаратуры / О. Н. Кагитина, А. В. Пархоменко, Г. Н. Шило, Е. В. Огренич // Сучасні проблеми і досягнення в галузі радіотехніки, телекомунікацій та інформаційних технологій : міжнар. наук.-практ. конф., м. Запоріжжя, Україна, 17-19 вересня 2014р. : тези доп. – Запоріжжя : ЗНТУ, 2014. – С. 283 – 284.

АНОТАЦІЇ

Огренич Є. В. Вдосконалення методів автоматизованого проектування тепловідвідних елементів радіоелектронних апаратів. – На правах рукопису.

Дисертація на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук за спеціальністю 05.13.12 – «Системи автоматизації проектувальних робіт». – Національний університет «Львівська політехніка» МОН України, Львів, 2016.

Дисертаційну роботу присвячено розробці методів та алгоритмів параметричного синтезу радіаторів та інтегрованих тепловідвідних елементів з оптимальними масогабаритними показниками для охолодження вузлів радіоелектронних апаратів.

У роботі розроблено метод параметричного синтезу тепловідвідних елементів, який включає процедури чисельного моделювання теплових режимів та дає можливість проводити оптимізацію масогабаритних параметрів з урахуванням конструктивних та технологічних обмежень. Вдосконалено моделі оптимізації параметрів тепловідвідних елементів на основі розроблених цільових функцій за критеріями мінімізації масогабаритних параметрів. Отримав подальший розвиток метод розв'язання задач оптимізації масогабаритних параметрів тепловідвідних елементів, який ґрунтується на використанні методу множників Лагранжа. Це дало змогу отримати співвідношення для обчислення конструктивних параметрів тепловідводів.

Розроблене програмне забезпечення дає можливість проводити проектування радіаторів з оптимальними масогабаритними параметрами. Критеріями оптимізації можуть бути критерії мінімальної маси, мінімального об'єму та їх комбінації.

Ключові слова: тепловідвідний елемент, чисельне моделювання, оптимізаційний алгоритм, параметричний синтез, радіоелектронні апарати, автоматизоване проектування.

Ogrenich E.V. Improved methods of computer-aided design of the heatsinks elements in electronic devices. – A manuscript.

Dissertation for obtaining a scientific degree of a Candidate of Technical Sciences. Specialty 05.13.12 – Computer-aided design systems. – Lviv Polytechnic National University, Lviv, 2016.

Dissertation is devoted to development of methods and algorithms for parametric synthesis heatsink integrated element with optimal parameters for cooling the radio electronic devices.

In this paper the method of parametric synthesis of a heat element is developed. This method contains procedures of numerical modeling thermal modes and allows to optimize the weight and size parameters on the basis of design and technological constraints. The models of optimization of heat sink element parameters are improved. The objective functions are suggested using the criteria of minimal weight and size parameters. The method for solving optimization problems of weight and size parameters of heat sink elements is developed. This method is contained the method of Lagrange multipliers. It is possible to obtain the relations for calculating the design parameters of heat sinks.

The developed software allows to design heatsinks with optimum weight and size parameters. The optimization criteria are minimal weight, minimal volume and their combinations.

Keywords: heatsink element, numerical simulation, optimization algorithm, parametric synthesis, radio-electronic devices, computer-aided.

Огренич Е. В. Усовершенствование методов автоматизированного проектирования теплоотводящих элементов радиоэлектронных аппаратов. – На правах рукописи.

Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 05.13.12 – «Системы автоматизации проектных работ». – Национальный университет «Львівська політехніка» МОН України, Львов, 2016.

Диссертационная работа посвящена разработке методов и алгоритмов параметрического синтеза радиаторов и интегрированных теплоотводящих элементов с оптимальными массогабаритными показателями для охлаждения узлов радиоэлектронных аппаратов.

Объектом исследования является процесс автоматизированного проектирования теплоотводящих элементов электронных аппаратов. Предметом исследования являются методы и модели для автоматизированного проектирования теплоотводящих элементов.

В работе разработан метод параметрического синтеза теплоотводящих элементов, содержащий процедуры численного моделирования тепловых

режимов, который позволяет проводить оптимизацию массогабаритных параметров с учетом конструктивных и технологических ограничений, которые возникают при проектировании радиоэлектронных аппаратов.

Предложено и обосновано критерии оптимизации теплоотводящих элементов: критерий минимальной массы (M– критерий), критерий минимального объема (V– критерий) и комплексный массогабаритный критерий (MS– критерий).

Усовершенствованы модели оптимизации параметров теплоотводящих элементов на основе разработанных целевых функций по критериям минимизации массогабаритных параметров, которые отличаются от существующих использованием ограничений в форме функции эллипсоида. Для обеспечения сходимости алгоритмов проектирования аппроксимационные модели границ области работоспособности формируются в области обратных величин.

Получил дальнейшее развитие метод решения задач оптимизации массогабаритных параметров теплоотводящих элементов, который, в отличие от существующих, основывается на использовании метода множителей Лагранжа и позволяет получить соотношения для вычисления конструктивных параметров теплоотводов. Для обобщения процесса оптимизации различных типов радиаторов предложена модель целевой функции в форме гиперболы.

На основании метода параметрического синтеза разработаны алгоритмы для автоматизированного проектирования ребристого, штыревого и пластинчато-ребристого радиаторов. Разработанное программное и информационное обеспечение дает возможность проводить проектирование радиаторов с оптимальными массогабаритными параметрами. Критериями оптимизации могут быть критерии минимальной массы, минимального объема и их комбинации. Программное обеспечение интегрируется с системой автоматизированного проектирования SolidWorks, что позволяет получать трехмерные геометрические модели оптимальных конструкций радиаторов и выполнять численное моделирование тепловых процессов.

Основные результаты работы внедрены на промышленных предприятиях для проектирования радиоэлектронных аппаратов.

Ключевые слова: теплоотводящий элемент, численное моделирование, оптимизационный алгоритм, параметрический синтез, радиоэлектронные аппараты, автоматизированное проектирование.

Підписано до друку 11.04.2016 р. формат 60x84 1/16 0,9 д.а. Тираж 100 прим. Зам. №249
69063, м. Запоріжжя, ЗНТУ, Друкарня, вул. Жуковського, 64