

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ ТА НАУКИ УКРАЇНИ
ЗАПОРІЗЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ

На правах рукопису

ОГРЕНИЧ ЄВГЕН ВІКТОРОВИЧ



УДК 621.396.6.017:004.942

ВДОСКОНАЛЕННЯ МЕТОДІВ АВТОМАТИЗОВАНОГО
ПРОЕКТУВАННЯ ТЕПЛОВІДВІДНИХ ЕЛЕМЕНТІВ
РАДІОЕЛЕКТРОННИХ АПАРАТІВ

Спеціальність 05.13.12 – Системи автоматизації проектувальних робіт

ДИСЕРТАЦІЯ

на здобуття наукового ступеня

кандидата технічних наук

*Ідентичність цього
прикріплення та імені
засвідковано*



Науковий керівник:

Шило Галина Миколаївна

кандидат технічних наук, доцент

Запоріжжя – 2016

ЗМІСТ

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ СКОРОЧЕНЬ	4
ВСТУП	5
РОЗДІЛ 1. АНАЛІЗ СУЧАСНИХ МЕТОДІВ ТА ЗАСОБІВ ПРОЕКТУВАННЯ ТЕПЛОВІДВІДНИХ ЕЛЕМЕНТІВ РАДІОЕЛЕКТРОННИХ АПАРАТІВ	11
1.1. Аналіз конструкцій тепловідвідних елементів	11
1.2. Аналіз існуючих методів проектування тепловідвідних елементів	16
1.3. Аналіз методів розрахунку теплових режимів РЕА	24
1.4. Аналіз можливостей проектування тепловідвідних елементів в сучасних САПР	27
1.5. Висновки і постановка задач дослідження	33
РОЗДІЛ 2. МЕТОДИ ТА АЛГОРИТМИ ПРОЕКТУВАННЯ ЕЛЕМЕНТІВ КОНСТРУКЦІЙ ТЕПЛОВІДВОДІВ	35
2.1. Розробка критеріїв проектування	35
2.2. Алгоритми проектування пластинчастих тепловідвідних елементів з оптимальними масогабаритними параметрами	40
2.3. Метод розв'язання задач оптимізації масогабаритних параметрів тепловідвідних елементів	45
2.4. Висновки	57
РОЗДІЛ 3. МЕТОДИ ТА АЛГОРИТМИ АВТОМАТИЗОВАНОГО ПРОЕКТУВАННЯ ТЕПЛОВІДВІДНИХ ЕЛЕМЕНТІВ РАДІОЕЛЕКТРОННИХ АПАРАТІВ	59
3.1. Алгоритм моделювання теплових процесів в тепловідвідних елементах за допомогою системи SolidWorks	59
3.2. Метод та алгоритм параметричного синтезу ребристих радіаторів	62
3.3. Алгоритм параметричного синтезу штирових радіаторів	73
3.4. Алгоритм параметричного синтезу пластинчасто-ребристих радіаторів	77
3.5. Висновки	81

РОЗДІЛ 4. АВТОМАТИЗОВАНА СИСТЕМА ПРОЕКТУВАННЯ РАДІАТОРІВ РАДІОЕЛЕКТРОННИХ АПАРАТІВ	83
4.1. Структура автоматизованої системи проектування радіаторів	83
4.2. Інформаційне забезпечення автоматизованої системи проектування радіаторів	93
4.3. Проектування радіаторів з використанням розробленого програмного забезпечення	102
4.4. Висновки	109
ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ	110
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ	112
ДОДАТКИ	124

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ СКОРОЧЕНЬ

- МСЕ – метод скінченних елементів;
- МСО – метод скінченних об'ємів;
- МСР – метод скінченних різниць;
- РЕА – радіоелектронні апарати;
- ЕРЕ – електрорадіоелемент;
- САПР – система автоматизованого проектування;
- API – application programming interface (інтерфейс прикладного програмування).

ВСТУП

Актуальність теми.

Тепловий режим теплонавантажених елементів в радіоелектронних апаратах у більшості випадків забезпечується використанням тепловідвідних елементів або примусовим охолодженням [1–3]. Обидва ці шляхи вимагають витрат матеріалів та впливають на масогабаритні показники радіоапаратури. Оптимізація конструкцій тепловідвідних елементів може значно знизити їх масу та габарити [4–7].

Одним з найбільш розповсюджених тепловідвідних елементів є радіатор. Існує велика кількість конструкцій радіаторів [8–16], що не дає змогу 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 [17–20]. Вагомий внесок у розвиток методів проектування радіаторів внесли Дульнев, Роткоп, Спокойний [21–23].

При проектуванні радіаторів використовуються різні стандартизовані конструкції радіаторів, які, на жаль, не дають змогу отримати оптимальні масогабаритні параметри. В методиках проектування зустрічаються суперечливі рекомендації, що пов'язано з недостатнім рівнем дослідження тепловідвідних елементів [24, 25].

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 [26–28]. Експериментальним дослідженням процесів руху теплоносія в елементах конструкції присвячено роботи [29, 30]. Існуючі на теперішній час методи аналізу теплових режимів мають невелику точність та не дають змогу враховувати усі особливості фізичних процесів, що виникають при охолодженні тепло навантажених елементів. Для задач синтезу ці методики

непридатні, тому з'являється необхідність в створенні ефективних методів проектування радіаторів з урахуванням масогабаритних обмежень радіоелектронних апаратів.

Для підвищення точності аналізу теплових режимів в радіоелектронних апаратах можуть використовуватись системи інженерного аналізу: SolidWorks [31–33], ANSYS [34] або NX [35], що дають можливість моделювати тривимірні теплові процеси з урахуванням руху теплоносіїв. Але ці засоби не містять вузькоспеціалізованих програмних модулів для оптимізації тепловідвідних елементів [36–41, 42–46].

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.

– 04116 «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 розроблені методи проектування пластинчастих радіаторів та рекомендації з вибору матеріалів.

– ДБ 04117 «Методи оптимізації параметрів радіоелектронних пристроїв з використанням геометричних моделей допускових 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.

– ДБ 04410 «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.

– ДБ04213 «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 елементів системи охолодження.

Мета і задачі дослідження. Метою роботи є розробка методів та алгоритмів автоматизованого проектування радіаторів і 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'єкт та предмет дослідження. 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 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 в 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 автоматизована система впроваджено в процес проектування радіоелектронних пристроїв на ТОВ НВП «Хартрон-Юком» та КП «НБК «Іскра» а також використовуються в 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», що підтверджено актами впровадження.

Особистий внесок здобувача. Всі основні положення, що становлять суть дисертації, отримані здобувачем самостійно. У публікаціях, написаних у співавторстві, здобувачу належать: [47, 48, 49] – запропоновані критерії проектування пластинчастих радіаторів; [50, 51, 52] – дослідження гофрованих тепловідвідних елементів; [53, 54, 55, 56, 57, 58] – розроблено метод розв’язання задач оптимізації масогабаритних параметрів ребристих тепловідвідних елементів; [59, 60, 61, 62] – розроблено метод та алгоритм параметричного синтезу ребристих радіаторів; [63] – розроблено метод розв’язання задач оптимізації масогабаритних параметрів штирових радіаторів та алгоритм їх параметричного синтезу; [64] – розроблено алгоритм параметричного синтезу пластинчасто-ребристого радіатора; [65, 66] – створено

програмне забезпечення для автоматизованого проектування радіаторів з оптимальними масогабаритними показниками; [67] – розроблено спосіб оптимізації розташування тепловідвідних елементів для зменшення перегріву друкованих плат в пристроях етажерної конструкції; [68, 69] – розроблено алгоритм моделювання теплових процесів в оребрених каналах.

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 приладо-технологічних 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).

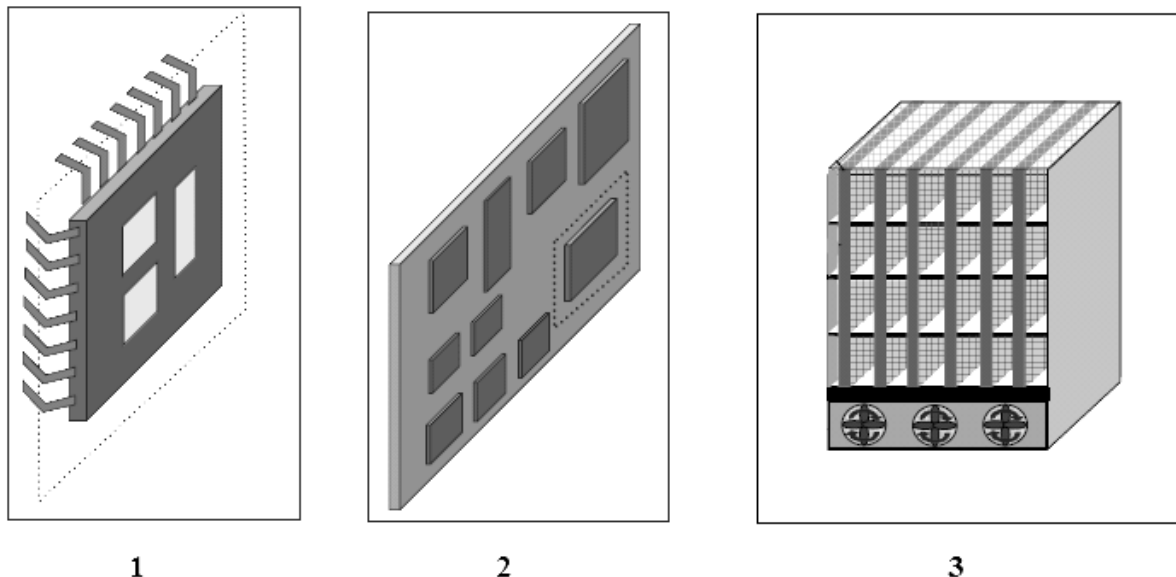
Публікації. Результати дисертації опубліковано у 23 наукових працях, у тому числі 7 статей у фахових наукових виданнях, 14 публікацій у матеріалах науково-технічних конференцій, 1 патент та 1 авторське свідоцтво на твір України.

Структура дисертації. Дисертаційна робота складається із вступу, чотирьох розділів, висновків, списку використаних джерел та додатків.

1. АНАЛІЗ СУЧАСНИХ МЕТОДІВ ТА ЗАСОБІВ ПРОЕКТУВАННЯ ТЕПЛОВІДВІДНИХ ЕЛЕМЕНТІВ РАДІОЕЛЕКТРОННИХ АПАРАТІВ

1.1. Аналіз конструкцій тепловідвідних елементів

При проектуванні сучасної радіоелектронної апаратури виникає задача забезпечення теплових режимів [3, 22, 25]. Перевищення допустимих температур на корпусах електрорадіоелементів призводить до зниження надійності та відмов РЕА. Найбільш гострою ця задача стає при мінімізації об'єму та маси радіоелектронних апаратів у зв'язку із зростанням щільності теплових потоків. Теплові режими забезпечуються на різних рівнях компоновки конструкцій радіоелектронних апаратів [21, 25] (рис. 1.1): відвід тепла від електрорадіоелементів, функціональних вузлів (друкованих плат) та блоків. Тепловідводні елементи, що використовуються на цих рівнях, можуть бути виконані як у вигляді окремих деталей, так і бути інтегрованими в конструкцію.



1 – елемент, 2 – функціональний вузол, 3 – блок

Рисунок 1.1 – Рівні компоновки конструкцій РЕА

Необхідно забезпечувати відвід тепла від корпусів потужних напівпровідникових приладів, які широко застосовуються в перетворювальній техніці і у вихідних каскадах систем управління: транзисторів, діодів та мікросборок. Такі елементи мають обмежену допустиму температуру р-п переходів [71] і потребують додаткового охолодження шляхом встановлення на радіатори. Розрахунок конструктивних параметрів радіаторів проводиться в кожному випадку окремо, що не дає змоги виготовляти елементи разом із радіаторами. Це пов'язано з тим, що напівпровідникові прилади використовуються при різних температурах навколишнього середовища, а потужність, яка розсіюється елементом на етапі експлуатації, залежить від багатьох факторів: напруги, струму, частоти та ін. [72].

Існує велика кількість конструкцій радіаторів, які використовуються для відводу тепла від радіоелектронних апаратів і напівпровідникових елементів [21, 24, 25, 73, 74], їх можна класифікувати за видом тепловідводного елемента, за видом основи, за видом розташування елементів конструкції і т.д.

Класифікація радіаторів за видом тепловідводного елемента зображена на рис. 1.2.

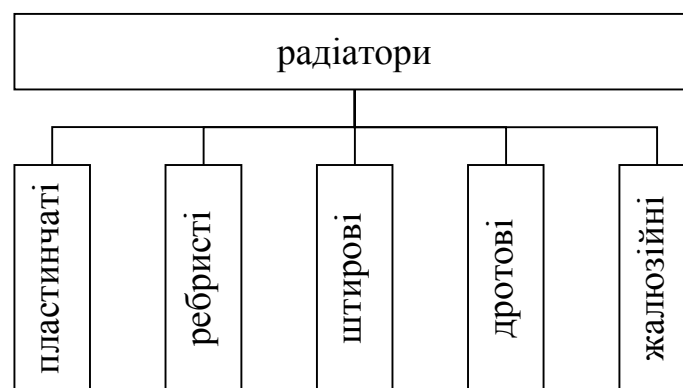
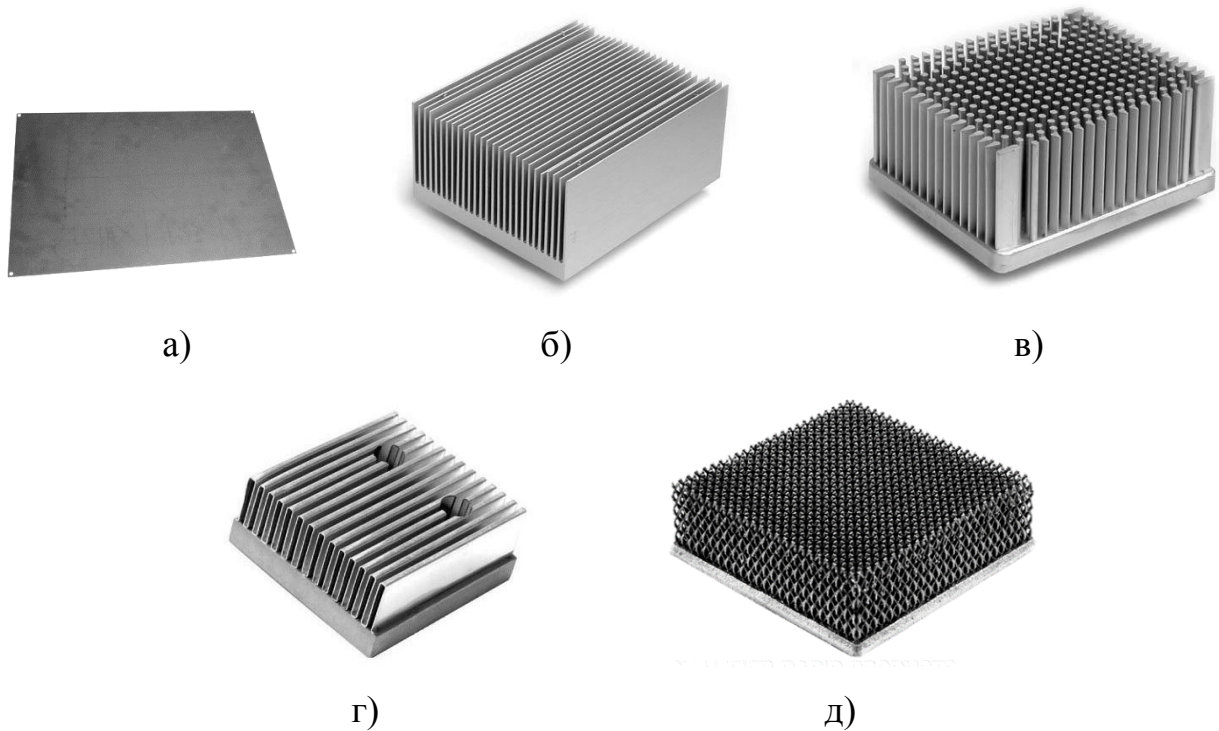


Рисунок 1.2 – Класифікація радіаторів за видом тепловідводного елемента

Конструкції радіаторів відповідно до цієї класифікації наведено на рис. 1.3, де показані основні тепловідводні елементи: 1–пластина, 2–ребро, 3–штир, 4–жалюзі, 5–дріт.



а – пластинчастий; б – ребристий; в – штировий; г – жалюзійний; д – дротовий
 Рисунок 1.3 – Конструкції радіаторів з різними тепловідводними елементами

Тип радіатора обирається виходячи з конструктивних умов, умов технологічності і типу виробництва. Найбільш простий радіатор – пластинчастий, що являє собою прямокутну або круглу металеву пластину товщиною від 1 до 8 мм (рис. 1.3, а). Пластинчасті радіатори доцільно використовувати для розсіювання невеликих потужностей [22].

У одиничному і дрібносерійному виробництві небажано виробництво штирових радіаторів, тому що вони важкі в виготовленні. Однак, вони мають меншу масу в порівнянні з ребристими. Найбільш поширеною використовуваною технологічною конструкцією радіаторів є ребристий радіатор (рис. 1.3, б).

Наведені конструкції відрізняються поверхнею тепловідводу. Жалюзійні (рис. 1.3, г) та дротові (рис. 1.3, д) радіатори мають більш розвинену поверхню тепловідводу та завдяки цьому надають можливість інтенсифікувати процеси теплообміну. Однак, вони є менш технологічними у порівнянні з

пластинчатими, ребристими та штировими і використовуються при дрібносерійному виробництві.

Порівняння радіаторів різних конструкцій слід проводити за наступними параметрами: розсіювальної потужності, віднесеної до маси радіатора, та розсіювальної потужності, віднесеної до габаритного об'єму радіатора. Необхідною умовою є порівняння радіаторів в однакових зовнішніх умовах та при оптимальних параметрах, тобто при таких співвідношеннях товщин ребра, діаметра штиря та кроку, які забезпечують максимальний тепловідвід від радіатора. Габаритні розміри радіаторів (висота радіатора, висота ребра або штиря та товщина основи) є однаковими. В цьому випадку штирові радіатори мають перевагу 30% по масі, а ребристі – 60% по об'єму, тому слід використовувати ребристі радіатори, якщо є потреба забезпечення мінімального об'єму, а штирові – якщо треба забезпечити мінімальну масу [75].

Класифікація ребристих радіаторів за видом основи і розташуванням ребер показана на рис. 1.4.

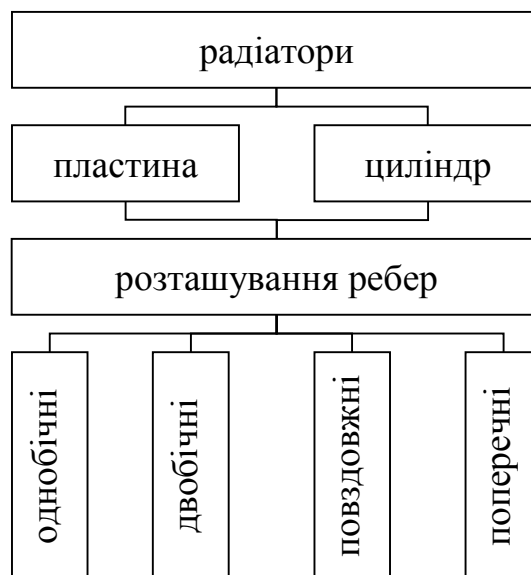
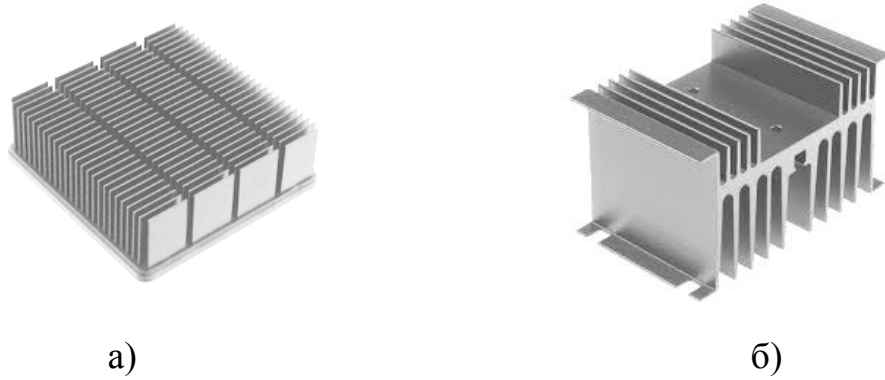


Рисунок 1.4 – Класифікація ребристих радіаторів за видом основи і розташуванню ребер

Ребристі радіатори можна класифікувати за видом основи, яка може бути пластиною або циліндром. Ребристі радіатори, в основі яких пластина, бувають з одностороннім (рис. 1.5, а) та з двостороннім ребренням (рис. 1.5, б).



а)

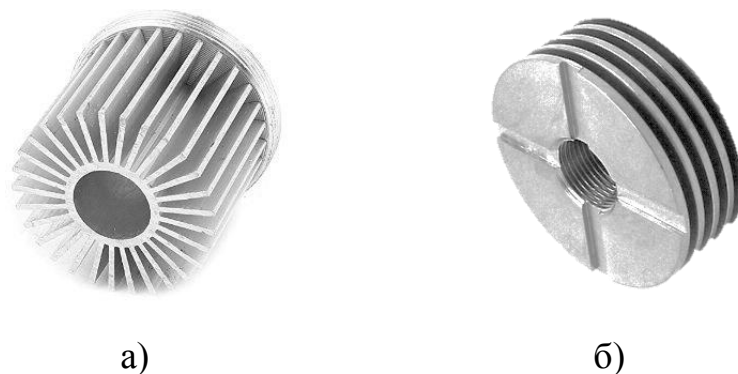
б)

а – однобічні; б – двобічні

Рисунок 1.5 – Прямокутні ребристі радіатори

Однобічні радіатори є найбільш поширеними завдяки технологічності та простоті виконання складальних операцій. Але у випадках, коли потрібно збільшити площу тепловідводу, слід використовувати двобічні радіатори.

Радіатори з циліндричною основою можуть бути як з повздовжнім (рис. 1.6, а), так і з поперечним розташуванням ребер (рис. 1.6, б). Однак такі конструкції здебільшого використовуються при примусовому охолодженні.



а)

б)

а – повздовжні ребра; б – поперечні ребра

Рисунок 1.6 – Ребристі радіатори з циліндричною основою

Таким чином, для досліджень було обрано основні тепловідводні елементи, такі як штир і ребро, та найпоширеніші типи радіаторів, такі як пластинчасті, ребристі та штирові.

Конструкції таких радіаторів є тривимірними тепловідводними елементами, від яких тепло відводиться в навколишнє середовище конвекцією та випромінюванням. Тому необхідно розглянути методи розрахунку та проектування радіаторів, якими користуються розробники РЕА.

1.2. Аналіз існуючих методів проектування тепловідвідних елементів

1.2.1. Аналіз існуючих методів проектування тепловідводів з оптимальними масогабаритними параметрами

Оптимізація тепловідводів полягає в оптимізації простих елементів конструкції: штиря, ребра та пластини. Методики оптимізації таких елементів наведені в [17–19, 23]. Запропоновані співвідношення для визначення розмірів тепловідвідних елементів дають змогу мінімізувати площу, об'єм і масу. Досліджено, що товщина оптимального ребра обернено пропорційна теплопровідності матеріалу, а висота від неї не залежить.

Оптимальні розміри ребра (S_{onm} – площа профільного перерізу, $\delta_{0,onm}$ – товщина, h_{onm} – висота) прямокутного профілю досягаються при співвідношеннях:

$$S_{onm} = \frac{0,504}{\alpha^2 \lambda} \left(\frac{Q_{L,0}}{g_0} \right)^3,$$

$$\delta_{0,onm} = \frac{0,632}{\alpha \lambda} \left(\frac{Q_{L,0}}{g_0} \right)^2,$$

$$h_{onm} = \frac{S_{onm}}{\delta_{0,onm}},$$

де $Q_{L,0}$ – тепловий потік;

α – коефіцієнт тепловіддачі;

λ – теплопровідність матеріалу;

ϑ_0 – температура поверхні ребра.

Оптимальні розміри штиря (V_{opt} – об'єм, $\delta_{0,opt}$ – діаметр, h_{opt} – висота) приймають значення:

$$\delta_{0,opt} = \frac{0,915}{\sqrt[3]{\alpha\lambda}} \left(\frac{Q_0}{\vartheta_0} \right)^{\frac{2}{3}},$$

$$V_{opt} = \frac{0,29}{\sqrt[3]{\alpha^4\lambda}} \left(\frac{Q_0}{\vartheta_0} \right)^{\frac{5}{3}},$$

$$h_{opt} = \frac{12V}{\pi\delta_{0,opt}^2}.$$

У цьому випадку, оптимальна висота штиря на відміну від ребра залежить від теплопровідності матеріалу. Оптимальні геометричні розміри штиря та ребра також залежать від коефіцієнту тепловіддачі.

Однак, задача оптимізації простих елементів конструкції за критеріями мінімізації маси, об'єму та площі була розв'язана при наступних припущеннях [23]:

- температура основи ребра та навколишнього середовища постійні;
- температурне поле тепловідводу одновимірне;
- коефіцієнт тепловіддачі по поверхні ребра постійний.

Суттєвим обмеженням у використанні цього підходу є необхідність розрахунку коефіцієнтів тепловіддачі емпіричним шляхом.

Таким чином, запропоновані методики для оптимізації тепловідводів базуються на спрощених співвідношеннях і не дають змоги проводити оптимізацію тепловідводів з необхідною точністю.

1.2.2 Оптимізація параметрів міжреберних каналів

Процес тепловіддачі в системі ребер залежить від геометричних розмірів поверхні та просторової орієнтації [1–3, 29, 30, 78–83]. Розглянуто плоский вертикальний незамкнений канал (рис. 1.7), висота і глибина якого L і h , ширина b , стінки каналу мають температуру t_w , температура навколишнього середовища t_c .

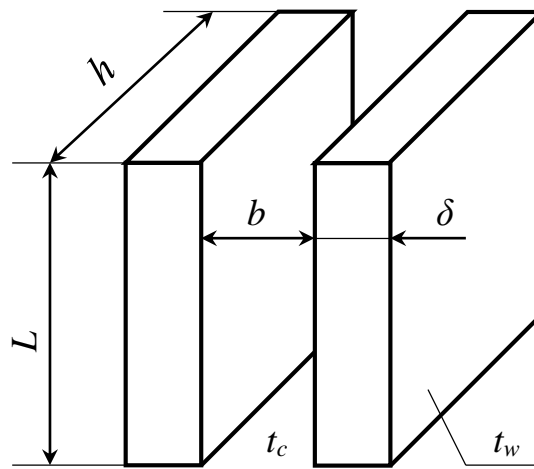


Рисунок 1.7 – Вільна конвекція у вертикальному відкритому каналі

У вертикальному каналі на інтенсивність теплообміну істотно впливають відношення b/L і значення числа Релея. При великій ширині b та глибині h і малій висоті каналу L межові шари можуть не перетинатися і процес теплообміну подібний одиночній пластині в необмеженому просторі (рис. 1.8, а) [22].

Існує критична ширина $b_{кр}$, при якій межові шари зникають в кінці каналу (рис. 1.8, б); при $b < b_{кр}$, межові шари зникають на початку каналу і протікання середовища стає стабілізованим (рис. 1.8, в).

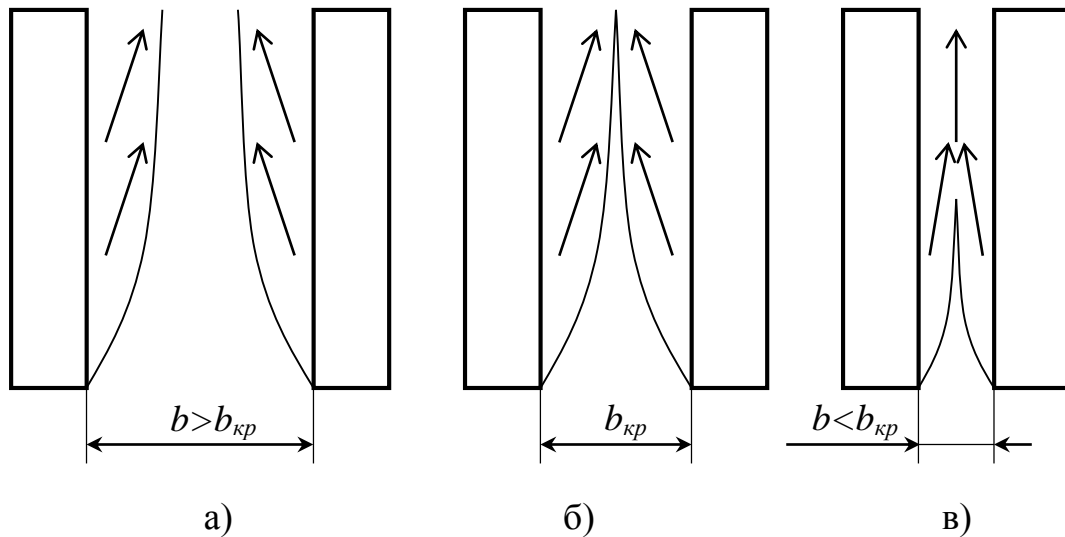


Рисунок 1.8 - Конвекція в широкому (а), середньому (б) і вузькому вертикальних каналах(в)

На ділянці каналу з стабілізованим протіканням середовища коефіцієнт тепловіддачі визначається [22]:

$$\alpha = \frac{Nu \lambda_f}{L}, \quad (1.1)$$

де $Nu = N \cdot c \cdot Ra^n$ – число Нуссельта для середньої температури між стінкою і навколишнім середовищем;

λ_f – коефіцієнт теплопровідності повітря при середній температурі;

L – визначальний розмір, що дорівнює висоті пластини;

N – коефіцієнт, що враховує орієнтацію пластини;

Ra – число Релея $Ra = Gr \cdot Pr$.

c та n – емпіричні коефіцієнти, які залежать від числа Релея;

Gr , Pr – числа Грасгофа і Прандтля;

Значення чисел Нуссельта, Грасгофа і Прандтля обчислюються для середньої температури $t = (t_w - t_c)/2$.

$$Gr = \beta g \frac{L^3}{\nu^2} (t - t_c),$$

$$Pr = \frac{\nu \rho c_p}{\lambda_f},$$

де β – коефіцієнт термічного розширення повітря;

g – прискорення вільного падіння;

ν – динамічна в'язкість повітря;

c_p – питома теплоємність повітря;

ρ – щільність повітря;

t_w – температура стінки;

t_c – температура навколишнього середовища.

Для плоского вертикального незамкнутого каналу (рис. 1.7) з ізотермічними стінками коефіцієнт тепловіддачі визначається за формулою [23]:

$$\alpha = \frac{1}{24} \frac{\lambda_f}{L} \frac{b}{L} Ra \left[1 - e^{-35 \cdot \left(\frac{b}{L} Ra \right)^{-1}} \right]^{\frac{3}{4}}. \quad (1.2)$$

Оптимальна відстань між вертикальними паралельними пластинами b_{opt} , при якому переданий потік максимальний, визначається зі співвідношення:

$$\frac{b}{L} Ra = 46.$$

Коефіцієнт тепловіддачі в системі ребер з вертикальною основою (рис. 1.3, б) визначається за формулою [23]:

$$\alpha = 0,112 \cdot \frac{\lambda_f}{L} \left[\left(\frac{b}{L} Ra \right)^{0,534} \left(1 - e^{-129 \cdot \left(\frac{b}{L} Ra \right)^{-1}} \right) \right]^{0,284}. \quad (1.3)$$

Розглянуті особливості процесів теплопередачі в міжреберних каналах показують, що процес теплопередачі залежить від конструктивних параметрів тепловідвідних елементів.

В літературі [23, 26–28] наведено методики, які дають змогу визначати оптимальні відстані між вертикальними паралельними пластинами в ребристих радіаторах, що охолоджуються вільною конвекцією. В цих наукових працях запропоновано співвідношення для оптимальної відстані між ребрами. Однак, в наведених методиках обчислюються тільки три параметри: відстань між ребрами, висота ребра та висота радіатора. Залежності цих параметрів від теплофізичних властивостей матеріалів, розсіювальної потужності та температури навколишнього середовища є досить складними та наведені у неявному вигляді. Тому в даних методиках визначення параметрів відбувається за допомогою графічного представлення і не дає змоги врахувати одночасно усі геометричні розміри тепловідвідних елементів та досягти необхідної точності при їх проектуванні.

Таким чином, аналіз літературних джерел показав, що можливо проводити оптимізацію параметрів міжреберних каналів за критерієм максимальної потужності, що розсіюється. Однак, запропоновані методики базуються на емпірично отриманих графічних залежностях і мають значну похибку. Тому виникає необхідність дослідження впливу усіх геометричних розмірів тепловідвідних елементів на тепловий режим радіоелектронних апаратів і розв'язку задачі оптимізації їх масогабаритних параметрів.

1.2.3. Аналіз існуючих методів проектування радіаторів

Аналіз методів проектування пластинчастих, ребристих та штирових радіаторів [75], які використовуються на підприємствах, показав, що вибір конструктивних розмірів проводиться графічним способом з використанням емпіричних поправочних коефіцієнтів за алгоритмом:

Крок 1. Обирається висота радіатора з конструктивних вимог технічного завдання.

Крок 2. Обирається висота ребра(штиря) за таблицею стандартних типорозмірів.

Крок 3. Визначається ефективний коефіцієнт тепловіддачі за графіком.

Крок 4. Розраховується тепловий опір та площа основи радіатора.

Крок 5. Обирається довжина радіатора з конструктивних вимог.

Крок 6. Визначається поправочний коефіцієнт довжини та нерівномірність температурного поля радіатора за графіком.

Крок 7. Повторюється крок 4 та визначається остаточна довжина радіатора.

Такий алгоритм дає змогу вибрати з типових конструкцій радіатор, який забезпечить заданий тепловий режим, однак його розміри не будуть оптимальними за критеріями мінімальної маси, об'єму або масогабариту.

Для проектування ребристих радіаторів мінімальної маси існують розрахункові співвідношення [19], які враховують нерівномірність температури в основі радіатора та умови теплообміну по довжині ребра. Конструктивні параметри таких радіаторів обчислюються за формулами:

$$\begin{aligned}
l_p &= d_r \frac{1 + \sqrt{1 + 4 \frac{Z_0}{D}}}{2 \frac{Z_0}{D}}, & l_r &= h_0 \sqrt{\frac{\lambda l_p d_r}{\lambda_g Nu}}, \\
L &= \frac{P(d_r + l_p)}{2 t_0 \lambda d_r} B_0, & B &= L_0 \sqrt{\frac{\lambda l_p d_r}{\lambda_g Nu}}, \\
d_p &= \delta_0 \frac{d_r}{d_r + l_p} \sqrt{\frac{\lambda l_p d_r}{\lambda_g Nu}},
\end{aligned} \tag{1.4}$$

де l_r, L, d_r, d_p, l_p – висота, довжина і товщина ребра, товщина основи і ширина каналу;

δ_0, h_0, L_0, B_0 – емпіричні коефіцієнти;

P – розсіювальна потужність;

B – ширина оребреної поверхні;

D – діаметр посадкового місця напівпровідникового приладу;

t_0 – перегрів повітря на вході радіатора відносно температури його основи.

Співвідношення (1.4) використовуються в методі проектування ребристих радіаторів мінімальної маси [17]. Застосування цього методу показало, що товщина ребра $d_r \rightarrow 0$, а це технологічно неможливо. Тому виникає необхідність аналізу декількох варіантів конструкцій для різних товщин ребер і вибору найкращого варіанту. Також не враховуються втрати енергії на вході і на виході повітря з каналів, що приводить до похибок розрахунків.

В методі мінімізації об'єму ребристих радіаторів [18] для визначення конструктивних розмірів застосовуються співвідношення:

$$\begin{aligned}
 l_p &= 1,685 \sqrt{\frac{P}{t_0 \lambda} \sqrt{\frac{v \lambda_g Nu}{c \Delta p}}}, \\
 l_r &= 2,11 \sqrt{\frac{P}{t_0 \lambda_g Nu} \sqrt{\frac{v \lambda_g Nu}{c \Delta p}}}, \\
 L &= 1,025 \frac{P}{t_0 \lambda}, \quad B = 2,275 l_r, \quad d_p = 1,044 l_r,
 \end{aligned}
 \tag{1.5}$$

P – потужність, що відводиться через основу радіатора;

Δp – аеродинамічний опір радіатора.

В співвідношеннях (1.4) та (1.5) використовується критерій Нуссельта Nu , в якому коефіцієнт тепловіддачі розраховується наближено, що не дає змоги досягти потрібної точності при автоматизованому проектуванні.

Таким чином, в існуючих методах мінімізації маси та об'єму ребристих радіаторів використовуються співвідношення, які не враховують всіх фізичних процесів, що відбуваються в конструкціях радіаторів, а розрахунок проводиться за наближеними співвідношеннями.

1.3. Аналіз методів розрахунку теплових режимів РЕА

З фізичної точки зору процеси перенесення тепла в радіоелектронній апаратурі є добре вивченими і можуть бути описані математично. Певна невизначеність існує при формулюванні граничних умов рівнянь тепловіддачі, але експериментальні дослідження показали, що існуючий підхід відповідає вимогам задач, що виникають при розрахунках теплових режимів радіоелектронної апаратури [3, 95–102].

Разом з тим насиченість внутрішнього простору електронних пристроїв як активними, так і пасивними елементами, нерегулярність їх розташування робить задачу повного математичного опису процесів перенесення тепла практично неможливою. Найбільшу складність буде завдавати рівняння руху газового середовища в каналах закритих та напівзакритих, що утворюються

елементами апарата. Але практика створення електронної апаратури свідчить про те, що немає практичної потреби абсолютно точного визначення температури всіх елементів на підставі повної математичної моделі, оскільки більшість з них витримує підвищення температури значно більше, ніж те, яке реально утворюється в апараті. Тому необхідно зосередитись на визначенні температур окремих елементів, критичних щодо підвищення температури. Задача ця є також непростю, бо для повного розв'язання рівнянь теплопровідності необхідне знання відповідних властивостей елементів, матеріалів. Останні можуть бути визначені наближено, оскільки вони мають певне відхилення внаслідок технологічних причин при масовому виготовленні елементів. Нечітко визначені також величини термічного опору в точках теплового контакту. В таких умовах знову ж таки є недоцільним і практично неможливим створення повної математичної моделі апарата. Геометричні форми деяких елементів апаратів не дають змогу скористатись під час розрахунків результатами аналітичних розв'язків задач стаціонарної та нестаціонарної теплопровідності. В таких випадках залишається використовувати числові методи розв'язку диференціальних рівнянь.

Числові методи дають можливість не тільки обчислювати певні параметри, а охопити задачу в цілому, переростаючи в обчислювальний експеримент. Незважаючи на достатню вивченість процесів теплообміну та рівнянь, що їх описують, обчислювальний експеримент має наближений характер, оскільки на кожному його етапі вносяться похибки. Наприклад, для задач теплопровідності ступені чорноти відомі з точністю, в найкращому випадку, 1-2%, а тепловіддачі – 10-15%.

Для вирішення задач гідродинаміки та теплообміну в радіоелектронних апаратах можуть бути застосовані метод скінченних різниць (МСР), метод скінченних об'ємів (МСО), метод скінченних елементів (МСЕ) і метод контрольних об'ємів [84–88].

Метод скінченних різниць оснований на апроксимації похідних в їх дискретними (різницевиими) аналогами. Безперечними перевагами МСР є

висока ефективність і простота реалізації, а також наочність процедури дискретизації, що дає можливість побудови схем високого порядку точності. Однак ці переваги реалізуються лише при використанні регулярної (структурованої) сітки – майже ортогональної і з плавно змінливими розмірами комірок. Як наслідок, переважна більшість додатків МСР обмежена випадками порівняно простих з геометрії розрахункових областей.

Для рішення проблеми моделювання течій в областях складної геометрії став широко застосовуватися метод скінченних об'ємів. Відправною точкою МСО є інтегральне формулювання законів збереження маси, імпульсу, енергії та ін. Балансові співвідношення записуються для невеликого контрольного об'єму; їх дискретний аналог виходить підсумовуванням по всіх гранях виділеного об'єму потоків маси, імпульсу та ін., обчислених з деяких квадратурних формул. Оскільки інтегральне формулювання законів збереження не накладає обмежень на форму контрольного об'єму, МСО придатний для дискретизації рівнянь гідродинаміки та теплообміну як на структурованих, так і на неструктурованих сітках з різною формою комірок, що повністю вирішує проблему складної геометрії розрахункової області.

Подібний підхід використовується у методі контрольного об'єму. В цьому методі розрахункову область розбивають на деяке число непересічних контрольних об'ємів таким чином, що кожна вузлова точка міститься в одному контрольному об'ємі [84]. Диференціальне рівняння інтегрують по кожному контрольному об'єму. Для обчислення інтегралів використовують кускові профілі, які описують зміну функції між вузловими точками. В результаті знаходять дискретний аналог диференціального рівняння, в який входять значення функції в декількох вузлових точках.

Отриманий подібним чином дискретний аналог виражає закон збереження функції для кінцевого контрольного об'єму точно так само, як диференціальне рівняння виражає закон збереження для нескінченно малого контрольного об'єму. Одним з важливих властивостей методу контрольного об'єму є те, що в ньому закладено точне інтегральне збереження таких величин,

як маса, кількість руху і енергія на будь-якій групі контрольних об'ємів і, отже, на всій розрахунковій області. Ця властивість проявляється при будь-якому числі вузлових точок, а не тільки в граничному випадку дуже великого їх числа. Таким чином, навіть рішення на грубій сітці задовольняє точним інтегральним балансам. Результат розв'язку дискретних рівнянь визначається у вигляді значень тільки у вузлових точках. Інтерполяційні формули функції розглядаються як допоміжні, необхідні для розрахунку інтегралів. Після отримання дискретних аналогів припущення про характер профілів можна не враховувати. Така точка зору дає повну свободу використання різних профілів для інтегрування різних членів диференціального рівняння.

Таким чином, методи скінченних та контрольних об'ємів надають можливість отримати розв'язки задач гідродинаміки та теплообміну з меншою похибкою та дають змогу враховувати особливості складної геометрії тепловідвідних елементів у порівнянні з методами скінченних різниць та скінченних елементів. Це підтверджується тенденціями сучасного ринку програмного забезпечення. Досить зауважити, що МСО використовується в таких всесвітньо відомих гідродинамічних пакетах, як ANSYS FLUENT, ANSYS CFX, NX Thermal/Flow, SolidWorks FlowSimulation, COMSOL Multiphysics, FEMAP та інші.

1.4. Аналіз можливостей проектування тепловідвідних елементів в сучасних САПР

Теплові процеси, які протікають в радіоелектронних апаратах, можуть бути з достатньою точністю змодельовані в універсальних системах інженерного аналізу або в вузькоспеціалізованих системах проектування радіоелектронної апаратури. Тому для проектування тепловідвідних елементів радіоелектронних апаратів розглянуті найбільш поширені системи інженерного аналізу та модулі САПР для теплових розрахунків, такі як ANSYS (модулі

FLUENT та CFX), SolidWorks (модуль FlowSimulation), NX (модулі Thermal/Flow та Electronic System Cooling) та COMSOL (модуль Heat transfer).

Основою теплового аналізу в ANSYS є рівняння теплового балансу, отримане відповідно до принципу збереження енергії. За допомогою ANSYS задача розв'язується методом скінченних елементів, розв'язкою є поле температури. Потім ANSYS використовує температурне поле для визначення інших теплових параметрів. ANSYS підтримує основні види теплопередачі: теплопровідність, конвекцію і випромінювання [34].

ANSYS підтримує два види теплового аналізу:

- стаціонарний тепловий аналіз визначає розподіл температури та інших теплових параметрів при незмінних граничних умовах. Під незмінними граничними умовами мається на увазі ситуація, за якої зміна теплових параметрів системи в часі значно мала;

- нестаціонарний тепловий аналіз визначає розподіл температури та інших теплових параметрів при змінних в часі умовах.

Стаціонарний тепловий аналіз також може бути лінійним, з постійними властивостями матеріалів; або нелінійним, з властивостями матеріалів, залежними від температури. Теплові властивості більшості матеріалів насправді залежать від температури, тому зазвичай тепловий аналіз нелінійний. Включення ефектів випромінювання також робить аналіз нелінійним.

Нестаціонарний тепловий аналіз визначає температури і інші теплові параметри, що змінюються в часі. Зазвичай вирішувачі використовують розраховані за допомогою нестаціонарного теплового аналізу значення температури в якості вихідних даних для структурного аналізу. Багато задач теплообміну вимагають нестаціонарного рішення.

В складі програмного комплексу SolidWorks для теплового аналізу використовується модуль FlowSimulation. Цей модуль базується на останніх досягненнях обчислювальної газо- та гідродинаміки і дає змогу розраховувати широке коло різних напрямків: двовимірні і тривимірні, ламінарні, турбулентні та перехідні, нестискувані, стискувані, з до-, транс- і надзвуковими областями,

стаціонарні та нестаціонарні течії багатокомпонентних текучих середовищ в каналах та / або навколо тіл, з урахуванням гравітації, межового шару, в тому числі з урахуванням шорсткості стінок, з теплообміном між текучим середовищем і твердим тілом, яке, в свою чергу, може складатися з декількох матеріалів; з розрахунком теплопередачі в твердих тілах, тобто з розв'язанням задачі сполученого теплообміну, в тому числі з урахуванням радіаційного теплообміну між поверхнями; перебігу через пористі середовища як через розосереджені опору; ламінарні течії неньютонівських рідин; перебігу стискуваних рідин; двофазні течії як рух рідких або твердих частинок в потоці текучого середовища [31–33].

FlowSimulation рух і теплообмін текучого середовища моделюється за допомогою рівнянь Нав'є-Стокса. Цими рівняннями моделюються турбулентні, ламінарні та перехідні течії. Для моделювання турбулентних течій згадані рівняння Нав'є-Стокса осереднюються по Рейнольдсу, тобто використовується осереднений за малим масштабом часу вплив турбулентності на параметри потоку, а великомасштабні тимчасові зміни осереднених за малим масштабом часу складових газодинамічних параметрів потоку враховуються введенням відповідних похідних за часом. В результаті рівняння мають додаткові члени – напруги по Рейнольдсу, а для замикання цієї системи рівнянь в FlowSimulation використовуються рівняння переносу кінетичної енергії турбулентності і її дисипації в рамках k - ϵ моделі турбулентності.

Для знаходження чисельного розв'язку задачі безперервна нестаціонарна математична модель фізичних процесів, використовувана в FlowSimulation, дискретизується як за простором, так і у часі.

Щоб виконати дискретизацію у просторі, вся розрахункова область покривається розрахунковою сіткою, грані комірок якої паралельні координатним площинам використовуваної в розрахунку декартової глобальної системи координат моделі в SolidWorks. Оскільки в FlowSimulation використовується метод скінченних об'ємів, значення незалежних змінних розраховуються в центрах комірок, а не у вузлах розрахункової сітки, то

використовувана FlowSimulation розрахункова сітка описується її комірками, а не вузлами, як в методах скінченних різниць.

Відповідно, комірки розрахункової сітки мають форму паралелепіпедів, Область, в якій ця сітка будується, також має одноманітну для всіх завдань форму паралелепіпеда.

Система інженерного аналізу в САПР NX представляє з себе модуль NX AdvancedSimulation, що складається з пре- / постпроцесора NX Advanced FEM, і підключається до інтерфейсу розрахункових вирішувачей. В якості розрахункових (CAE) модулів виділяють NX Thermal для розв'язання теплових задач і NX Flow для розв'язання задач гідродинаміки. NX Thermal / NX AdvancedThermal – спеціалізований розрахунковий модуль, заснований на розробленому компанією MAYA НТТ, сімейства NX AdvancedSimulation, призначений для розв'язання широкого кола теплових задач. При рішенні можуть бути враховані всі механізми теплообміну: теплопровідність, випромінювання, конвекція. Особливістю вирішувача є наявність інструментів створення так званих теплових зв'язків – спрощених методик опису тих чи інших теплових процесів. Версія NX AdvancedThermal є розширенням модуля NX Thermal і містить додаткові інструменти і можливості (паралельні обчислення, користувальницьке програмування, розширені термооптичні властивості матеріалів та ін.).

NX Flow / NX AdvancedFlow – спеціалізований модуль для чисельного моделювання процесів гідродинаміки та теплообміну на основі рішення рівнянь Нав'є-Стокса в стаціонарній і нестаціонарній постановках, що базується на рішенні TMG-Flow компанії MAYA НТТ. NX Flow / NX AdvancedFlow дає змогу врахувати широке коло фізичних процесів: стисливість, турбулентність, масові сили, теплообмін, багатофазна течія. Для моделювання турбулентних течій є такі моделі: фіксованої в'язкості, шляхи змішання, k-ε, k-ω, SST, LES. Даний модуль може працювати як зі стандартним для всіх NX CAE сітковим будівником, так і зі спеціалізованим рішенням, адаптованим до завдань

обчислювальної газодинаміки. Для прискорення обчислень реалізовані алгоритми паралельної обробки завдань [35].

COMSOL Multiphysics – універсальна програмна платформа для комп’ютерного моделювання фізичних завдань [106]. У пакеті COMSOL Multiphysics є інструменти автоматичної і напівавтоматичної побудови сіток, включаючи вільну побудову сітки з тетраедрів та вигнутою сітки. COMSOL Multiphysics відокремлює геометричну форму скінченних елементів (в тривимірному просторі: тетраедр, призма, шестигранник, піраміда) від «функцій форми скінченних елементів». Так забезпечується максимальна гнучкість, при цьому кожна геометрична форма підтримує функції форми першого, другого, третього і, в деяких випадках, більш високого порядку, що відповідає традиційним лінійним, квадратним або кубічним скінченним елементам. У багатьох фізичних інтерфейсах використовуються скінченні елементи Лагранжа, які також називаються ізопараметричними побудованими на вузлах скінченними елементами. Це інтерфейси теплообміну, механіки конструкцій, електростатики та інші. У обчислювальній гідродинаміці також використовуються спеціалізовані елементи і схеми числової стабілізації. Для описування векторними полями електромагнітних явищ використовуються криволінійні елементи і скорочені елементи високого порядку, звані також крайовими або векторними елементами.

COMSOL Multiphysics будує і вирішує моделі, використовуючи новітні методи чисельного аналізу. У додаткових модулях використовуються кілька різних методів, включаючи метод скінченних елементів, метод скінченних об’ємів, метод граничних елементів і методи трасування частинок, проте основний наголос в COMSOL Multiphysics зроблено на метод скінченних елементів. Є різні типи скінченних елементів, а пов’язані елементи автоматично створюються програмним забезпеченням під час рішення.

В табл.1.1 наведено порівняльний аналіз можливостей систем інженерного аналізу для моделювання теплових процесів в тепловідвідних елементах за критеріями: методи дискретизації, тип сітки, зручність побудови

моделей та їх імпорт, розробка програм для оптимізації параметрів, зручність побудови теплових моделей та сіток, наявність API.

Таблиця 1.1 – Порівняльний аналіз систем інженерного аналізу

Критерії	Системи інженерного аналізу			
	SolidWorks FlowSimulation	NX Thermal/Flow	ANSYS CFX	ANSYS FLUENT
Метод дискретизації	MCO	MCO	MCO/MCE	MCO
Тип сітки	CutCell	Tetra, Hexa	CutCell, Tetra, Hexa, Prism	Tetra, Hexa, PolyHedra
Побудова геометричних моделей	+	+	+	+
Імпорт геометричних моделей	+	+	+	+
Розробка програм для оптимізації параметрів	–	–	+	+
Наявність API	+	+	+	+

Таким чином, система автоматизованого проектування SolidWorks дає змогу здійснювати побудову геометрії як з використанням власних інструментів, так і передавати геометрію з інших САПР систем. У складі САПР SolidWorks є модуль FlowSimulation, який використовується для розв'язку задач тепло- і масообміну та базується на методі скінченних об'ємів. Цей модуль дає змогу з необхідною точністю провести моделювання теплових процесів в тепловідвідних елементах. Він не має можливостей для оптимізації геометричних параметрів, однак містить інструменти для програмного інтерфейсу (API) із зовнішніми програмами, тому є зручним для автоматизованого проектування тепловідвідних елементів.

1.5. Висновки і постановка задач дослідження

Дослідження задач теплового проектування радіоелектронних апаратів, аналіз найпоширеніших конструкцій, методів проектування тепловідвідних елементів та систем інженерного аналізу для моделювання теплових процесів в РЕА показали, що:

1. Використання тепловідвідних елементів на різних рівнях компоновки конструкцій радіоелектронних апаратів надає можливість забезпечити їх теплові режими. Найпоширенішими конструкціями тепловідвідних елементів радіоелектронних апаратів є пластинчасті, ребристі та штирові.

2. Оптимізація конструкцій тепловідвідних елементів може значно знизити масу та габарити радіоелектронних апаратів.

3. В існуючих методах мінімізації маси та об'єму радіаторів використовуються співвідношення, які не враховують всіх фізичних процесів, що відбуваються в конструкціях радіаторів, а розрахунок проводиться за наближеними співвідношеннями.

4. Метод скінченних об'ємів надає можливість отримати розв'язки задач гідродинаміки та теплообміну з достатньою точністю та враховує особливості складної геометрії тепловідвідних елементів.

5. В сучасних системах автоматизованого проектування не реалізовані процедури проектування тепловідвідних елементів.

6. Система автоматизованого проектування SolidWorks з модулем FlowSimulation дає змогу моделювати теплові процеси в тепловідвідних елементах методом скінченних об'ємів та містить інструменти для програмного інтерфейсу (API) із зовнішніми програмами і є зручною для автоматизованого проектування тепловідвідних елементів.

Це дозволяє сформулювати *мету роботи* у вигляді: розробка методів та алгоритмів автоматизованого проектування радіаторів і інтегрованих тепловідвідних елементів з оптимальними масогабаритними показниками для охолодження вузлів радіоелектронних апаратів.

Для досягнення поставленої мети необхідно вирішити *задачі*:

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.

2. МЕТОДИ ТА АЛГОРИТМИ ПРОЕКТУВАННЯ ЕЛЕМЕНТІВ КОНСТРУКЦІЙ ТЕПЛОВІДВОДІВ

2.1. Розробка критеріїв проектування

Задача проектування тепловідвідних елементів не має однозначного розв'язку. Конструктивні вимоги до радіоапаратури потребують оптимізації параметрів тепловідвідних елементів. Особливо актуальною є оптимізація масогабаритних параметрів бортової радіоелектронної апаратури [103, 104]. У зв'язку з цим при проектуванні таких класів апаратури можна розглядати різні критерії оптимальності: мінімізація маси, об'єму та комплексний критерій масогабариту.

В найпростішому випадку в радіоелектронній апаратурі використовуються пластинчасті тепловідводні елементи. Вони є технологічними та застосовуються при потужностях розсіювання не більше 5 Вт. Однак, незважаючи на простоту конструкції, властивості таких тепловідвідних елементів досліджені недостатньо.

Зазвичай товщина пластини 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 тепловідводного елемента. Тепловий режим джерела тепла тоді забезпечується збільшенням площі радіатора. Якщо зменшення товщини значне, то це може також привести до збільшення маси.

Різний внесок цих факторів обумовлює можливість застосування різних критеріїв при проектуванні. Для пластинчастих тепловідвідних елементів можуть використовуватися критерії проектування: мінімальної маси (M-критерій), мінімальної площі (S-критерій) та масогабаритний (MS-критерій) [47–52]:

$$MS = m \cdot S, \quad (2.1)$$

де m та S – маса і площа тепловідводного елемента.

Геометрична модель найпростішого пластинчастого тепловідводу зображена на рис. 2.1, де 1 – область джерела тепла; 2 – область тепловідведення, r_1 – радіус площини контакту з елементом, r_2 – радіус пластини, δ – товщина пластини.

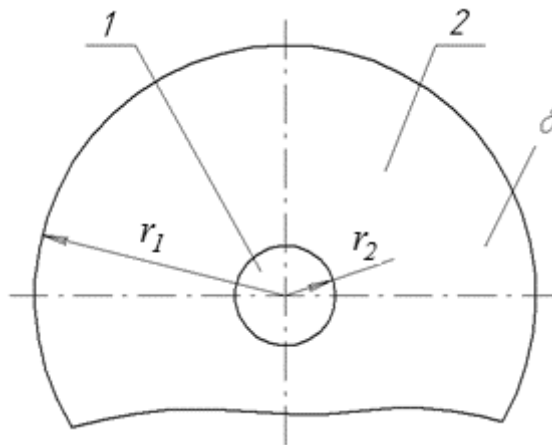


Рисунок 2.1 – Геометрична модель пластинчастого тепловідводу

Якщо не враховувати відведення тепла в області джерела, то процеси теплопередачі в такій моделі описуються системою рівнянь:

$$\left. \begin{aligned} \frac{d^2 \vartheta}{dr^2} + \frac{1}{r} \frac{d\vartheta}{dr} - b^2 \vartheta &= 0 \\ P &= -\lambda \frac{d\vartheta}{dr} S_1, \quad (r = r_1) \\ \frac{d\vartheta}{dr} &= 0, \quad (r = r_2) \end{aligned} \right\} \quad (2.2)$$

де $\vartheta = t - t_c$ – перепад температур між точкою на пластині і температурою навколишнього середовища t_c ;

$b^2 = \frac{\alpha_1 + \alpha_2}{\lambda \delta}$ – коефіцієнт, що враховує тепловіддачу в навколишнє середовище;

α_1 і α_2 – коефіцієнти тепловіддачі в навколишнє середовище з нижньої і верхньої поверхонь тепловідводу;

λ – коефіцієнт теплопровідності матеріалу;

δ – товщина пластини;

P – потужність джерела тепла;

$S_1 = 2\pi r_1 \delta$ – поверхня відводу тепла від джерела в тепловідвід;

Розв'язок системи рівнянь (2.2) має вигляд [30]:

$$\vartheta(r) = \frac{P}{\lambda b S_1} \frac{I_1(br_2)K_0(br) + I_0(br)K_1(br_2)}{I_1(br_2)K_1(br_1) - I_1(br_1)K_1(br_2)}, \quad (2.3)$$

де I_0 та I_1 – модифіковані функції Беселя першого роду нульового та першого порядків;

K_0 и K_1 – модифіковані функції Беселя другого роду нульового та першого порядків.

При значній товщині тепловідводу перепади температури по його довжині незначні. Необхідний тепловий режим тоді забезпечується пластиною з радіусом:

$$r_2 = \sqrt{r_1^2 + \frac{P}{\pi(\alpha_1 + \alpha_2)(t_p - t_c)}}, \quad (2.4)$$

де t_p – середньоповерхнева температура тепловідводу.

Умова (2.4) відповідає мінімальній площі тепловідводної поверхні (S-критерій). Інші критерії проектування не призводять до явних виразів для розмірів тепловідводу. Можливість застосування цих критеріїв досліджувалася на алюмінієвому тепловідводному елементі з максимально допустимою

температурою джерела тепла $t_{\max} = 60^{\circ}\text{C}$ при температурі навколишнього середовища $t_c = 40^{\circ}\text{C}$, з потужністю джерела тепла $P = 4\text{ Вт}$ та радіусом джерела тепла $r_1 = 5\text{ мм}$. Задавався коефіцієнт тепловіддачі $\alpha_1 + \alpha_2 = 20\text{ Вт/м}^2\text{К}$.

Початкове значення радіуса r_2 визначалося за допомогою співвідношення (2.4). Потім для кожної товщини підбирався радіус пластини r_2 з умов забезпечення теплового режиму:

$$\vartheta(r_1) + t_c = t_{\max}, \quad (2.5)$$

Графік залежності маси пластинчастого тепловідводу від його товщини наведено на рис. 2.2. Рисунок показує, що зміна товщини є ефективним засобом зменшення маси радіатора. Застосування М– критерію порівняно з S– критерієм дає змогу зменшити масу тепловідводу майже в 3 рази.

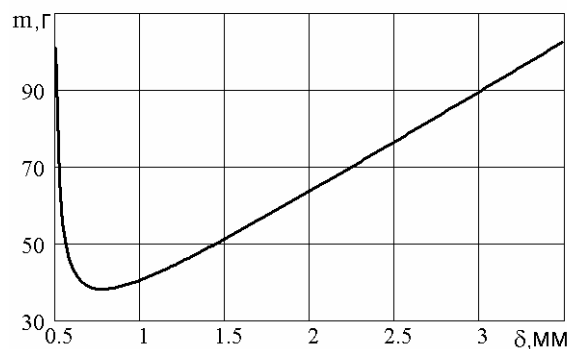


Рисунок 2.2 – Залежність маси тепловідводу від його товщини

Залежність площі тепловідводу від його товщини є монотонно спадною функцією (рис. 2.3). після товщини $\delta = 2\text{ мм}$ площа пластинчастого тепловідводу практично не змінюється. Радіус пластини тоді може розраховуватися за допомогою виразу (2.4).

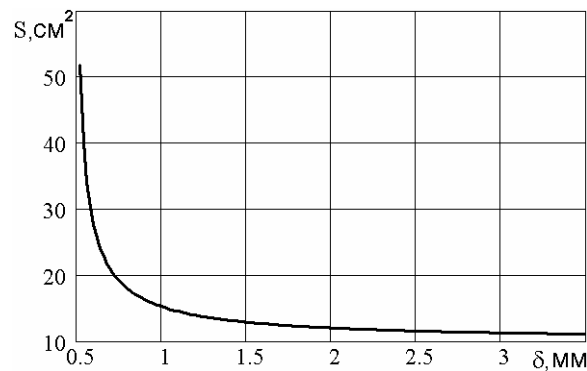


Рисунок 2.3 – Залежність площі тепловідводу від його товщини

До проміжних показників призводить MS– критерій проектування (рис. 2.4). Він дає змогу значно зменшити масогабаритні показники. Порівняння параметрів пластинчастого тепловідводу при M– та MS– критеріях показують, що MS– критерій зменшує площу тепловідводу на 25%, збільшує масу на 15%. Товщина пластини при цьому збільшується майже в 1,5 рази, що дає змогу збільшити її жорсткість.

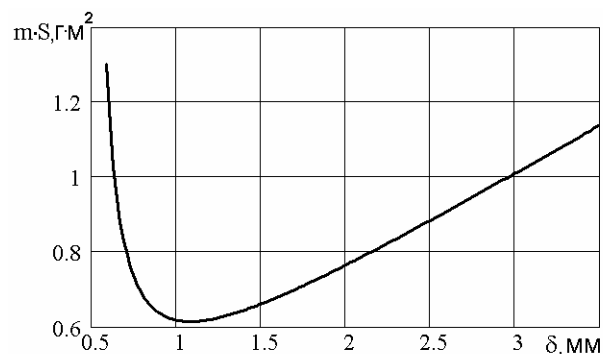


Рисунок 2.4 – Залежність добутку площі на масу тепловідводу від його товщини

У графіках, зображених на рис. 2.2 – рис. 2.4, не врахована нелінійна залежність коефіцієнтів тепловіддачі від температури тепловідводу. Цю особливість процесів теплопередачі необхідно врахувати при розробці алгоритмів проектування тепловідвідних елементів.

Таким чином, запропоновані критерії проектування тепловідвідних елементів, які надають можливість оптимізувати геометричні параметри

конструкцій: критерій мінімальної маси (M– критерій), мінімальної площі (S– критерій) і масогабаритний критерій (MS– критерій). Дослідження властивостей пластинчастих тепловідводів показало можливість зменшення маси та масогабариту в декілька разів при забезпеченні заданого теплового режиму. Критерій мінімальної площі не призводить до оптимальних результатів. Тому запропоновано проводити проектування пластинчастих тепловідводів з оптимальними масогабаритними параметрами з використанням таких розроблених критеріїв: M– критерій та MS– критерій. Для цього необхідно розробити алгоритми проектування пластинчастих тепловідводів з оптимальними масогабаритними параметрами.

2.2. Алгоритми проектування пластинчастих тепловідвідних елементів з оптимальними масогабаритними параметрами

При проектуванні виникає необхідність проводити уточнення не тільки товщини тепловідводу, його радіуса, але і коефіцієнта тепловіддачі з поверхні. Крім того, для розрахунку коефіцієнта тепловіддачі необхідно обчислювати середньоповерхневу температуру:

$$t_m = t_c + \frac{2}{r_2^2 - r_1^2} \int_{r_1}^{r_2} \mathcal{Q}(r) \cdot r dr, \quad (2.6)$$

Нелінійні властивості коефіцієнта тепловіддачі враховуються за допомогою ітераційного алгоритму, який для M– критерію проектування тепловідводу має вигляд [53–56]:

Крок 1. Уточнюється значення товщини радіатора $\delta^{(i)}$, де i –номер ітерації;

Крок 2. Уточнюється коефіцієнт тепловіддачі $\alpha^{(i)} = \alpha_1^{(i)} + \alpha_2^{(i)}$;

Крок 3. Уточнюється $r_2^{(i)}$ з умови забезпечення теплового режиму (2.5) з урахуванням (2.3);

Крок 4. Визначається середньоповерхнева температура $t_m^{(i)}$ за допомогою виразу (2.6);

Крок 5. Перевіряється умова:

$$\frac{t_m^i - t_m^{(i-1)}}{t_m^i} \leq \varepsilon_t, \quad (2.7)$$

де ε_t – похибка розрахунку середньоповерхневої температури.

Якщо умова (2.7) не виконується, то перехід на крок 2.

Крок 6. Розраховується маса тепловідводу $m^{(i)}$;

Крок 7. Перевіряється умова:

$$\frac{m^{(i-1)} - m^{(i)}}{m^{(i)}} < \varepsilon_m. \quad (2.8)$$

де ε_m – похибка обчислень маси тепловідводу.

Якщо умова (2.8) не виконується, то перехід на крок 1.

Крок 8. Кінець алгоритму.

В алгоритмі коефіцієнт тепловіддачі розраховується з використанням критеріальних рівнянь [22]. Початкове значення коефіцієнта тепловіддачі обирається на основі середньостатистичних даних в залежності від способу охолодження та виду теплоносія. Значення $r_2^{(0)}$ визначається з умови (2.4) для мінімальної площі тепловідводу, товщина $\delta^{(0)}$ може задаватися з умови рівності перепадів температур на циліндричній стінці і перепадів температур джерело – навколишнє середовище. Це призводить до початкового значення:

$$\delta^{(0)} = \frac{P}{2\pi\lambda(t_{\max} - t_c)} \ln \frac{r_2}{r_1}. \quad (2.9)$$

Алгоритм за М– критерієм використовувався для порівняння ефективності різних матеріалів тепловідводів. Результати розрахунків для розглянутого раніше джерела тепла і температури навколишнього середовища при вільній конвекції і коефіцієнті чорноти поверхні тепловідводу $\varepsilon = 0,9$ наведені в табл. 2.1.

Таблиця 2.1 - Ефективність використання матеріалів за М– критерієм

Матеріал	δ_{opt} , мм	S , см ²	m , г	$m \cdot S$, г·м ²
Мідь (М1)	0,38	172	58,4	1.004
Латунь (Л59)	0,59	173	90,1	1.556
Al сплави (Ал2)	0,84	171	38,1	0.652
Mg сплави (МА-1)	1,27	171	38,0	0.649
Сталь	2,94	171	388	6.652

З табл. 2.1 видно, що найменшу масу забезпечують алюмінієві і магнієві сплави. За масовими показниками тепловідводи з магнієвих сплавів не мають переваги перед алюмінієвими, але мають велику товщину. У зв'язку з їх високою вартістю їх застосування можливо при необхідності збільшення жорсткості пластини. Слід також зазначити, що при М– критерії коефіцієнт теплопровідності не впливає на площу тепловідводу.

Алгоритм проектування тепловідводу на основі MS– критерію відрізняється тільки кроками 6 і 7, які приймають вигляд:

Крок 6. Розраховується добуток маси тепловідводу на його площу $m^{(i)} \cdot S^{(i)}$;

Крок 7. Перевіряється умова:

$$\frac{m^{(i-1)} \cdot S^{(i-1)} - m^{(i)} \cdot S^{(i)}}{m^{(i)} \cdot S^{(i)}} < \varepsilon_{mS}. \quad (2.10)$$

де ε_{mS} – похибка обчислень масогабариту тепловідводу.

Якщо умова (2.10) не виконується, то перехід на крок 1.

Результати розрахунку тепловідводу з використанням MS– критерію наведені в табл. 2.2.

Таблиця 2.2 - Ефективність використання матеріалів за MS– критерієм

Матеріал	δ_{opt} , мм	S , см ²	m , г	$m \cdot S$, г·м ²
Мідь (М1)	0.54	134	64.5	0.863
Латунь (Л59)	0.85	133	100	1.332
Al сплави (Al2)	1.20	133	42.3	0.563
Mg сплави (MA-1)	1.80	133	42.1	0.562
Сталь	4.17	134	430	5.756

Дані табл. 2.2 свідчать, що властивості MS– критерію аналогічні властивостям M– критерію. В цьому випадку також найбільш ефективним матеріалом для пластинчастих тепловідводів є алюмінієві сплави. У порівнянні з M– критерієм досягається: збільшення товщини на 42%, зменшення площі на 28%, збільшення маси на 11%, зменшення MS– критерію на 16%.

Наведені алгоритми проектування не враховують нерівномірність тепловідведення по поверхні, що може призвести до похибки визначення оптимальних розмірів. З метою визначення похибки було проведено моделювання теплових процесів в пластинчастому тепловідводі методом скінченних об'ємів. У результаті моделювання встановлено, що при горизонтальному розташуванні тепловідводу температури джерел тепла в обох випадках не відрізнялися. Це говорить про те, що запропоновані алгоритми можуть без обмежень використовуватися для проектування горизонтально розташованих пластинчастих тепловідводів.

Результати моделювання для вертикально розташованого тепловідводу за М– критерієм показані на рис. 2.5.

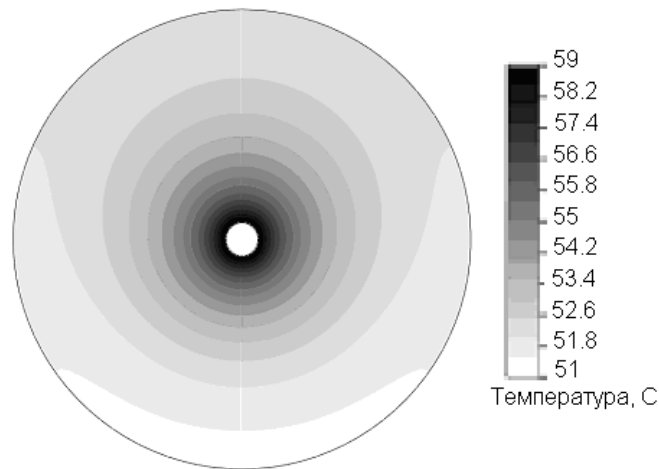


Рисунок 2.5 - Розподіл температури по вертикально розташованому тепловідводу

Збільшення інтенсивності тепловідведення за рахунок збільшення швидкості руху теплоносія в цьому випадку призвело до збільшення коефіцієнта тепловіддачі та зниження температури джерела на 1,6 градуси. Використання зміненого коефіцієнта тепловіддачі в запропонованих алгоритмах проектування показало, що вертикальне розташування пластинчастого тепловідводу дає змогу зменшити його масу на 14%, площу на 20% і збільшити товщину на 7%. Аналогічні результати отримані і для MS–критерію.

Таким чином, використання запропонованих алгоритмів, що містять емпіричні формули для розрахунків коефіцієнтів тепловіддачі, при вертикальному розташуванні тепловідводу поліпшує його тепловий режим, але не дає змоги досягти оптимальних співвідношень. Їх застосування виправдане у випадках, коли вимоги до габаритних показників не надто високі. Інакше необхідно проводити моделювання процесів тепловіддачі чисельними методами і перераховувати розміри конструкції відповідно до зміненого коефіцієнта тепловіддачі.

При проектуванні пластинчастих тепловідводів властивості M – критерію аналогічні властивостям MS – критерію. У порівнянні з S – критерієм MS – критерій дає змогу в кілька разів зменшити масу тепловідводу. MS – критерій дає змогу збільшувати жорсткість тепловідводу за рахунок збільшення товщини пластини при незначному збільшенні маси. Площа тепловідводу при цьому зменшується до 30%.

Дослідження ефективності матеріалів показало, що найкращі показники забезпечують алюмінієві і магнієві сплави. Пластинчасті тепловідводи з магнієвих сплавів відрізняються тільки товщиною пластини, яка збільшується до 50%. У зв'язку з ціновими обмеженнями магнієві сплави можуть використовуватися при необхідності забезпечення жорсткості пластини тепловідводу.

2.3. Метод розв'язання задач оптимізації масогабаритних параметрів тепловідвідних елементів

2.3.1. Формування моделі ребристого тепловідводу

Теплова модель ребристого тепловідводу показана на рис. 2.6, де P – теплова потужність, d_r, l_r, d_p, l_p – товщина, довжина ребер і ділянок основи. Тепловідвід має однакову ширину. Розміри інших конструктивних елементів відрізняються один від одного.

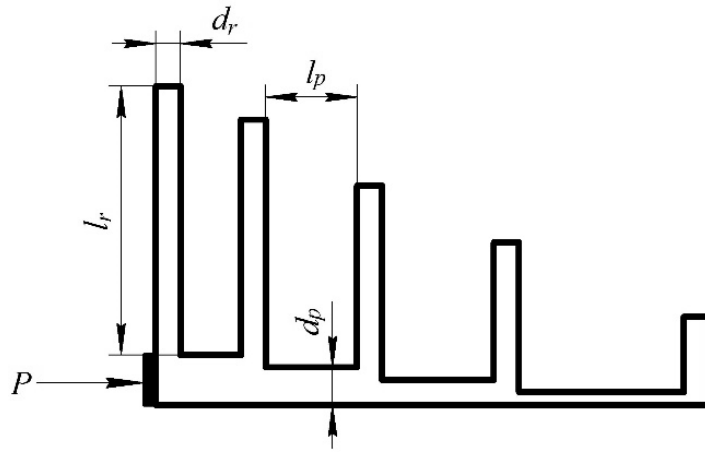


Рисунок 2.6 – Тепловідвід з ребристими поверхнями

У загальному випадку теплові процеси в такій конструкції описуються двовимірними рівняннями теплопровідності. Але практика проектування тепловідводів показує, що зазвичай виконується співвідношення:

$$l_i \gg d_i,$$

де l_i і d_i - довжина і товщина i -го ребра і ділянки основи.

Це дає змогу розглядати процеси теплопередачі в елементах конструкцій як одновимірні та здійснювати еквівалентні перетворення теплової моделі з використанням виразу для теплового опору теплонавантаженого стрижня. Тоді процеси теплопередачі на ділянці теплової лінії будуть описуватися системою рівнянь [22]:

$$\left. \begin{aligned} \frac{d^2\theta}{dx^2} - b^2\theta &= 0 \\ \frac{d\theta}{dx} &= -\frac{P}{\lambda S} \quad (x=0) \\ \frac{d\theta}{dx} &= -\beta\theta \quad (x=l) \end{aligned} \right\}, \quad (2.11)$$

де θ – перепад температур;

$$b^2 = \frac{\alpha U}{\lambda S}; \quad \beta = \frac{1}{\lambda S R_H};$$

α – коефіцієнт тепловіддачі з поверхні тепловідводу;

λ – коефіцієнт теплопровідності матеріалу тепловідводу;

U, S – периметр і площа поперечного перерізу елемента;

R_H – вхідний тепловий опір чергової ділянки тепловідводу.

Вхідні теплові опори ребра і основи можуть бути отримані з розв'язку системи (2.11), який записується у вигляді:

$$\theta(x) = \text{ch}(bx) - \frac{b \cdot \text{ch}(bl) + \beta \cdot \text{sh}(bl)}{b \cdot \text{sh}(bl) + \beta \cdot \text{ch}(bl)} \text{sh}(bx). \quad (2.12)$$

Тепловий опір будь-якого елемента тепловідводу у відповідності з виразом (2.12) приймає вигляд:

$$R = \frac{1}{\lambda b S} \frac{b \cdot \text{ch}(bl) + \beta \cdot \text{sh}(bl)}{b \cdot \text{sh}(bl) + \beta \cdot \text{ch}(bl)}. \quad (2.13)$$

Вхідний тепловий опір чергової ділянки тепловідводу розраховується як паралельне з'єднання вхідних теплових опорів ребра і наступної ділянки основи:

$$R_H = \frac{R_P R_O}{R_P + R_O},$$

де R_P і R_O – вхідний тепловий опір ребра і наступної ділянки.

Графік залежності нормованого теплового опору (2.13) від довжини стрижня і параметрів теплового навантаження показані на рис. 2.7.

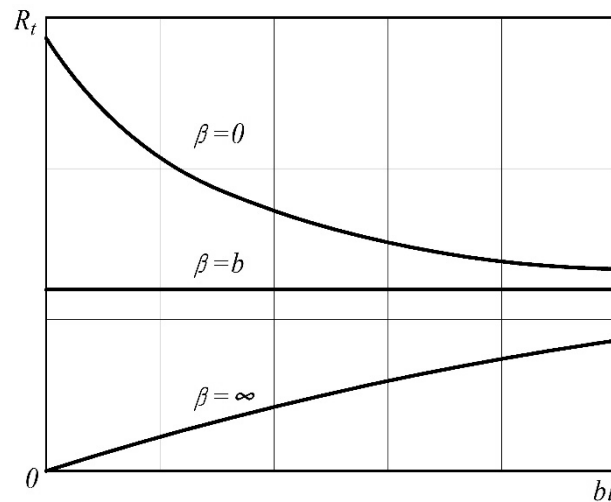


Рисунок 2.7 – Вплив теплового навантаження на тепловий опір

Залежно від параметрів теплового навантаження в стрижні можуть виникати режими холостого ходу, критичний і короткого замикання. У режимі холостого ходу $\beta = 0$, а в кінці стрижня тепловідвід відсутній. Вираз (2.13) в цьому випадку перетвориться до виду:

$$R = \frac{1}{\lambda b S} \operatorname{cth}(bl),$$

та використовується при розрахунку вхідних теплових опорів ребер. У режимі короткого замикання ($\beta \rightarrow \infty$) на кінці стрижня підтримується нульова температура. Цьому режиму відповідає вхідний тепловий опір ділянки основи:

$$R = \frac{1}{\lambda b S} \operatorname{cth}(bl).$$

У критичному режимі $\beta = b$ вхідний тепловий опір стрижня не залежить від його довжини:

$$R = \frac{1}{\lambda b S}.$$

При використанні ребристих тепловідводів тепловий режим теплонавантаженого стрижня характеризується умовою:

$$\beta < b, \quad (2.14)$$

яку необхідно витримувати при виборі рішень і початкових наближень в алгоритмі проектування.

2.3.2. Метод оптимізації маси ребристого тепловідводу

При оптимізації маси ребристого тепловідводу використовується М-критерій [53–56]:

$$m = \rho L \sum_{i=1}^n (d_{pi} l_{pi} + d_{ri} l_{ri}) \rightarrow \min, \quad (2.15)$$

де ρ – щільність матеріалу тепловідводу;

L – висота тепловідводу;

n – число ребер тепловідводу.

Оптимізаційна задача розв'язується при обмеженні:

$$R(d_{pi}, l_{pi}, d_{ri}, l_{ri}) \leq R_{дон}, \quad (2.16)$$

де $R_{дон}$ – гранично-допустимий вхідний тепловий опір тепловідводу.

Обмеження (2.16) визначає область працездатності. Однак, для розв'язання задач проектування тепловідводів отримання аналітичних залежностей для області працездатності є складною задачею, тому можна використовувати її апроксимацію. Для забезпечення збіжності алгоритмів

проектування апроксимаційні моделі меж області працездатності формуються в просторі зворотних величин параметрів. Для теплової лінії такі параметри можна записати у вигляді:

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

Таким чином, для розв'язання задач проектування тепловідвідних елементів необхідно розв'язати задачу нелінійного програмування [90–96]. Тоді цільова функція записується у вигляді:

$$f(X) = \rho L \sum_{i=1}^n \left(\frac{1}{x_{1i}} \frac{1}{x_{2i}} + \frac{1}{x_{3i}} \frac{1}{x_{4i}} \right) \rightarrow \max, \quad (2.17)$$

де $X = \{x_{ij}\}$ – множина геометричних параметрів теплової лінії, $j = \overline{1,4}$.

При цьому оптимальні рішення будуть знаходитись на межі області працездатності. Тому обмеження (2.16) можна записати у вигляді рівності:

$$h(X) = R_{don}.$$

Для однієї ділянки теплової лінії область працездатності показана на рис. 2.8, де Ω_W – область працездатності, B – точка оптимального рішення, x_{m1} і x_{m2} – оптимальні параметри теплової лінії. Для покращення збіжності використовується обмежуюча функція у формі еліпсоїда:

$$h(X) = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^4 c_{ij} x_{ij}^2, \quad (2.18)$$

де c_{ij} – коефіцієнти моделі.

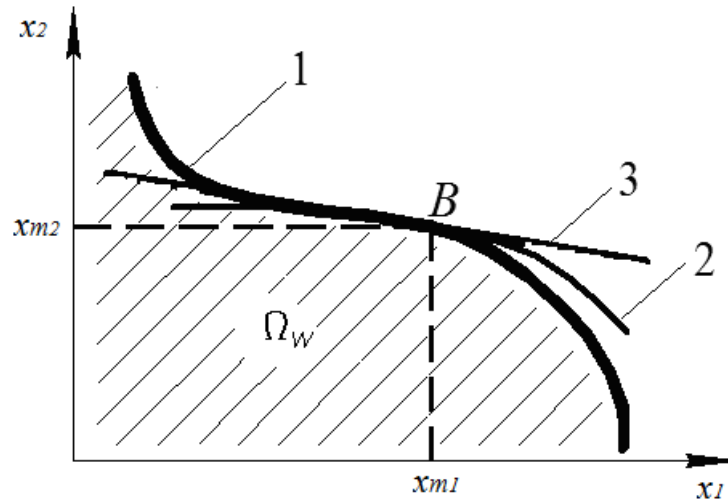


Рисунок 2.8 – Формування області працездатності

Коефіцієнти моделі визначаються з умови збігу дотичної до функції (2.13) і еліпсоїда (2.18). Рівняння дотичної до обмежуючої функції формується з її лінійної моделі:

$$y(X) = a_0 + \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^4 a_{ij} x_{ij}, \quad (2.19)$$

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;

$$a_0 = R_{дон} - \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^4 a_{ij} x_{ij}.$$

Вираз (2.19) дає змогу записати рівняння дотичної до функції (2.13) у вигляді:

$$\frac{1}{R_{\partial on} \cdot a_0} \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^4 a_{ij} x_{ij} = 1. \quad (2.20)$$

Рівняння дотичної до еліпсоїда (2.18) має вигляд:

$$\frac{1}{R_{\partial on}} \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^4 x_{bij} c_{ij} x_{ij} = 1. \quad (2.21)$$

Порівняння виразів (2.20) і (2.21) дає змогу отримати вираз для коефіцієнтів цільової функції (2.18) у вигляді:

$$c_{ij} = \frac{R_{\partial on}}{R_{\partial on} \cdot a_0} \frac{a_{ij}}{x_{bij}}. \quad (2.22)$$

За допомогою методу множників Лагранжа [90–94] задача оптимізації зводиться до задачі безумовної оптимізації. Функція Лагранжа записується у вигляді:

$$\begin{aligned} L(X, \lambda) &= f(X) + \lambda h(X), \\ L(X, \lambda) &= \sum_{i=1}^n \left(\frac{1}{x_{1i}} \frac{1}{x_{2i}} + \frac{1}{x_{3i}} \frac{1}{x_{4i}} \right) + \lambda \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^4 c_{ij} x_{ij}^2, \end{aligned} \quad (2.23)$$

де λ – множник Лагранжа.

Оптимального значення функція (2.23) досягає при:

$$\lambda = \frac{2}{R_{\partial on}^2} \left[\sum_{i=1}^n \left(\sqrt[4]{c_{1i} c_{2i}} + \sqrt[4]{c_{3i} c_{4i}} \right) \right]^2,$$

що дає змогу записати оптимальні значення параметрів тепловідводу у вигляді:

$$x_{1i} = \frac{1}{\sqrt[4]{2\lambda}} \sqrt[8]{\frac{c_{2i}}{c_{1i}^3}}; \quad x_{2i} = \frac{1}{\sqrt[4]{2\lambda}} \sqrt[8]{\frac{c_{1i}}{c_{2i}^3}}, \quad (2.24)$$

$$x_{3i} = \frac{1}{\sqrt[4]{2\lambda}} \sqrt[8]{\frac{c_{4i}}{c_{3i}^3}}; \quad x_{4i} = \frac{1}{\sqrt[4]{2\lambda}} \sqrt[8]{\frac{c_{3i}}{c_{4i}^3}}. \quad (2.25)$$

Оскільки значення коефіцієнтів у виразах (2.24) і (2.25) залежать від положення граничної точки, то для визначення оптимальних розмірів використовується ітераційний алгоритм:

Крок 1. – Визначення розмірів одиночного ребра мінімальної маси [23]:

$$d_m = \frac{0,632}{\alpha\lambda} \left(\frac{1}{LR_{\text{дон}}} \right)^2; \quad l_m = \frac{0,7875}{\alpha} \frac{1}{LR_{\text{дон}}}.$$

При розрахунку α використовуються вирази для вертикально орієнтованої поверхні [82].

Крок 2. – Призначення початкових значень параметрів тепловідводу з урахуванням кількості ребер:

$$d_{ri} = d_{pi} = d_m; \quad l_{ri} = l_{pi} = \frac{l_m}{2n-1}.$$

Крок 3. – Визначення середньоповерхневої температури ребер і ділянок основи шляхом інтегрування виразів (2.12) для кожної ділянки тепловідводу.

Крок 4. – Уточнення значень коефіцієнтів тепловіддачі на кожній ділянці тепловідводу. Враховується вплив межреберної відстані на коефіцієнти тепловіддачі конвекцією і випромінюванням.

Крок 5. – Уточнення геометричних параметрів тепловідводу. Використовуються співвідношення (2.24) і (2.25).

Крок 6. – Перевіряється умова:

$$\left| \frac{h(X^{(i)}) - h(X^{(i-1)})}{h(X^{(i)})} \right| \leq \varepsilon, \text{ де } \varepsilon - \text{похибка обчислень}$$

Якщо умова не виконується, то перехід на крок 3.

Крок 7. – Перевіряється умова:

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

Якщо умова не виконується, то перехід на крок 3. Інакше – кінець алгоритму.

2.3.3. Проектування ребристих тепловідводів

Оптимізація маси проводилася для тепловідводу, показаного на рис. 2.6. Використовувався алюмінієвий сплав Ад2. Задавалася потужність $P = 10$ Вт, температура навколишнього середовища $t_c = 40^\circ\text{C}$, допустимий вхідний тепловий опір $R_{don} = 2$ К/Вт, коефіцієнт чорноти поверхні тепловідводу $\varepsilon = 0,91$. В алгоритмі враховувалася залежність коефіцієнтів тепловіддачі від міжреберної відстані [82]. Досліджувалася залежність маси тепловідводу від кількості ребер. Результати розрахунків показані на рис. 2.9 пунктирною лінією.

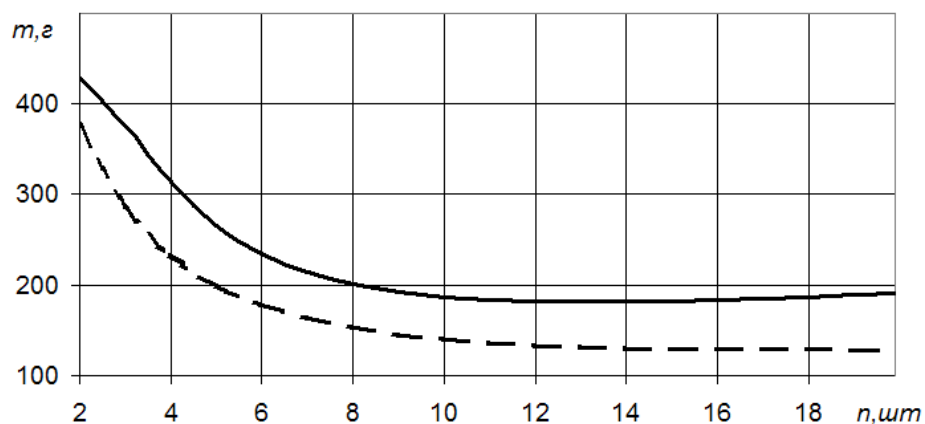


Рисунок 2.9 – Залежність маси тепловідводу від числа ребер

Аналіз залежностей маси тепловідводу від кількості ребер показав, що кількість ребер значно впливає на його масу. Найбільша зміна маси здійснюється при збільшенні кількості ребер до $n = 8$, що дає змогу зменшити масу тепловідводу в 2,5 рази. Подальше збільшення кількості ребер дає змогу зменшити масу тепловідводу до 20%.

Оптимізація призводить до конструкції тепловідводу, у якого розміри ребер і ділянок основи не повторюються. Товщина ділянок основи змінюється від 9 мм до 1 мм, а довжина - від 9 мм до 14 мм. Товщини ребер змінюються від 1,2 мм до 0,4 мм, а їх висота - від 136 мм до 95 мм. Висота ребер до кінця тепловідводу зменшується до 30%.

Для покращення технологічності виробу однотипні розміри тепловідводу приймаються рівними. У цьому випадку цільова функція (2.5) запишеться у вигляді:

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

Допоміжна функція (2.23) перетвориться до виду:

$$L(X, \lambda) = \left(\frac{n-1}{x_1 x_2} + \frac{n}{x_3 x_4} \right) + \lambda \sum_{j=1}^4 c_j x_j^2.$$

Оптимальні значення параметрів тепловідводу досягаються, коли:

$$x_1 = \frac{1}{\sqrt[4]{2\lambda}} \sqrt[8]{(n-1)^2 \cdot \frac{c_2}{c_1^3}}; \quad x_2 = \frac{1}{\sqrt[4]{2\lambda}} \sqrt[8]{(n-1)^2 \cdot \frac{c_1}{c_2^3}};$$

$$x_3 = \frac{1}{\sqrt[4]{2\lambda}} \sqrt[8]{n^2 \cdot \frac{c_4}{c_3^3}}; \quad x_4 = \frac{1}{\sqrt[4]{2\lambda}} \sqrt[8]{n^2 \cdot \frac{c_3}{c_4^3}}.$$

Оптимізація маси такого тепловідводу з раніше заданими параметрами призводить до залежності, показаної на рис. 2.9 суцільною лінією. При значному збільшенні кількості ребер маса такого тепловідводу трохи збільшується. Порівняння тепловідводів з різними і рівними однотипними розмірами показує, що за покращення технологічності доводиться платити збільшенням маси на 25%. При числі ребер $n=8$ геометричні розміри тепловідводу складуть: $d_p = 6.5$ мм, $l_p = 10.4$ мм, $d_r = 0.7$ мм, $l_r = 124.2$ мм.

Таким чином, розроблено метод формування моделей меж області працездатності у формі функції еліпсоїда тепловідвідних елементів шляхом відображення параметрів у простір зворотних величин, що дає можливість забезпечити збіжність процесу оптимізації масогабаритних параметрів тепловідводів. Розроблений метод використовувався при оптимізації маси ребристих тепловідводів та надав можливість спроектувати тепловідводи мінімальної маси. Отримані оптимізаційні співвідношення відображають залежність розмірів ділянок тепловідводу від параметрів меж області працездатності, яка визначає допустимий тепловий режим тепловідвідних елементів.

Запропоновано ітераційні алгоритми, які дають змогу враховувати технологічні обмеження, зокрема проектувати тепловідводи з рівними однотипними розмірами. Застосування розроблених оптимізаційних процедур надає можливість зменшувати масу тепловідвідних елементів у кілька разів у порівнянні з пластинчастими тепловідводами. Використання рівних однотипних розмірів призводить до збільшення маси на 20-30%. Запропонований метод формування меж області працездатності та алгоритми проектування тепловідводів можуть також використовуватися для інших критеріїв оптимізації. Для цього потрібно визначити нові оптимальні співвідношення параметрів конструкцій.

2.4. Висновки

Таким чином, запропоновано критерії проектування тепловідвідних елементів, які надають можливість оптимізувати геометричні параметри конструкцій за критеріями: критерій мінімальної маси (M–критерій), мінімальної площі (S–критерій) і масогабаритний критерій (MS–критерій). Проведено порівняння цих критеріїв на прикладі проектування пластинчастого тепловідводу. Для цього було розроблено алгоритми проектування пластинчастих тепловідводів з оптимальними масогабаритними показниками. При проектуванні пластинчастих тепловідводів визначено, що властивості M–критерію аналогічні властивостям MS–критерію. У порівнянні з S–критерієм MS–критерій дає змогу в кілька разів зменшити масу тепловідводу. MS–критерій дає змогу збільшувати жорсткість тепловідводу за рахунок збільшення товщини пластини при незначному збільшенні маси. Площа тепловідводу при цьому зменшується до 30%. Використання алгоритмів проектування тепловідводів також дозволило дослідити ефективність матеріалів. Визначено, що найкращі показники забезпечують алюмінієві і магнієві сплави. Пластинчасті тепловідводи з магнієвих сплавів відрізняються тільки товщиною пластини, яка збільшується до 50%. У зв'язку з ціновими обмеженнями магнієві сплави можуть використовуватися при необхідності забезпечення жорсткості пластини тепловідводу.

Розроблено метод формування моделей меж області працездатності у формі функції еліпсоїда тепловідвідних елементів шляхом відображення параметрів у простір зворотних величин, що дає можливість забезпечити збіжність процесу оптимізації масогабаритних параметрів тепловідводів. Розроблений метод використовувався при оптимізації маси ребристих тепловідводів та надав можливість спроектувати тепловідводи мінімальної маси. Отримані оптимізаційні співвідношення пов'язують розміри ділянок ребристого тепловідводу з параметрами меж області працездатності, що визначає допустимий тепловий режим.

Запропоновано ітераційні алгоритми, які дають змогу враховувати технологічні обмеження, зокрема проектувати тепловідводи з рівними однотипними розмірами. Застосування розроблених оптимізаційних процедур надає можливість зменшувати масу тепловідвідних елементів у кілька разів у порівнянні з пластинчастими тепловідводами. Використання рівних однотипних розмірів призводить до збільшення маси на 20-30%. Запропонований метод формування меж області працездатності та алгоритми проектування тепловідводів можуть також використовуватися для інших критеріїв оптимізації. Для цього потрібно визначити нові оптимальні співвідношення параметрів конструкцій.

Однак, використання запропонованих алгоритмів, що містять емпіричні формули для розрахунків коефіцієнтів тепловіддачі, не дають змоги досягти оптимальних співвідношень при практичному застосуванні. Їх застосування виправдане у випадках, коли вимоги до габаритних показників не надто високі. Збільшення точності розрахунків може бути досягнуто за допомогою аналізу процесів тепловіддачі чисельними методами. Для цього необхідно розробити методику формування теплових моделей радіаторів в системах інженерного аналізу та алгоритми їх проектування.

3. МЕТОДИ ТА АЛГОРИТМИ АВТОМАТИЗОВАНОГО ПРОЕКТУВАННЯ ТЕПЛОВІДВІДНИХ ЕЛЕМЕНТІВ РАДІОЕЛЕКТРОННИХ АПАРАТІВ

3.1. Алгоритм моделювання теплових процесів в тепловідвідних елементах за допомогою системи SolidWorks

Для підвищення точності розрахунків теплових режимів тепловідвідних елементів та забезпечення можливості розрахунку радіаторів будь-яких складних форм необхідно використовувати системи інженерного аналізу. Для цього запропоновано алгоритм моделювання теплових процесів в радіаторах в системі SolidWorks (модуль FlowSimulation) [31–33].

Основні кроки алгоритму моделювання теплових процесів в модулі FlowSimulation [68, 69]:

Крок 1. Створення або імпорт моделі – створення тривимірної геометрії радіатора або відкриття вже існуючої;

Крок 2. Створення проекту FlowSimulation – вибір зовнішньої задачі, врахування теплопередачі в твердому тілі та радіаційного теплообміну;

Крок 3. Задання параметрів матеріалів радіатора та текучого середовища;

Крок 4. Задання початкових та граничних умов – температури навколишнього середовища, потужності джерела тепла, початкової температури радіатора;

Крок 5. Задання базової сітки просторовими комірками у формі паралелепіпеда;

Крок 6. Адаптація сітки для забезпечення найбільш точного розрахунку коефіцієнта тепловіддачі (дроблення перехідних комірок між радіатором та повітрям);

Крок 7. Задання критерію завершення алгоритму: різниці значень максимальної температури твердого тіла між сусідніми ітераціями;

Крок 8. Запуск процесу розрахунку;

Крок 9. Аналіз результатів – визначення максимальної температури перегріву радіатора.

На першому кроці методики за заданими розмірами створюється параметрична модель радіатора з односторонніми ребрами або штирями та з електрорадіоелементом (ЕРЕ) з неореберної поверхні. Модель штирового радіатора з ЕРЕ показана на рис. 3.1. Усі розміри моделі вносяться у таблицю параметрів та визначаються арифметичні залежності між розмірами елементів конструкції для забезпечення можливості автоматичної перебудови геометрії.

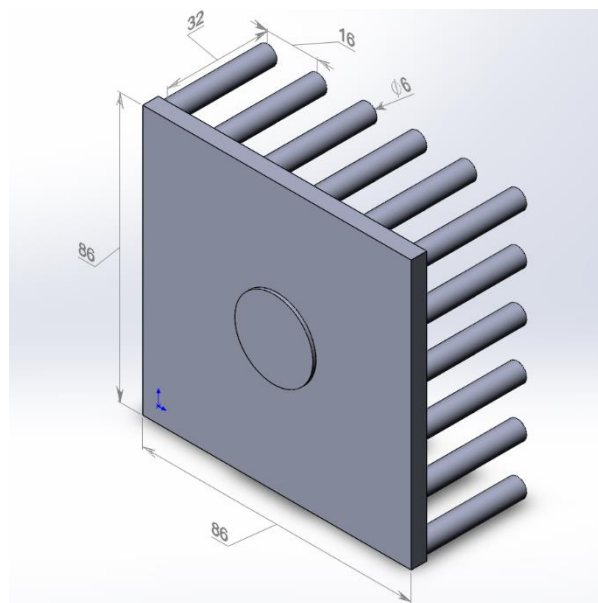


Рисунок 3.1 - Модель штирового радіатора с ЕРЕ

Тривимірна розрахункова сітка показана на рис. 3.2. Розміри комірок отриманої сітки повинні задовольняти вимогам сіткової збіжності, тобто при подальшому зменшенні розмірів сітки зміна значення максимальної температури не повинна перевищувати допустиму похибку [32]. Для цього перед проведенням процедури оптимізації необхідно дослідити вплив зміни розмірів комірок на максимальну температуру твердого тіла.

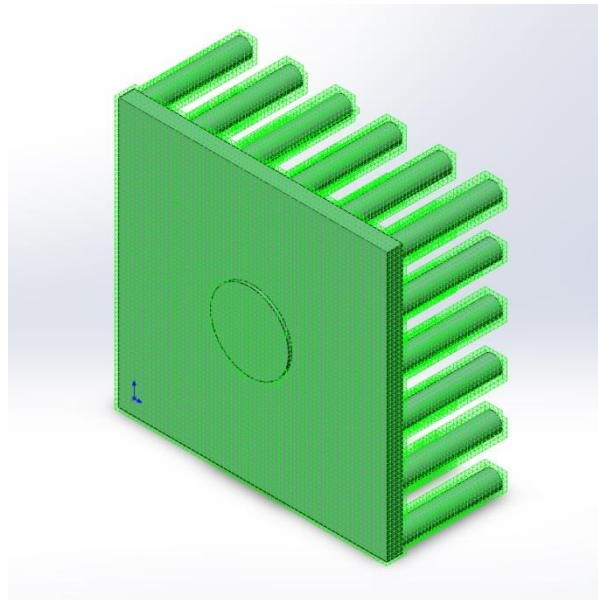


Рисунок 3.2 – Зображення тривимірної розрахункової сітки

Розподіл значень температури за обраним перетином розрахункової області у вигляді суцільної площини показано на рис. 3.3.

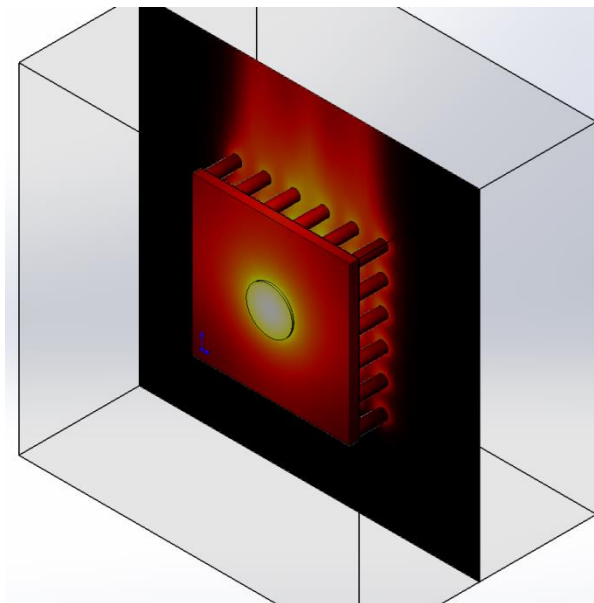


Рисунок 3.3 – Розподіл температури за перетином

Значення теплових параметрів на поверхні контакту радіатора з тепловідляючим елементом приведені в табл. 3.1. За параметрами табл. 3.1 обирається максимальна температуру радіатора (Температура твердого тіла, Максимальне значення) – $77,33^{\circ}\text{C}$.

Таблиця 3.1 – Значення параметрів на поверхні

Параметр	Мінімальне значення	Максимальне значення	Середнє значення
Тепловий потік конвекцією [W/m ²]	173,219616	822,649205	265,862576
Тепловий потік радіацією [W/m ²]	64,9412801	83,3051609	75,6665578
Температура рідини [°C]	71,3921285	77,3280395	74,4902999
Температура твердого тіла [°C]	71,3921285	77,3280395	74,4902999
Загальна температура [°C]	71,3921285	77,3280395	74,4902999

Таким чином, розроблено методику моделювання теплового режиму радіаторів або функціональних вузлів з інтегрованими тепловідводними елементами, яка містить такі кроки: створення спрощеної параметризованої тривимірної моделі радіатора і моделей потужних ЕРЕ; задання початкових даних, фізичних умов; визначення і задання початкових і граничних умов: поверхневих теплових джерел (потужність тепловиділення), задання радіаційних властивостей моделі; створення базової та адаптованої розрахункових сіток; розв'язок теплової задачі; отримання результатів у вигляді максимального значення температури радіатора.

3.2. Метод та алгоритм параметричного синтезу ребристих радіаторів

Дослідження ребристих тепловідводів показало, що можливе значне зменшення їх масогабаритних показників при оптимальному розподілі температури уздовж цих елементів. Можливість зменшення маси й об'єму ребристих радіаторів показана в роботах [1, 18, 19]. На жаль, у запропонованих алгоритмах оптимізація проводилася при заданій товщині ребер. Крім того, у використаних моделях не враховувався тривимірний характер температурного поля в основі радіатора. При розрахунку теплових режимів радіаторів використовувалися граничні умови 3-го роду і наближені співвідношення для коефіцієнтів тепловіддачі.

Істотне збільшення точності розрахунків можна отримати при використанні систем інженерного аналізу [4–7, 36–41], що дає змогу моделювати розподіл температури в складних конструкціях пристроїв різного

застосування. У поєднанні з алгоритмами оптимізації це відкриває шлях до розробки методів проектування радіаторів, що враховують будь-які конструктивні і технологічні обмеження. При цьому основною задачею є задача параметричного синтезу конструкцій радіаторів.

Для розробки методу параметричного синтезу ребристих радіаторів з оптимальними масогабаритними показниками необхідно:

- сформулювати теплову модель ребристого радіатора в системі інженерного аналізу;
- розробити співвідношення для визначення оптимальних параметрів конструкції ребристого радіатора за різними критеріями проектування;

3.2.1. Формування теплової моделі

При побудові теплової моделі в системі інженерного аналізу прийняті такі припущення:

- не враховується шорсткість поверхні радіатора;
- товщини і довжини елементів конструкції радіатора (ребра і міжреберні ділянки основи) однакові для всіх елементів;
- 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 задачу дослідження. У разі необхідності ці припущення легко враховуються в процесі моделювання. Побудовані таким чином моделі дають змогу за допомогою систем інженерного аналізу розв'язати сполучену задачу теплообміну з навколишнім середовищем з урахуванням тривимірного розподілу температури в радіаторі.

Теплова модель ребристого радіатора з прийнятими припущеннями показана на рис. 3.4, де d_r, l_r і d_p, l_p – товщина і довжина ребер і міжреберних ділянок основи, L – ширина радіатора. Ω_{VT} – область контакту основи

напівпровідникового приладу і радіатора, яка відокремлена від поверхні радіатора чорною лінією. Білими лініями показані ізотерми [57–62].

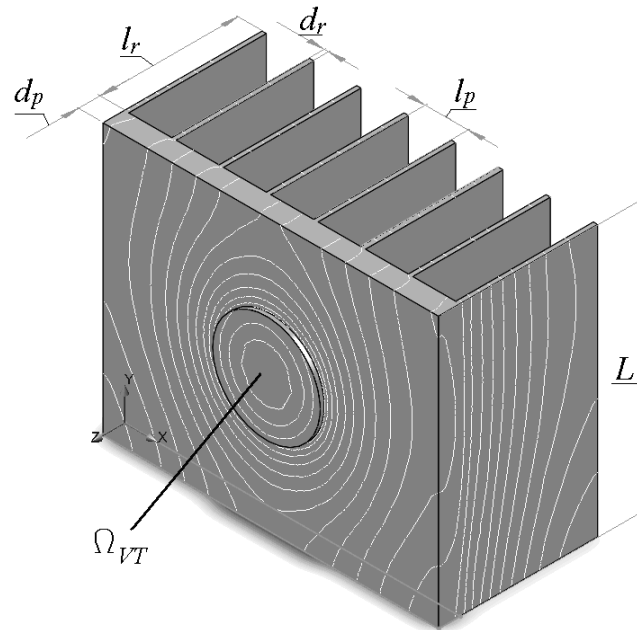


Рисунок 3.4 – Теплова модель ребристого радіатора

Для розв’язку оптимізаційних задач необхідна математична модель залежності теплового опору радіатора від розмірів його елементів. Така модель може бути створена за допомогою методу формування моделі меж області працездатності у формі функції еліпсоїда, запропонованого в розділі 2.3.

Математична модель при апроксимації границь області працездатності еліпсоїдом в граничній точці створюється аналогічно (2.18) та має вигляд:

$$h(X) = \sum_{i=1}^k c_i x_i^2, \quad (3.1)$$

де $h(X)$ – тепловий опір радіатора (між областю Ω_{VT} і навколишнім середовищем);

k – кількість параметрів, що оптимізуються;

$X = \{x_{ij}\}$ – множина геометричних параметрів теплової лінії

c_i – коефіцієнти моделі;

$$x_1 = \frac{1}{d_p}; \quad x_2 = \frac{1}{l_p}; \quad x_3 = \frac{1}{d_r}; \quad x_4 = \frac{1}{l_r}; \quad x_5 = \frac{1}{L}.$$

Для ребристого радіатора кількість параметрів, що оптимізуються $k=5$.

Коефіцієнти моделі знаходилися аналогічно (2.19), рівняння дотичної гіперплощини до границь області працездатності записується у вигляді:

$$y(X) = a_0 + \sum_{i=1}^k a_i x_i, \quad (3.2)$$

де $a_i = \left. \frac{\partial R}{\partial x_i} \right|_{X_b}$ – лінійні коефіцієнти розкладання функції R в ряд Тейлора;

$$a_0 = R_{\text{дон}} - \sum_{i=1}^k a_i x_{bi};$$

$X_{b1} = \{x_{b1}, \dots, x_{bn}\}$ – координати граничної точки області працездатності, в якій визначаються параметри моделі;

$R_{\text{дон}}$ – гранично-допустимий тепловий опір радіатора.

Коефіцієнти a_i знаходяться чисельним диференціюванням в процесі моделювання за допомогою систем інженерного аналізу. Порівняння виразів (3.1) і (3.2) дає змогу встановити зв'язок між коефіцієнтами a_i та c_i :

$$c_i = \frac{R_{\text{дон}}}{R_{\text{дон}} - a_0} \frac{a_i}{x_{bi}}. \quad (3.3)$$

Отримані співвідношення використовуються для обчислення коефіцієнтів моделі у формі функції еліпсоїда при оптимізації розмірів елементів конструкцій радіатора з урахуванням критеріїв оптимізації.

3.2.2. Оптимізація масогабаритних параметрів

Оптимізація масогабаритних параметрів ребристих радіаторів проводиться за критеріями мінімальної маси (М– критерій) і мінімального об'єму (V– критерій). Критерій мінімальної маси може інтерпретуватися як критерій мінімальної вартості, оскільки він визначає витрату матеріалу. Критерій мінімального об'єму можна використовувати для оцінки якості тепловідвідних елементів, вважаючи, що їх якість обернено пропорційна об'єму. Тоді можна визначати і оптимальні співвідношення ціна/якість шляхом використання масогабаритного показника у вигляді добутку маси радіатора на його об'єм (MV– критерій).

М– критерію оптимізації радіатора відповідає цільова функція:

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

де ρ – щільність матеріалу;

n – кількість ребер радіатора.

З урахуванням обернення конструктивних параметрів цільова функція набуває вигляду:

$$f(X) = \rho \frac{1}{x_5} \left(\frac{n-1}{x_1 x_2} + \frac{n}{x_3 x_4} + \frac{n}{x_1 x_3} \right) \rightarrow \max. \quad (3.4)$$

Оптимізаційна задача розв'язується при рівності:

$$h(X) = R_{don}. \quad (3.5)$$

Рішення оптимізаційної задачі проводиться методом множників Лагранжа. Необхідність використання в цьому методі виразу (3.4) призводить

до складної системи нелінійних рівнянь. Для спрощення процедури оптимізації використовується модель цільової функції у формі гіперболи (3.4):

$$G(X) = \sum_{i=1}^k \frac{g_i}{x_i}, \quad (3.6)$$

де g_i – коефіцієнти моделі ($i = \overline{1, k}$).

Коефіцієнти моделі (3.6) визначаються з умови співпадання дотичних гіперплощин до гіперповерхонь (3.4) і (3.6):

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

де b_i – лінійні коефіцієнти розкладання функції (3.4) в ряд Тейлора.

Допоміжна функція в методі множників Лагранжа для М–критерію записується у вигляді:

$$L(X, \lambda) = \sum_{i=1}^k \frac{g_i}{x_i} + \lambda \sum_{i=1}^k c_i x_i^2. \quad (3.7)$$

Оптимальне значення параметрів досягається при:

$$\frac{\partial L(X, \lambda)}{\partial x_i} = 0.$$

У результаті складаються рівняння виду:

$$-\frac{g_i}{x_i^2} + 2\lambda c_i x_i = 0. \quad (3.8)$$

Розв'язок системи рівнянь, складеної з рівнянь (3.1) і (3.8), призводить до оптимальних параметрів радіатора при M– критерії:

$$x_i = \left(\frac{g_i}{c_i} \right)^{1/3} \cdot \sqrt[3]{\frac{R_{\text{don}}}{\sum_{i=1}^k (c_i \cdot g_i^2)}}. \quad (3.9)$$

Цільова функція V– критерію для обраного радіатора записується у вигляді:

$$V = L(l_r + d_p) \cdot (d_r n + l_p (n-1)) \rightarrow \min.$$

Використовуючи перетворення (3.6) – (3.8) для цільової функції V– критерію отримуємо співвідношення, аналогічні (3.9). Це дає змогу використовувати в процедурах оптимізації маси й об'єму однакові оптимізаційні співвідношення. Відрізняються ці процедури тільки виразом для цільової функції.

Цільова функція MV– критерію містить добуток маси та об'єму радіатора, що підвищує показники степені змінних. Це враховується в моделі цільової функції:

$$G(X) = \sum_{i=1}^k \frac{g_i}{x_i^2}, \quad (3.10)$$

де $g_i = -\frac{1}{2} b_i \cdot x_{bi}^3$;

b_i – лінійні коефіцієнти розкладання добутку функцій m і V в ряд Тейлора.

Тоді оптимальні розміри елементів конструкції радіатора в MV– критерії встановлюються співвідношеннями:

$$x_i = \left(\frac{g_i}{c_i} \right)^{1/4} \cdot \sqrt{\frac{R_{\text{don}}}{\sum_{i=1}^k \sqrt{c_i \cdot g_i}}}. \quad (3.11)$$

Значення розмірів, визначених за допомогою співвідношень (3.9) і (3.11), залежать від положення граничної точки області працездатності. Тому оптимальні значення розмірів радіатора визначаються в ітераційному алгоритмі:

Крок 1. – Визначаються початкові розміри радіатора. Використовуються відомі процедури вибору і розрахунку радіаторів, наприклад [75].

Крок 2. – Обчислення теплового опору R .

Крок 3. – Визначаються параметри моделей (3.1), (3.2) і (3.6) або (3.10).

Крок 4. – Визначаються оптимальні значення розмірів елементів конструкції радіаторів з використанням виразів (3.9) або (3.11).

Крок 5. – Перевіряється умова:

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

де ε – похибка обчислень.

Якщо умова не виконується, то перехід на крок 2. Інакше – кінець алгоритму.

Запропонований алгоритм дає змогу проектувати ребристі радіатори з однаковими розмірами однотипних елементів. Такі радіатори використовуються для спрощення технологічного процесу виготовлення. Але розроблений алгоритм є універсальним і може застосовуватись при введенні обмежень на будь-які розміри елементів конструкції. При цьому змінюється тільки кількість змінних k . Алгоритм може також використовуватись для проектування інших типів радіаторів, наприклад, пластинчасто-штирових і радіаторів з циліндричними ребрами. Особливості цих радіаторів враховуються у виразах для цільових функцій.

3.2.3 Застосування методу

Особливість застосування методу розглянута на прикладі ребристого радіатора з алюмінієвого сплаву АІ2 з допустимим вхідним тепловим опором $R_{дон} = 2,73 \text{ К/Вт}$ для джерела тепла діаметром 28мм. Задавалися потужність джерела $P = 13,3 \text{ Вт}$, 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. В якості початкового наближення використовувався стандартний радіатор з розмірами $d_p = 5 \text{ мм}$, $l_p = 9 \text{ мм}$, $d_r = 1 \text{ мм}$, $l_r = 32 \text{ мм}$, $l = 63 \text{ мм}$ і масою $m = 110 \text{ г}$. Розглядалися М-, V- та MV-критерії.

Запропонований алгоритм відрізняється високою ефективністю, забезпечуючи збіжність ітераційного процесу за декілька ітерацій. Для оцінки збіжності алгоритму може служити залежність маси радіатора від кількості ітерацій в М- критерії, показаної на рис. 3.5, де q – кількість ітерацій.

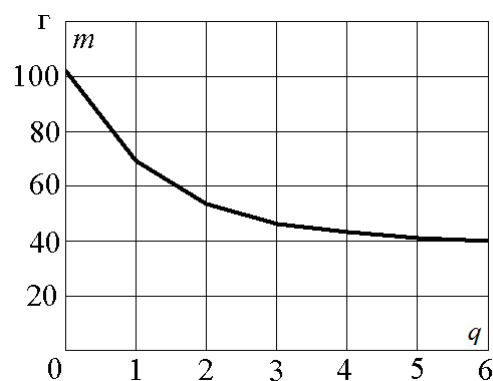


Рисунок 3.5 – Збіжність ітераційного процесу

З рисунка видно, що вже при 4-6 ітераціях процес оптимізації може бути завершений.

Оптимальні розміри радіаторів для різних критеріїв представлені в табл. 3.2.

Таблиця 3.2 – Розміри радіатора

Критерій	d_p , мм	l_p , мм	d_r , мм	l_r , мм	L , мм
Стандартний	5	9	1	32	63
M	1.4	9.6	0.27	59.9	66.2
V	5.1	7.9	1.1	34.3	64.2
MV	1.7	10	0.35	55.7	58.7

З табл. 3.2 видно, що вибір критерію призводить до істотної зміни розмірів ребер і міжреберних ділянок основи. У порівнянні зі стандартним радіатором M–критерій проектування приводила до зменшення товщини основи і ребер більш, ніж в 3 рази. Одночасно збільшувалася довжина ребер і міжреберних ділянок основи. Подібним чином змінювалися розміри і в MV–критерію проектування. Розміри радіаторів в V–критерії мало відрізнялися від стандартного.

Масогабаритні показники радіаторів наведені в табл. 3.3.

Таблиця 3.3 – Параметри радіатора

Критерій	m , г	V , см ³	mV , г·дм ³
Стандартний	102	165.5	16.9
M	39.7	281.5	11.2
V	106.9	162.1	17.3
MV	43.5	245.3	10.7

Як і слід було очікувати, найменшу масу забезпечує M–критерій проектування. У порівнянні зі стандартним, маса зменшилася в 2,5 рази. Об'єм цих радіаторів в порівнянні зі стандартним збільшився в 1,5 рази. До цих показників близькі радіатори MV–критерію проектування. 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.

У дослідженому радіаторі розміри однотипних елементів конструкцій приймалися однаковими, що не дозволило провести подальше покращення масогабаритних параметрів. Зняття цих обмежень дозволить поліпшити ці показники ще на 20-30%. При цьому кількість змінних в алгоритмі зростає до $4n - 1$.

Таким чином, запропоновано метод параметричного синтезу радіаторів, який використовує систему інженерного аналізу для обчислення максимальної температури. За допомогою цих систем визначаються параметри математичних моделей вхідних теплових опорів радіаторів. Особливістю запропонованого методу є використання тотожності дотичних гіперплощин до гіперповерхонь, сформованих цільовими і вихідними функціями та їх математичними моделями. Для спрощення процедури оптимізації запропоновано використання моделі цільової функції у вигляді гіперболи.

Розглянуто критерії мінімізації маси, об'єму і масогабарита. Процедура проектування реалізована у вигляді ітераційного алгоритму, який враховує нелінійні властивості теплових опорів радіатора. Алгоритм має високу збіжність, що дає змогу закінчити процедуру оптимізації за декілька ітерацій.

Порівняння масогабаритних показників стандартного радіатора і радіаторів M -, V - та MV -критеріїв проектування показало, що M - та MV -критерії проектування призводять до значного зменшення маси (більш ніж у 2,5 рази). Це супроводжується збільшенням об'єму в 1,5 рази. Параметри радіатора V -критерію незначно відрізняються від параметрів стандартного радіатора.

Подальше покращення масогабаритних показників радіаторів можливо при знятті обмежень на рівність однотипних розмірів радіатора. При цьому можливо знизити масу радіатора ще на 20-30%. Запропонований метод і алгоритм може використовуватися для проектування будь-яких радіаторів, в

тому числі пластинчасто-штирових і радіаторів з циліндричними ребрами. Зміна конструкції потребує тільки зміну виразів для цільової функції.

3.3. Алгоритм параметричного синтезу штирових радіаторів

3.3.1 Теплова модель штирового радіатора

Проведено дослідження однобічного штирового радіатора з коридорним розташуванням штирів. При побудові теплової моделі прийняті такі припущення:

- тепловідвід від радіатора здійснюється випромінюванням і вільною конвекцією повітря;
- коефіцієнт теплопровідності матеріалу не залежить від температури;
- розташування штирів горизонтальне;
- в області контакту основи напівпровідникового приладу і радіатора тепловий потік постійний;
- однотипні розміри всіх штирів однакові;
- відстані між рядами штирів однакові.

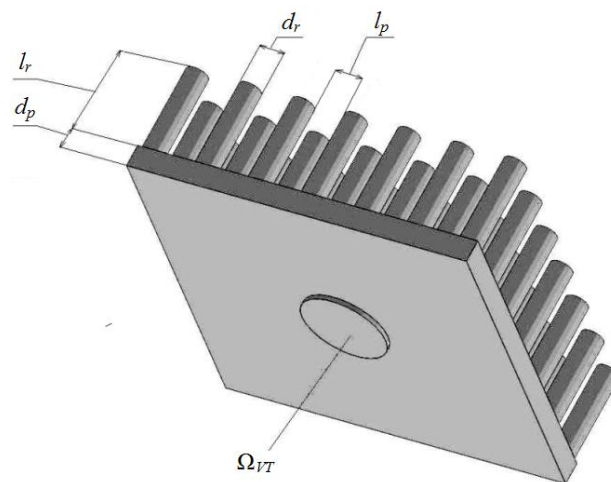


Рисунок 3.6 – Теплова модель штирового радіатора

Теплова модель штирового радіатора, побудована з урахуванням прийнятих припущень [63], показана на рис. 3.6, де:

- Ω_{VT} – область контакту основи напівпровідникового приладу і радіатора;
- d_p – товщина основи радіатора;
- l_p – відстань між штирями;
- d_r – діаметр штиря;
- l_r – висота штиря.

Для розв'язку оптимізаційної задачі створювалася модель у формі функції еліпсоїда, аналогічна (3.1), для якої $k=4$ та параметри, що оптимізуються, записуються у вигляді:

$$x_1 = \frac{1}{d_p}; \quad x_2 = \frac{1}{l_p}; \quad x_3 = \frac{1}{d_r}; \quad x_4 = \frac{1}{l_r}.$$

Коефіцієнти моделі обчислюються за виразом (3.3).

3.3.2 Оптимізація маси радіатора

Цільова функція М-критерію оптимізації штирового радіатора має вигляд:

$$m = \rho \left[((n-1)l_p + d_r n)^2 d_p + \frac{\pi n^2 d_r^2 l_r}{4} \right] \rightarrow \min, \quad (3.12)$$

де ρ – щільність матеріалу;

n – кількість рядів штирів радіатора.

З урахуванням відображення конструктивних параметрів в область зворотних величин цільова функція отримує вид:

$$f(X) = \rho \left[\left(\frac{n-1}{x_2} + \frac{n}{x_3} \right)^2 \cdot \frac{1}{x_1} + \frac{\pi n^2}{(2x_3)^2 x_4} \right] \rightarrow \min. \quad (3.13)$$

Оптимізаційна задача розв'язується при обмеженні (3.5). Так, для спрощення оптимізації використовується модель цільової функції у формі гіперболи (3.10), то оптимальні співвідношення для конструктивних параметрів штирового радіатора дорівнюють (3.9).

Алгоритм параметричного синтезу штирового радіатора є аналогічним до алгоритму, що розроблено для ребристого радіатора. Різниця тільки у кількості оптимізаційних параметрів та розрахунку коефіцієнтів моделі цільової функції у вигляді гіперболи.

3.3.3 Застосування методу

Особливість застосування методу розглянута на прикладі штирового радіатора з алюмінієвого сплаву АЛ2 з допустимим вхідним тепловим опором $R_{don} = 3 \text{ К/Вт}$ і діаметром основи корпусу напівпровідникового приладу 19 мм. Задавалася потужність джерела $P = 10 \text{ Вт}$ і температура навколишнього середовища $t_c = 40 \text{ }^\circ\text{С}$. Приймався коефіцієнт чорноти поверхні радіатора $\varepsilon = 0,91$.

Цим умовам задовольняє обраний радіатор з розмірами:

- діаметр штиря $d_r = 3 \text{ мм}$;
- висота штиря $l_r = 20 \text{ мм}$;
- товщина основи $d_p = 5 \text{ мм}$;
- крок штирів для вільної конвекції $l_p = 4 \text{ мм}$.

На квадратній основі радіатора розміщена штирова решітка коридорного типу. Кількість штирів в кожному ряду решітки становить $n = 13$.

Запропонований алгоритм забезпечує збіжність ітераційного процесу за декілька ітерацій, що підтверджує його високу ефективність. Для оцінки збіжності алгоритму використовувалися графіки, представлені на рис. 3.7., де q – кількість ітерацій.

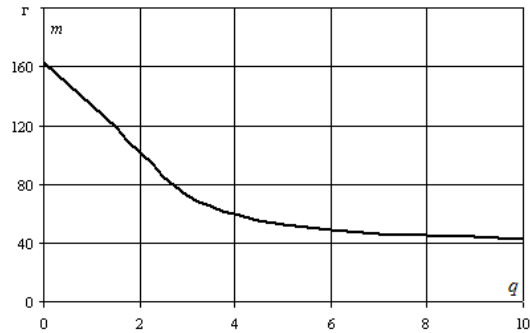


Рисунок 3.7 – Збіжність ітераційного процесу

З рисунка видно, що вже на 8-10 ітераціях процес оптимізації може бути завершений.

Розміри вихідного і оптимізованого радіаторів наведені в табл. 3.4.

Таблиця 3.4 - Розміри радіатора

Критерій	d_p , мм	l_p , мм	d_r , мм	l_r , мм
Вихідний радіатор	5	4	3	20
М	1.43	6.02	0.975	47.344

З табл. 3.4 видно, що вибір критерію призводить до істотної зміни розмірів ребер і ділянок основи. У порівнянні з вихідним радіатором М-критерій проектування приводить до зменшення товщини основи і діаметра штирів приблизно в 3 рази. Одночасно збільшувалися висота штирів і їх крок. Масагабаритні показники досліджуваних радіаторів наведені в табл. 3.5.

Таблиця 3.5 - Масагабаритні показники радіаторів

Критерій	m , г	V , см ³	mV , г·дм ³
Вихідний радіатор	163.6	189.2	31.0
М	43.2	351.7	15.2

Як і слід було очікувати, після оптимізації відбулося істотне зменшення маси радіатора. У порівнянні з вихідним радіатором маса зменшилася в 3,8

рази. Об'єм радіатора при цьому критерію в порівнянні з початковим збільшився в 1,9 рази.

Таким чином, запропонований метод параметричного синтезу штирових радіаторів, в якому використовуються системи інженерного аналізу, дає змогу значно зменшити масогабаритні показники. Процедура проектування штирового радіатора, аналогічно з ребристим, реалізована у вигляді ітераційного алгоритму, який враховує нелінійні властивості вхідних теплових опорів радіатора. Алгоритм має високу збіжність, дозволяючи закінчити процедуру оптимізації за декілька ітерацій.

Порівняння масогабаритних показників вихідного радіатора і радіатора М– критерію проектування показало, що М– критерій призводить до зменшення маси майже в 4 рази. За це доводиться розплачуватися збільшенням об'єму практично в 2 рази. Масогабаритний показник оптимізованого радіатора в порівнянні з початковим зменшився близько двох разів.

Подальше зменшення масогабаритних показників радіатора можливо при:

- використанні штирів трикутної або параболічної форми;
- зміні кількості штирів.

Це дозволить знизити масу радіатора ще на 20-30%. Запропонований метод і алгоритм може використовуватися для проектування двосторонніх штирових радіаторів і радіаторів із шаховим розташуванням штирів. У цих випадках необхідні тільки деякі зміни виразів для цільової функції.

3.4. Алгоритм параметричного синтезу пластинчасто-ребристих радіаторів

3.4.1 Теплова модель радіатора

Проектування радіаторів з використанням запропонованих методів показало, що товщина ребер виявляється занадто малою для організації традиційних технологічних процесів. Тому одним із шляхів вирішення даної

проблеми є реалізація ребристого радіатора у вигляді набору пластин, виготовлених методом штампування з наступним гнуттям.

Пластинчасто-ребристий радіатор являє собою конструкцію, зібрану з П-подібних пластин, з'єднану методом зварювання або клепаання [64]. Модель була побудована в системі інженерного аналізу. При побудові моделі прийняті припущення, аналогічні до п. 3.2.1.

Теплова модель пластинчасто-ребристого радіатора з прийнятими припущеннями показана на рис. 3.8, де d – товщина пластин радіатора, l_p – відстань між ребрами, l_r – висота ребра, L – висота радіатора, Ω – область кріплення напівпровідникового приладу.

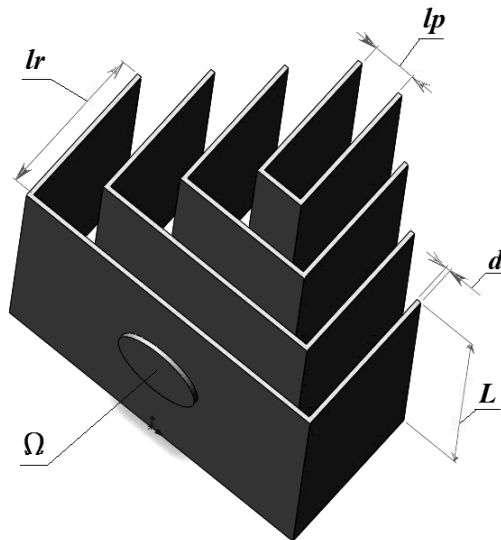


Рисунок 3.8 – Пластинчасто-ребристий радіатор (рознесений вигляд)

Для опису математичної моделі області працездатності пластинчасто-ребристого радіатора можна використовувати співвідношення (3.1), де $k = 4$ та параметри, що оптимізуються, мають вигляд:

$$x_1 = \frac{1}{d}; \quad x_2 = \frac{1}{l_p}; \quad x_3 = \frac{1}{l_r}; \quad x_4 = \frac{1}{L}.$$

3.4.2 Оптимізація маси радіатора

При оптимізації маси пластинчасто-ребристого радіатора використовується цільова функція:

$$m = \rho L [nd(l_p + d) + 2ndl_r] \rightarrow \min,$$

де ρ – щільність матеріалу;

n – кількість пластин.

З урахуванням обернення розмірів радіатора цільова функція набуває вигляду:

$$f(X) = \rho \frac{1}{x_4} \left(\frac{n}{x_1} \left(\frac{1}{x_1} + \frac{1}{x_3} \right) + \frac{2n}{x_1 x_2} \right) \rightarrow \max. \quad (3.14)$$

Оптимізаційна задача розв'язується при обмеженні (3.5). Для спрощення цільової функції застосовується також модель у формі гіперболи (3.6). Тоді розміри радіатора обчислюються за формулами (3.9).

У зв'язку з нелінійною залежністю вхідного теплового опору радіатора від його розмірів рішення оптимізаційної задачі проводиться за допомогою запропонованого у розділі 3.2 ітераційного алгоритму.

3.4.3 Проектування радіатора

Оптимізація маси проводилася для двох типів радіаторів: ребристого і пластинчасто-ребристого, показаного на рис. 3.8. Для ребристого використовувався сплав АД31, а для пластинчасто-ребристого АМс. Задавалася потужність $P = 10$ Вт, температура навколишнього середовища $t_c = 40^\circ\text{C}$,

допустимий вхідний тепловий опір $R_{don} = 3 \text{ К/Вт}$, коефіцієнт чорноти поверхні тепловідводу $\varepsilon = 0,91$.

Початковим наближенням при оптимізації обиралися розміри стандартних радіаторів. Обраний стандартний ребристий радіатор мав 8 ребер, а пластинчасто-ребристий виготовлявся з 4 пластин, що відповідало також 8 ребрам. Результати оптимізації радіаторів наведено в табл. 3.6 і табл. 3.7, де m – маса радіатора, V – об’єм, mV – масогабаритний показник.

Таблиця 3.6 – Параметри ребристого радіатора

Критерій	d_p	l_p	d_r	l_r	L	m	V	mV
Стандартний	5	9	1	32	63	104,3	165,5	17,3
М	1,44	10	0,215	62	65	37,0	295,7	10,9

Таблиця 3.7 – Параметри пластинчасто-ребристого радіатора

Критерій	$d_p = d_r$	l_p	l_r	L	m	V	mV
Стандартний	1	9	37	63	77,1	170,0	13,1
М	0,36	10	56,5	69	41,7	285,9	11,9

З табл. 3.6 і табл. 3.7 видно, що стандартний ребристий і відповідний йому пластинчасто-ребристий радіатор мають приблизно рівні об’єми, а маса пластинчасто-ребристого менше на 25%. Оптимізація дає змогу зменшити масу радіаторів в 2-3 рази, при цьому об’єм оптимізованих радіаторів збільшується майже до 2 разів. Слід зазначити, що обидві оптимізовані конструкції мають близькі показники об’єму, але маса ребристого радіатора менше на 10%.

Таким чином, проведене дослідження показало, що запропонований метод параметричного синтезу ребристих радіаторів виявився ефективним і для пластинчасто-ребристих радіаторів. Метод забезпечує таку ж збіжність і призводить до аналогічних масогабаритних показників.

Порівняння масогабаритних параметрів ребристого і пластинчасто-ребристого радіаторів показало, що, хоча стандартні ребристі радіатори мають

найгірші показники, але оптимізовані пластинчасто-ребристі поступаються ребристим. У першому випадку це відмінність становить 30%, у другому – 10%. Перевагою пластинчасто-ребристого радіатора є більш висока технологічність.

3.5. Висновки

Таким чином, було розроблено методику побудови теплових моделей радіаторів у системі SolidWorks (модуль FlowSimulation), за допомогою якої було підвищено точність розрахунків теплового опору радіаторів різних конструкцій та проведена оптимізація їх масогабаритних показників.

Вперше запропонована модель цільової функції у формі гіперболи оптимізації маси радіатора, що формується за допомогою дотичних гіперплощин до області працездатності, дає можливість отримати оптимізаційні співвідношення та спростити процедуру оптимізації.

Вперше розроблено метод параметричного синтезу радіаторів та функціональних вузлів з інтегрованими тепловідводними елементами з використанням системи інженерного аналізу, що дає можливість проводити оптимізацію масогабаритних параметрів з урахуванням конструктивних та технологічних обмежень, які виникають при конструюванні радіоелектронних апаратів. Використання методу для різних видів радіаторів або зміни критерію проектування потребує визначення тільки нових оптимізаційних співвідношень.

Було проведено оптимізацію масогабаритних показників ребристого, штирового та пластинчасто-ребристого радіаторів. Отримані дані свідчать, що застосування розробленого методу оптимізації масогабаритних показників радіаторів дає змогу зменшити масу ребристих на 50-65%, а штирових на 75%. При цьому їх об'єм зростає лише на 30-50%.

Порівняння ребристого радіатора з пластинчасто-ребристим показує, що останній має масу всього на 10% більше при рівних об'ємах, але в деяких випадках може бути технологічнішим.

Запропонований метод може використовуватись в системах автоматизованого проектування. Для цього необхідно розробити програмне забезпечення, яке реалізує інтерфейс між користувачем та системою автоматизованого проектування.

4. АВТОМАТИЗОВАНА СИСТЕМА ПРОЕКТУВАННЯ РАДІАТОРІВ РАДІОЕЛЕКТРОННИХ АПАРАТІВ

4.1. Структура автоматизованої системи проектування радіаторів

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-орієнтований підхід [107]. Такій підхід вимагає на етапі формування системних вимог побудови UML-моделі [108]. UML-модель містить набір діаграм, які відображають різноманітні засоби представлення автоматизованої системи. Для визначення основних етапів процесу проектування радіаторів розроблено діаграму діяльності. Для опису поведінки системи з точки зору користувача розроблено діаграму варіантів використання автоматизованої системи проектування радіаторів.

Діаграму діяльності наведено на рис. 4.1, на якій показано опис процесу автоматизованого проектування радіаторів. Аналіз цієї діаграми діяльності надав можливість визначити основні проектні процедури: аналіз вхідних даних, вибір критеріїв оптимальності та конструкції радіатору, параметричний синтез радіатора, створення тривимірної геометричної моделі та оформлення конструкторсько-технологічної документації. Процедури аналізу вхідних даних містять введення параметрів зовнішніх умов: температури навколишнього середовища, потужностей ЕРЕ, максимально допустимої температури перегріву корпусів ЕРЕ. На наступному етапі аналізуються конструкторсько-технологічні обмеження. Наприклад, згідно з технологією виготовлення можливо задавати обмеження на мінімальні товщини ребра та основи.

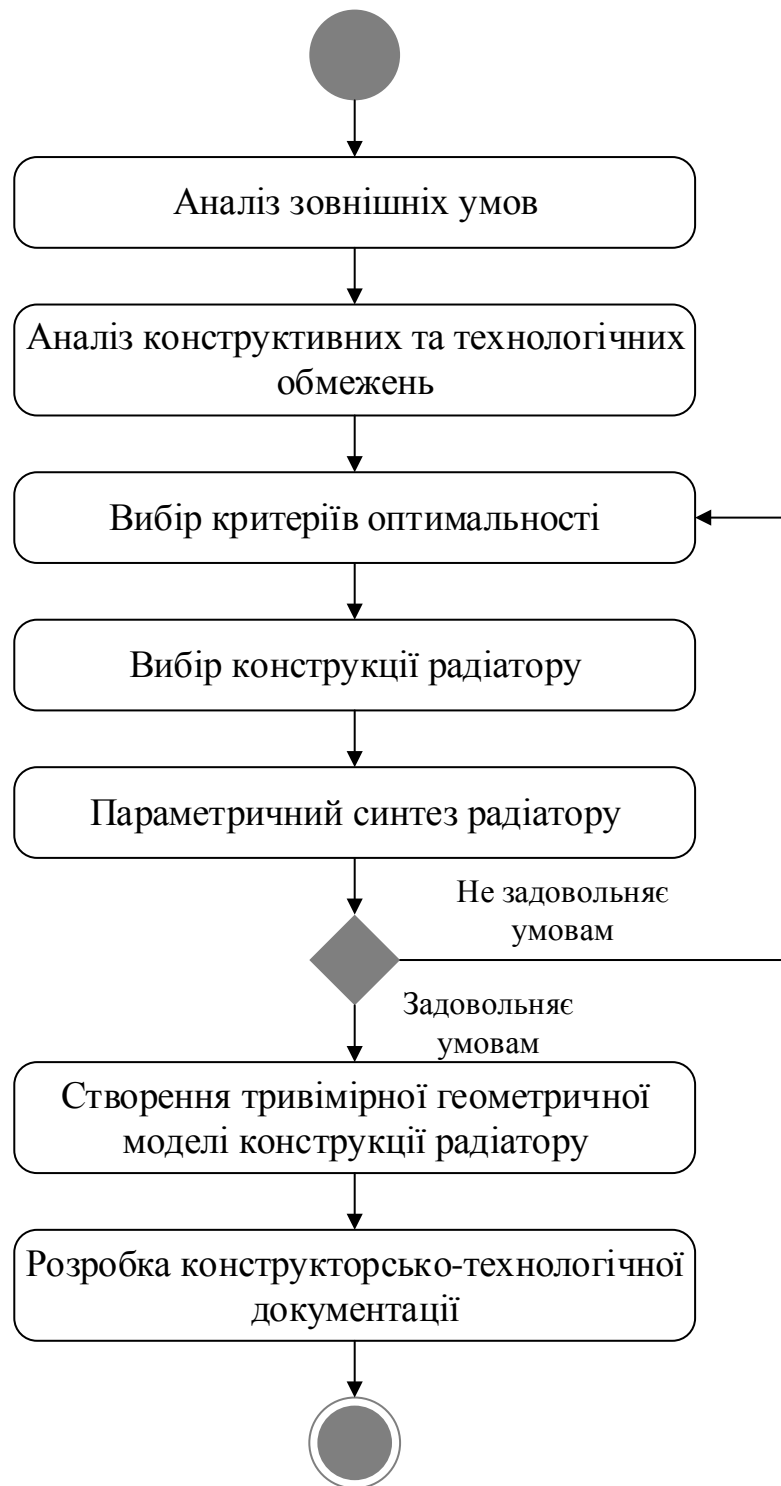


Рисунок 4.1 – Діаграма діяльності процесу автоматизованого проектування радіаторів

Конструктивні обмеження можуть враховувати компоновку РЕА. Наприклад, максимальні габаритні розміри радіатора обмежуються габаритами корпусу РЕА. Критерії оптимальності, такі як: критерій мінімальної маси,

критерій мінімального об'єму та комплексний масогабаритний критерій обирається згідно з умовами експлуатації РЕА.

Розроблені математичні моделі та методи використовуються в автоматизації процедур параметричного синтезу радіаторів з оптимальними масогабаритними показниками. Для автоматизації процедур створення тривимірної геометричної конструкції радіатора та оформлення конструкторсько-технологічної документації застосовуються зовнішні САПР.

Процес проектування є ітераційним, в якому виконується параметричний синтез для всіх заданих типів конструкцій радіаторів (наприклад, ребристого, штирового та пластинчасто-ребристого). Вибір найкращого рішення проводиться порівнянням отриманих оптимальних конструкцій за обраним критерієм.

Для концептуального опису автоматизованої системи проектування радіаторів була створена діаграма варіантів її використання, яка показана на рис. 4.2. Ця діаграма надає можливість представити систему з точки зору користувача, визначити основні функціональні характеристики системи та відобразити зовнішній інтерфейс. Користувачем системи є інженер-конструктор радіоелектронної апаратури, який вводить в автоматизовану систему фактори зовнішніх умов, задає конструкторсько-технологічні обмеження, обирає критерій оптимальності. На основі введеної інформації автоматизована система вибирає з бази даних стандартні параметри для заданих типів радіаторів та проводить параметричний синтез.

При параметричному синтезі в автоматизованій системі вирішуються задачі: оптимізація конструктивних параметрів, врахування конструктивно-технологічних обмежень, побудова тривимірної геометричної моделі та аналіз теплового режиму. Для побудови тривимірної геометричної моделі конструкції, оформлення конструкторської документації та моделювання теплових режимів необхідно використовувати зовнішню САПР. В результаті параметричного синтезу генеруються декілька варіантів конструкцій різних типів радіаторів. Найкращий результат обирається користувачем.

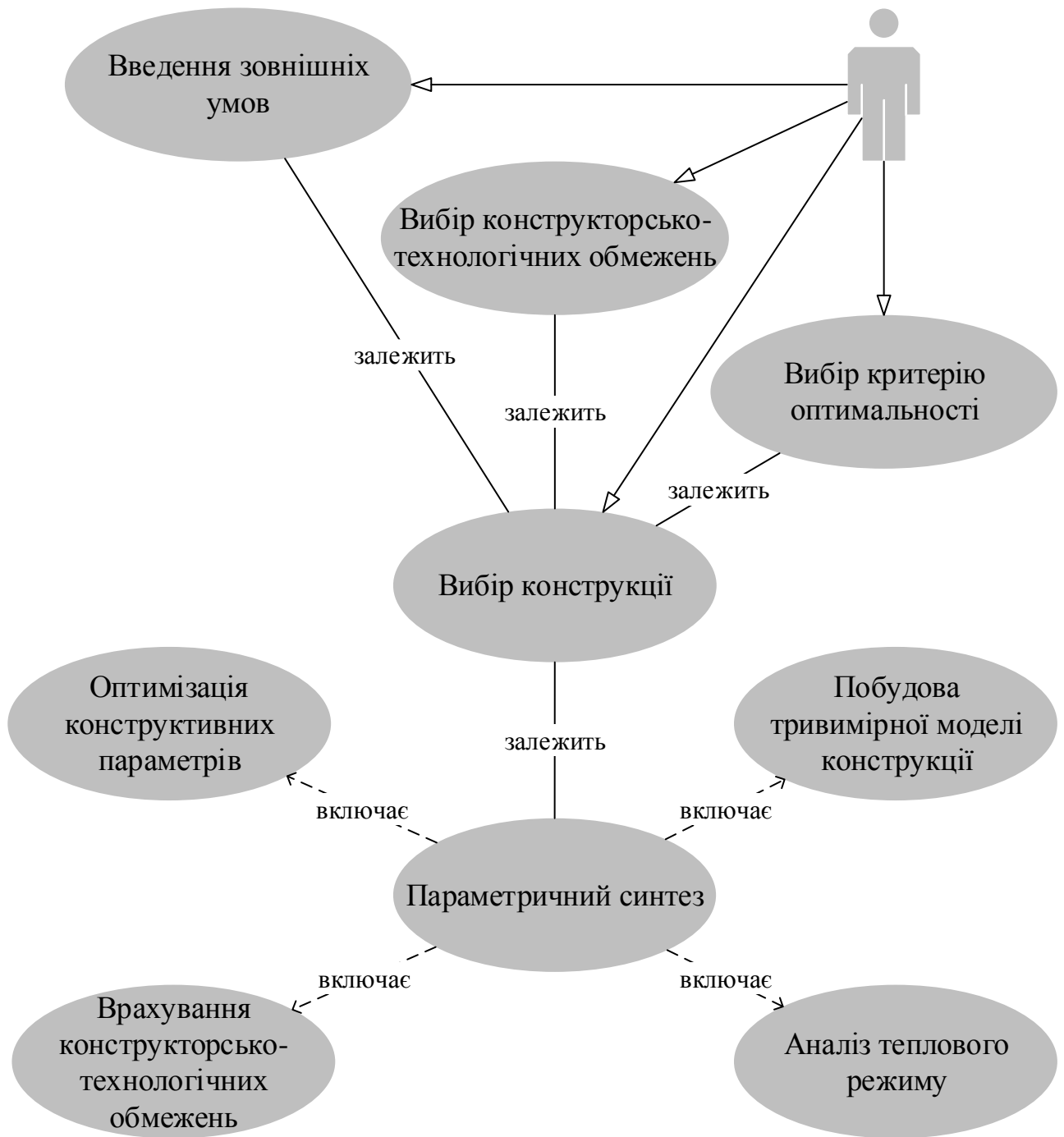


Рисунок 4.2 – Діаграма варіантів використання автоматизованої системи проектування радіаторів

Аналіз діаграми варіантів використання автоматизованої системи проектування радіаторів надав можливість сформулювати вимоги до програмного забезпечення. Програмне забезпечення повинно виконувати наступні функції:

- 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 САПР;
- перегляд вибраної геометричної моделі в САПР;
- генерація звіту з результатами, отриманими на кожній ітерації роботи алгоритму параметричного синтезу;
- перегляд вмісту бази даних розмірів стандартних радіаторів;
- зберігання даних результатів параметричного синтезу на кожній ітерації в базі даних.

Стандартні розміри радіаторів можуть бути обрані за галузевими стандартами або стандартами підприємств, наприклад [75–77].

Автоматизована система складається з програмних модулів, які забезпечують функціональність системи: введення початкових даних, розрахунок оптимальних конструктивних параметрів для різних типів конструкцій радіаторів, формування тривимірних моделей конструкцій радіаторів, робота з базою даних стандартних конструкцій та генерація звіту за результатами роботи [65, 66]. Структурну схему розробленої системи наведено на рис. 4.3.

Основними компонентами системи є:

- діалогова система забезпечує інтерфейс роботи з користувачем та дає змогу вибрати робочий каталог програми для зберігання результатів роботи та моделей, введення даних та перегляд результатів;
- модуль формування даних для оптимізації – реалізує збереження в файл введених значень потужності, максимально допустимої температури перегріву, температури навколишнього середовища, а також розрахованих в системі інженерного аналізу максимальних температур радіатора при номінальних значеннях параметрів та їх відхиленнях на кожній ітерації;

- модуль формування геометричної тривимірної моделі радіатора – реалізує побудову конструкції радіатора в зовнішній САПР та її збереження;
- модуль оптимізації конструкції радіатора – реалізує алгоритм параметричного синтезу конструктивних параметрів радіатора за різними критеріями, а також визначення його масогабаритних параметрів;
- модуль роботи з базою даних – відповідає за вибір з бази даних конструктивних параметрів стандартних радіаторів;
- модуль для роботи з файлами параметрів радіаторів – відповідає за перегляд, редагування та збереження текстових файлів з даними.

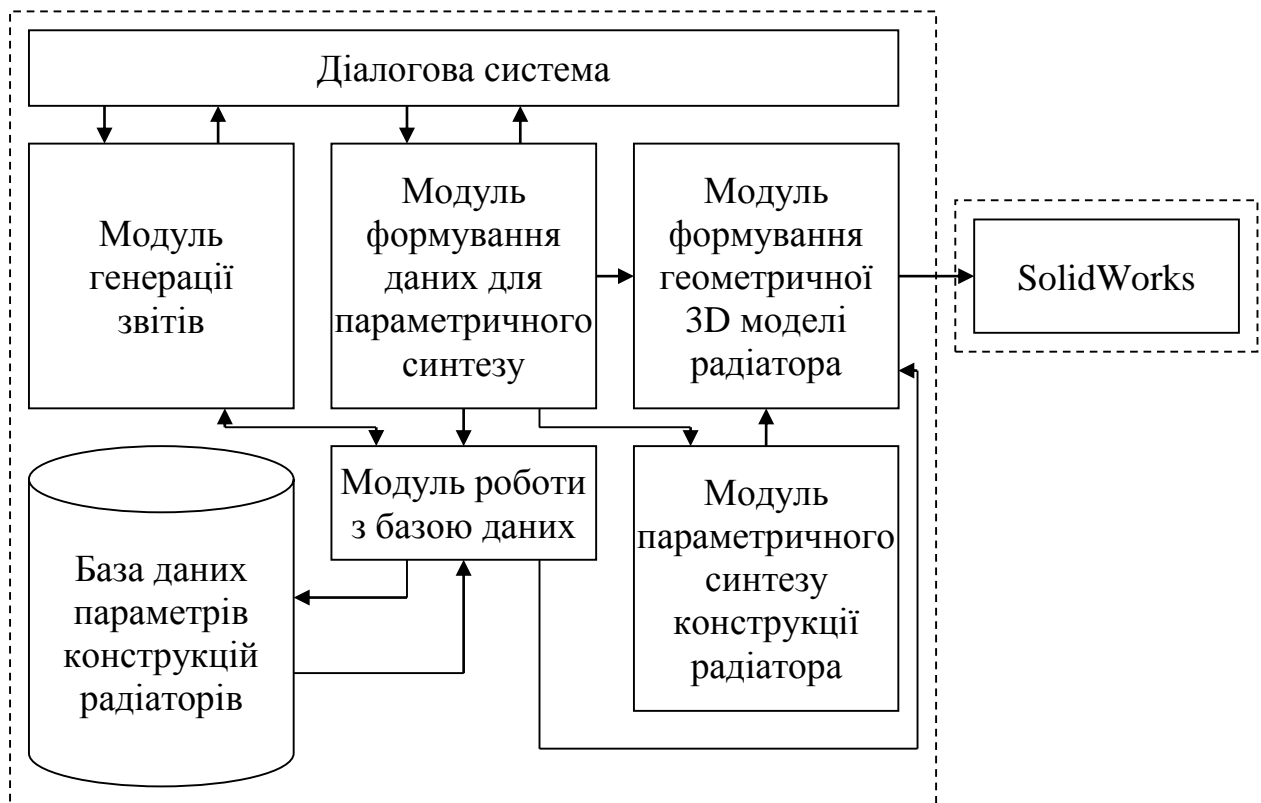


Рисунок 4.3 – Структурна схема автоматизованої системи

Для вибору стандартних розмірів конструкцій, згідно введених користувачем даних, використовується база даних.

Діалогова система включає в себе:

- процедуру заповнення полів з даними: теплової потужності радіатора, максимально допустимої температури контакту з прибором та температури навколишнього середовища;

- процедуру заповнення полів максимальних температур радіатора при номінальних значеннях параметрів та їх відхиленнях на кожній ітерації;

- процедуру перегляду сформованих геометричних моделей конструкцій;

- процедуру вибору робочого каталогу програми.

Модуль формування даних для оптимізації включає в себе:

- процедуру збереження в файл введених початкових даних, а також розрахованих в системі інженерного аналізу максимальних температур радіатора при номінальних значеннях конструктивних параметрів та їх відхиленнях на кожній ітерації;

- процедуру зчитування параметрів конструкції з текстового файлу;

- процедуру аналізу стандартних параметрів конструкції радіатора для оцінки впливу їх відхилень на значення максимальної температури: товщини основи, відстані між ребрами, товщини ребра, висоти ребра та радіатора.

Модуль формування геометричної тривимірної моделі радіатору включає в себе:

- процедуру побудови геометричної моделі конструкції радіатора;

- процедуру побудови геометричної моделі площини контакту радіатора з радіоелементом для аналізу теплового режиму;

- процедуру збереження геометричної моделі.

Модуль оптимізації конструкції радіатору включає в себе:

- процедуру визначення масогабаритних параметрів радіатора;

- процедуру визначення оптимальних параметрів конструкції за різними критеріями;

- процедуру обчислення оптимальних параметрів конструкції радіатора для оцінки впливу їх відхилень на значення максимальної температури;

- процедуру перевірки умов досягнення заданої точності та завершення роботи оптимізаційного алгоритму;

– процедуру збереження у файл результатів роботи алгоритму на кожній ітерації.

Модуль роботи з базою даних включає в себе:

– процедуру вибору з бази даних розмірів стандартних радіаторів, згідно введених користувачем даних;

– процедуру збереження розмірів обраних стандартних радіаторів у текстовий файл.

Модуль роботи з файлами параметрів радіаторів включає в себе:

– процедуру для перегляду файлів;

– процедуру для редагування текстових файлів;

– процедуру збереження обраних файлів.

Автоматизована система реалізована на базі алгоритму проектування радіаторів, схему якого показано на рис. 4.4. Першим кроком алгоритму є введення початкових даних: теплової потужності P , максимально допустимої температури контакту з прибором t_{max} , температури навколишнього середовища t_c , конструкторсько-технологічних обмежень x_{i_lim} . У відповідності до технічного завдання обирається критерій проектування: M–, V– або MV–. Далі система обирає з бази даних розміри стандартних радіаторів, згідно введених даних, після чого створюються тривимірні моделі конструкцій різних типів радіаторів. Наступним етапом роботи системи є оптимізація параметрів цих моделей за обраним критерієм проектування. Для цього використовуються запропоновані алгоритми параметричного синтезу ребристого, штирового та пластинчасто-ребристого радіаторів.

В проектній процедурі параметричного синтезу виконується розрахунок масогабаритних параметрів m та V , теплового опору R та геометричних параметрів у вигляді обернених значень X для кожного типу конструкцій.

Наступним кроком алгоритму є розрахунок коефіцієнтів моделі обмеження у формі функції еліпсоїда та моделі цільової функції у вигляді гіперболи. Для цього обчислюються коефіцієнти впливу зміни геометричних параметрів на тепловий опір.



Рисунок 4.4 – Схема алгоритму автоматизованого проектування радіаторів

Для визначення коефіцієнтів впливу параметрів радіаторів на функцію теплового опору будуються допоміжні тривимірні моделі конструкцій радіаторів зі зміненими почергово геометричними параметрами. Після побудови допоміжних моделей проводиться аналіз теплового режиму в системі інженерного аналізу SolidWorks (модуль FlowSimulation). Після кожної ітерації створюється конструкція з новими параметрами та допоміжні моделі. Перевіряється умова відповідності до конструкторсько-технологічних вимог, у разі їх не виконання обираються граничні значення параметрів конструкцій. Умовою завершення алгоритму проектування є перевірка близькості значень масогабаритних параметрів на сусідніх ітераціях (точність проектування). Результатом роботи алгоритму є набір тривимірних моделей конструкцій радіаторів заданих типів, з яких користувач обирає потрібний тип конструкції.

В програмі передбачена можливість завершення роботи алгоритму проектування та збереження результатів на будь-якому кроці. Процедуру оптимізації можна розпочати знову з останньої збереженої ітерації. Після виконання процедури оптимізації автоматизована система формує звіт, що містить дані оптимізованої конструкції, значення її параметрів на кожній ітерації роботи алгоритму, та виконує побудову конструкції радіатора за новими оптимізованими параметрами.

В програмному забезпеченні передбачено можливість перегляду довідкової інформації: бази даних стандартних розмірів, текстового файлу зі звітом результатів, виду стандартного радіатора з нанесеними розмірами.

Програмне забезпечення реалізовано на мові програмування C# [105], що дозволило організувати взаємодію з САПР через API інтерфейс. Тривимірні моделі конструкції радіатора створюються в системі SolidWorks, а обчислення теплового опору проводиться в модулі FlowSimulation.

Таким чином, розроблено структуру програмного забезпечення автоматизованої системи оптимізації конструкцій радіаторів для охолодження радіоелектронних апаратів, яка призначена для автоматизації процесу побудови геометричної моделі конструкції радіатора в САПР та оптимізації його

конструкції за різними критеріями проектування. Розроблено взаємозв'язки між компонентами програмного забезпечення та алгоритм його функціонування.

4.2. Інформаційне забезпечення автоматизованої системи проектування радіаторів

Вхідними даними для роботи програми є потужність EPE, максимально допустима температура контакту з прибором, температура навколишнього середовища та конструкторсько-технологічні обмеження.

Результатами роботи програми є текстові файли звітів та файл тривимірної моделі конструкції радіатора. Автоматизована система вибирає початкове наближення значень параметрів обраного типу радіатора з бази даних та зберігає результати розрахунків на кожному етапі параметричного синтезу. При побудові стандартного радіатора його параметри, а також введені користувачем вхідні дані, зберігаються до бази даних і у текстовий файл звіту Reports.txt. Результати параметричного синтезу на кожній ітерації зберігаються у базі даних: оптимізовані параметри конструкції, маса радіатора, його об'єм, а також розраховані у модулі FlowSimulation максимальні температури радіатора при номінальних значеннях параметрів та їх відхиленнях.

Інформаційну модель конструкції радіатора можна записати з використанням наступного виразу:

$$I = (Type_R, Dim_R, Lim_R, Ext_Cond, T_{max}, M, V)$$

де $Type_R$ – тип радіатора, Dim_R – розміри радіатора, Lim_R – конструкторсько-технологічні обмеження, Ext_Cond – зовнішні умови, T_{max} – максимально допустима температура, M – маса радіатора, V – об'єм радіатора.

Послідовність представлення інформації в текстовому файлі показана на рис. 4.5.

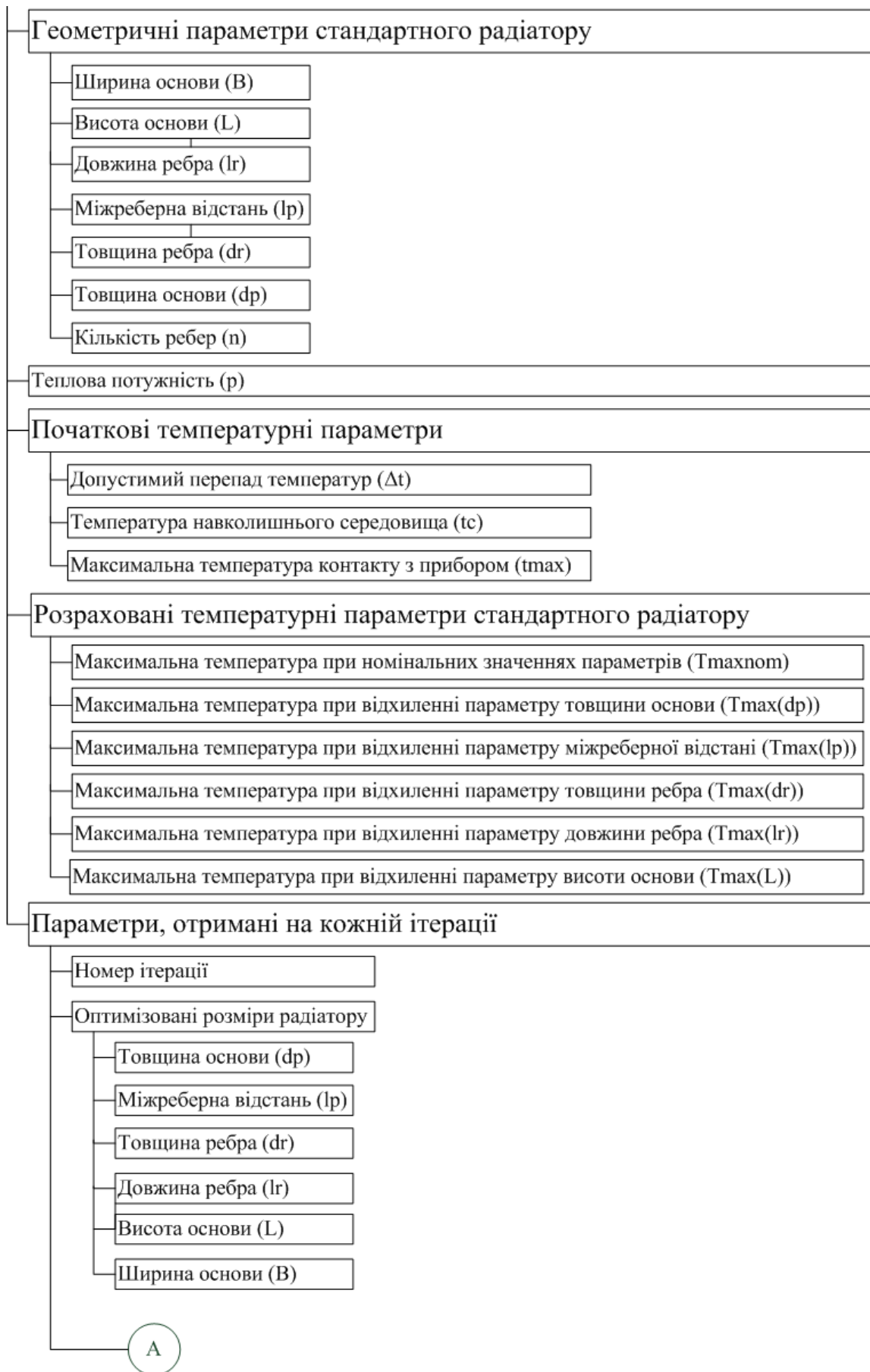
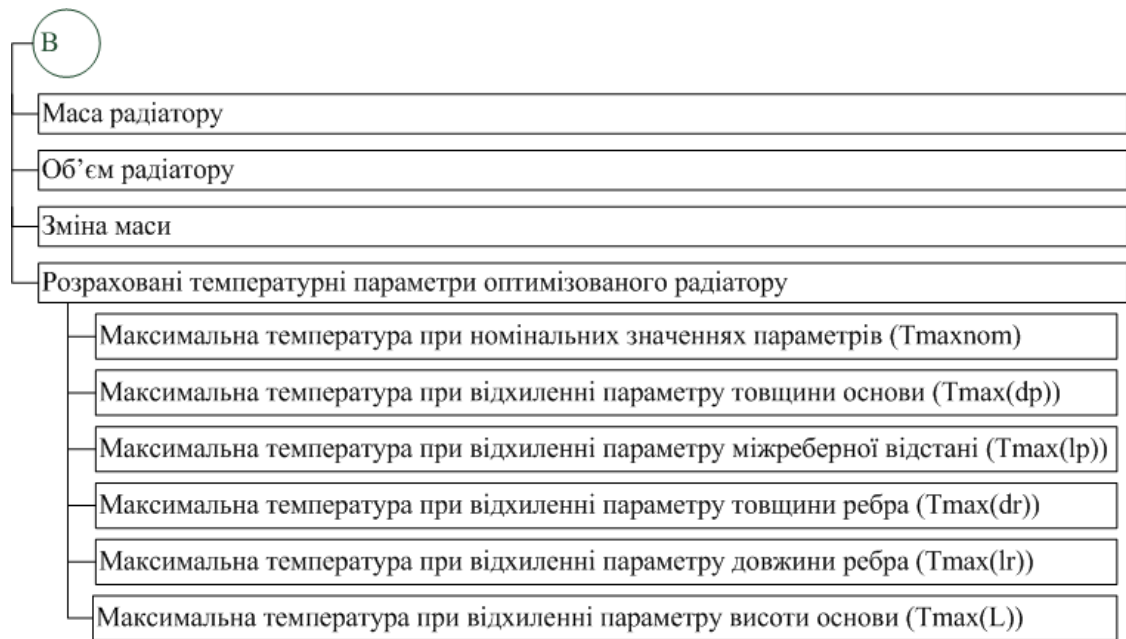


Рисунок 4.5 – Представлення інформації в файлі результатів



Продовження рисунка 4.5 – Представлення інформації в файлі результатів

Для вибору розмірів конструкції, згідно введених користувачем даних, використовується база даних, що містить розміри стандартних радіаторів. Концептуальна модель цієї бази наведена на рис. 4.6.

В моделі представлені такі сутності:

- «Optimization» (містить початкові дані для оптимізації, такі як потужність, температура навколишнього середовища, максимально допустима температура перегріву);
- «Heatsinks» (містить геометричні розміри стандартних конструкцій радіаторів та їх теплові характеристики);
- «Heatsinks Optimized» (містить геометричні розміри радіаторів, їх теплові характеристики та масогабаритні параметри на кожній ітерації);
- «Heatsinks Limitation» (містить конструктивні та технологічні обмеження для параметрів радіаторів, які оптимізуються).

Сутності «Optimization» та «Heatsinks» пов'язані відношенням один-до-одного, через те, що кожній новій оптимізації відповідає конкретне початкове наближення.

Сутності «Optimization» та «Heatsinks Limitation» пов'язані відношенням один-до-одного, через те, що кожній новій оптимізації відповідають задані конструктивно-технологічні обмеження.

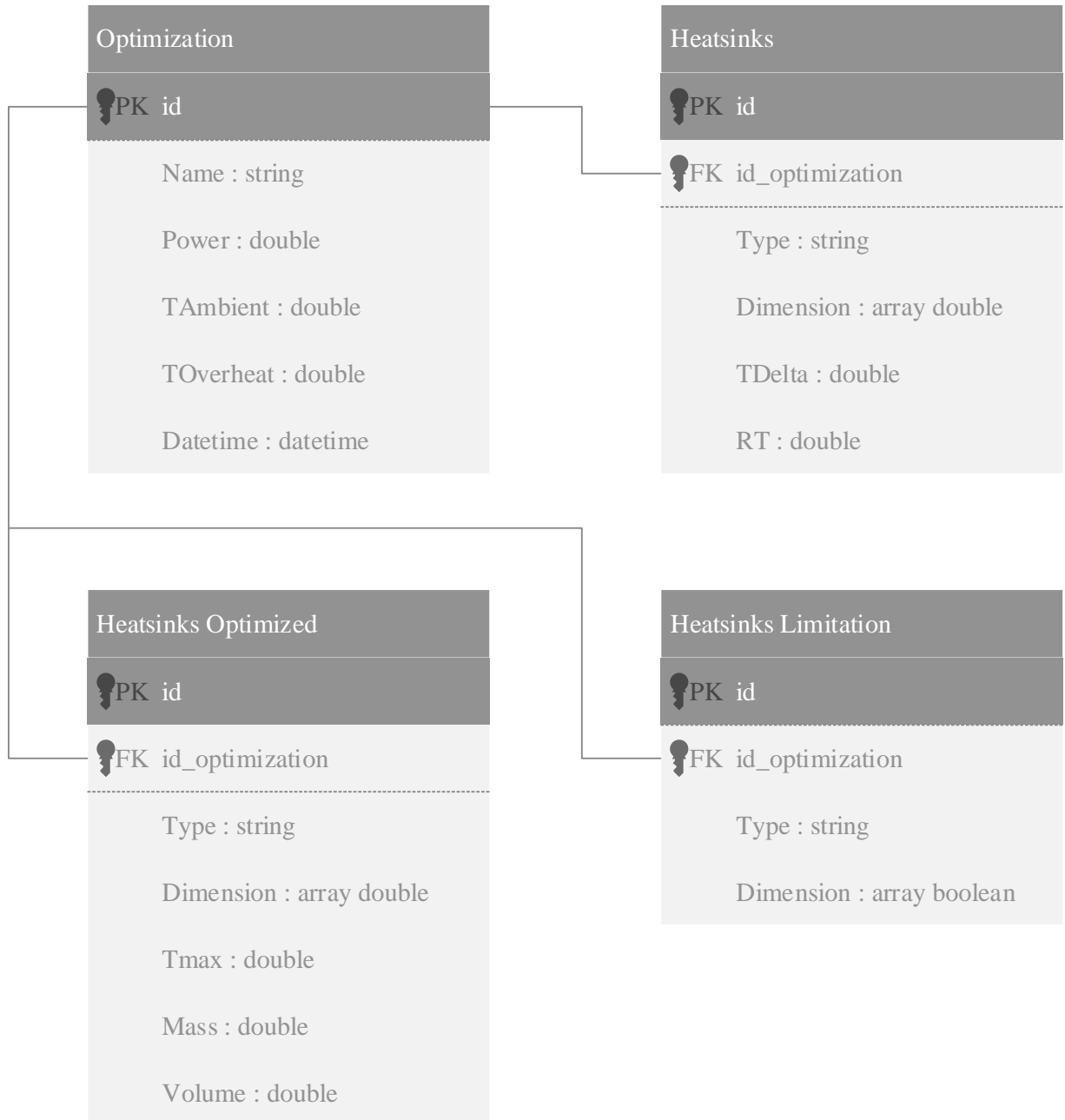


Рисунок 4.6 – Концептуальна модель бази даних

Сутності «Optimization» та «Heatsinks Optimized» пов'язані відношенням один-до-багатьох, через те, що кожній новій оптимізації відповідають декілька оптимальних значень.

Автоматизована система орієнтована на підприємства радіоприладобудівної галузі і може використовуватись для мінімізації маси, об'єму та масогабариту радіаторів охолодження радіоелектронних апаратів.

Основним інструментом автоматизованої системи, що реалізує інтерфейс із користувачем, є функція MainForm(), яка виводить на екран головне вікно автоматизованої системи з назвою «Оптимізація конструкцій радіаторів». В головному вікні з допомогою елементу menuStrip формується головне меню програми. Приклад відображення головного вікна з меню автоматизованої системи наведений на рис. 4.7.

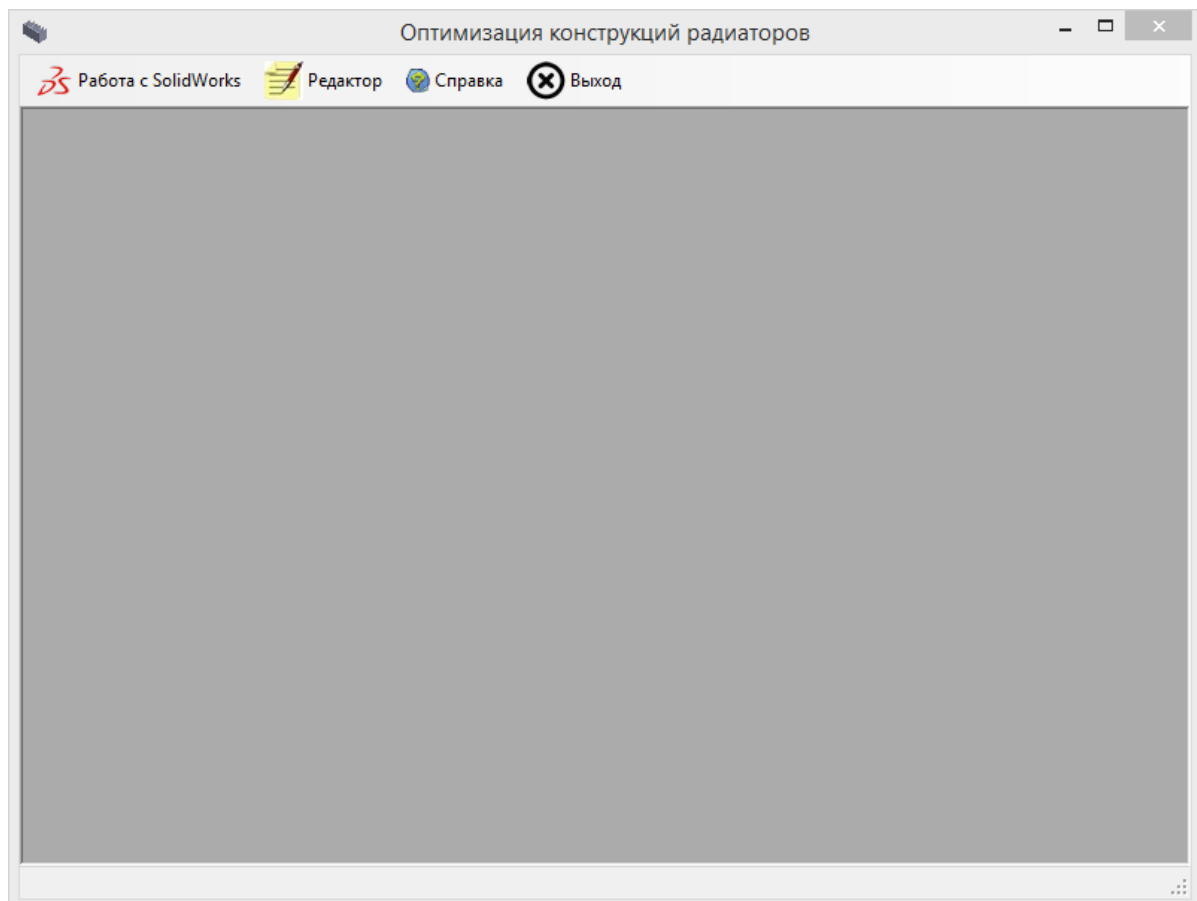


Рисунок 4.7 – Головне вікно автоматизованої системи

В головному меню містяться такі пункти:

- Робота з SolidWorks;
- Редактор;
- Довідка;
- Вихід.

Пункт меню «Робота з SolidWorks» викликає вікно для введення теплової потужності, максимально допустимої температури контакту з прибором, температури навколишнього середовища з можливістю побудови радіатора згідно обраного з бази даних, максимальних температур, каталогу для роботи з програмою, побудованих моделей та зчитування з файлу розмірів конструкції стандартного радіатора для початку роботи оптимізаційного алгоритму або його продовження. Вид вікна показано на рис. 4.8.

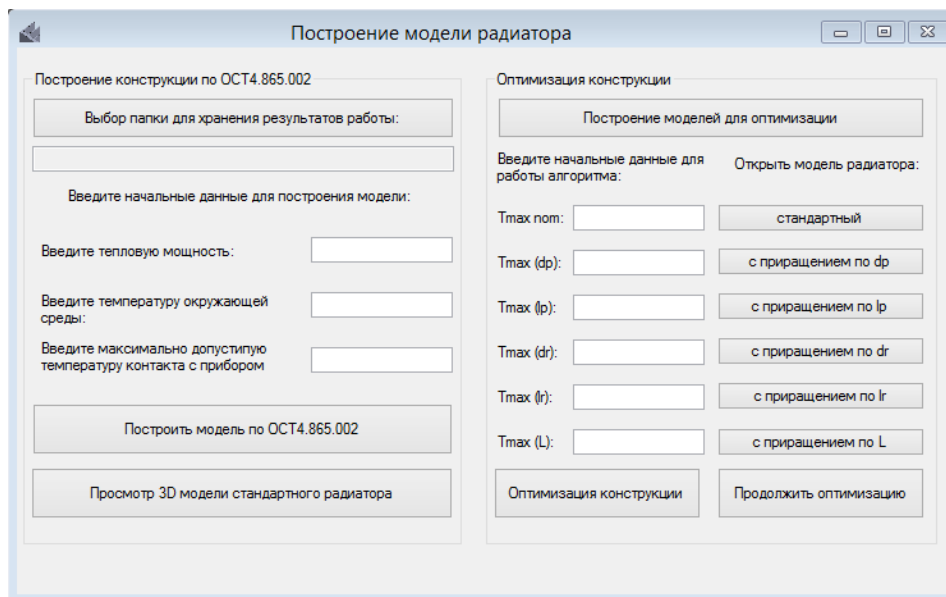


Рисунок 4.8. – Вікно введення вхідних даних для побудови стандартного ребристого радіатора

Для побудови стандартного ребристого радіатора треба обрати каталог для роботи, ввести вхідні дані (теплову потужність, максимально допустиму температуру контакту з прибором, температуру навколишнього середовища) та натиснути на кнопку «Побудувати модель за OST4.865.002». Після цього буде вибрано з бази даних стандартних радіаторів розміри конструкції та побудовано за ними модель, приклад якої показано на рис. 4.9.

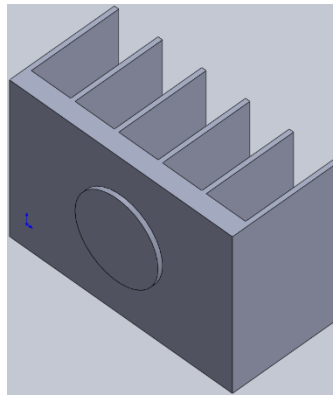


Рисунок 4.9 – Приклад побудованого стандартного радіатора

Розміри стандартного радіатора будуть також збережені в текстовий файл з назвою OSTsizes.txt, розташований в робочому каталозі. Приклад файлу показано на рис. 4.10.

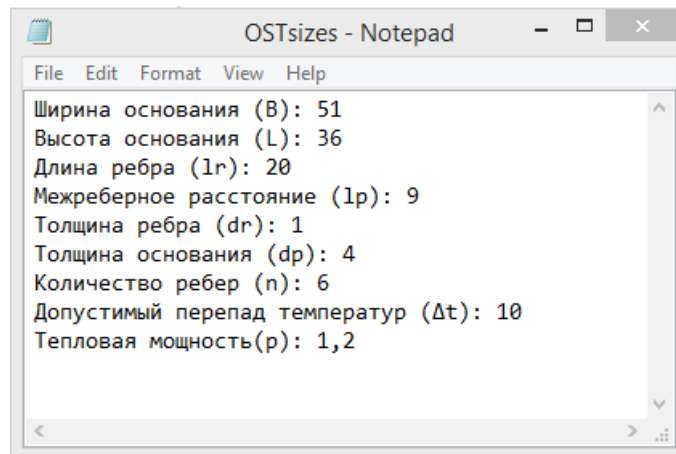


Рисунок 4.10. – Приклад файлу з розмірами стандартного радіатора

Для перегляду побудованого стандартного радіатора треба натиснути на кнопку «Перегляд 3D моделі стандартного радіатора».

Для початку оптимізації конструкції треба натиснути на кнопку «Побудова моделей для оптимізації» та обрати файл з розмірами (OSTsizes.txt), після чого буде побудовано п'ять допоміжних моделей модифікованого радіатора (почергово змінені товщина основи, відстань між ребрами, їх товщина, висота та висота радіатора). Після виконання аналізу теплового режиму для цих моделей та введення максимальних температур для них треба натиснути на кнопку «Оптимізація конструкції». На кожній ітерації буде побудовано нову модель, її модифікації, виведено на екран форму для введення

їх максимальних температур та записано до файлу OSTsizes.txt результат роботи алгоритму на поточній ітерації. Після завершення алгоритму буде згенеровано нову модель. На кожній ітерації буде виведено повідомлення для можливості завершити роботу з алгоритмом. Якщо потрібно буде її продовжити, треба натиснути на кнопку «Продовжити оптимізацію» та обрати файл з параметрами OSTsizes.txt. Для відкриття побудованої моделі натисніть на відповідну кнопку.

Пункт меню «Редактор» необхідний для редагування та перегляду збережених файлів. В ньому містяться такі пункти меню:

- «Файл» дає можливість відкрити, закрити текстовий файл та зберегти зміни в ньому, якщо потрібно;
- «Вихід» закриває вікно.

Вид вікна «Редактор» показано на рис. 4.11.

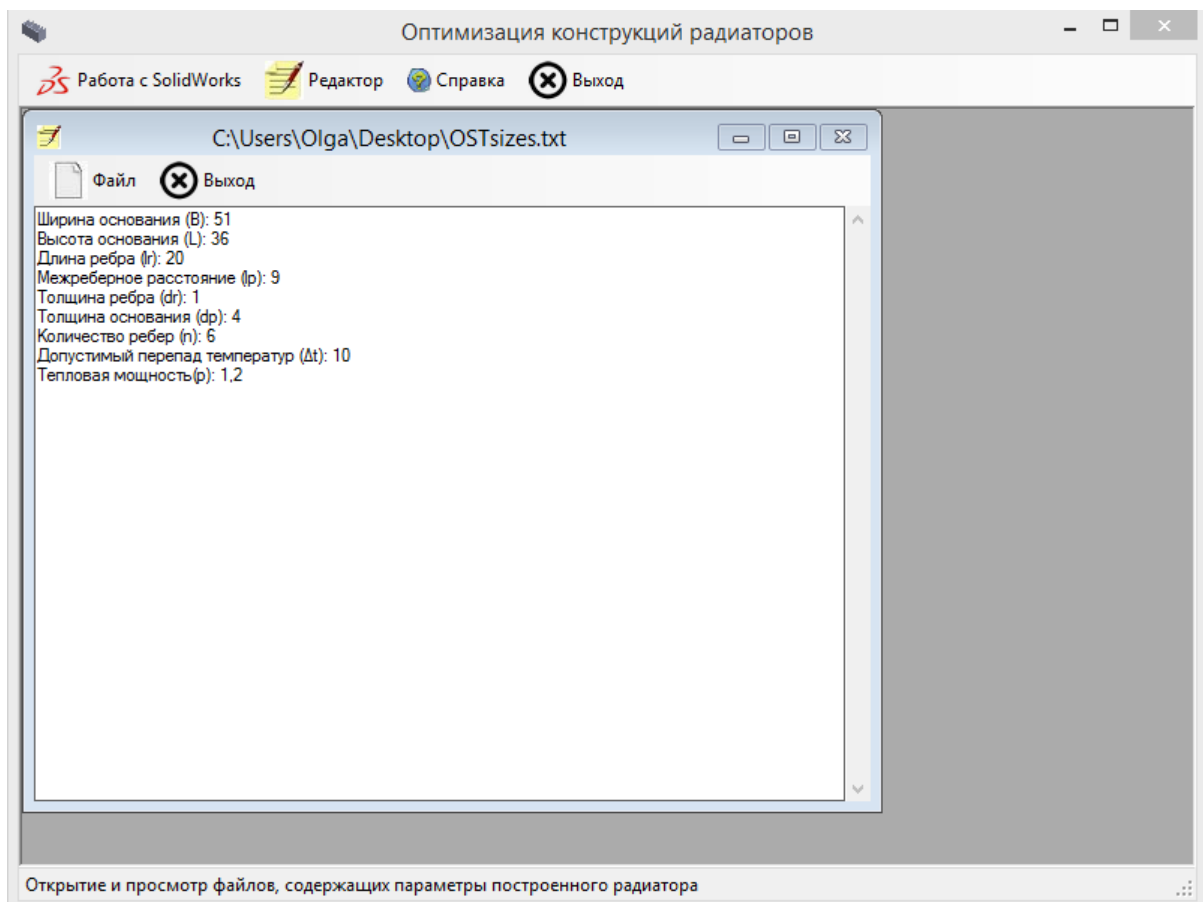


Рисунок 4.11 – Вікно перегляду та редагування збережених файлів

Пункт меню «Файл» містить наступне підменю:

- Відкрити – надає можливість відкриття файлу;
- Зберегти – надає можливість збереження змін у файлі;
- Закрити – закриває відкритий файл.

Пункт меню «Довідка» надає можливість перегляду необхідної інформації для роботи з системою та містить такі пункти підменю:

- Перегляд бази даних;
- Перегляд 3D моделі радіатора з розмірами.

Для перегляду вмісту бази даних розмірів стандартних радіаторів потрібно обрати відповідний пункт підменю («Перегляд бази даних»). Результат виконання показано на рис. 4.12.

L	n	B	dp	lr	Δt	P
36	6	51	4	20	10	1,2
50	7	61	4	20	10	1,8
63	8	71	5	20	10	2,4
80	10	91	5	20	10	3,3
100	10	91	5	20	10	3,8
100	10	91	5	32	10	5
36	6	51	4	20	20	2,9
50	7	61	4	20	20	4,3
63	8	71	5	20	20	5,7
80	10	91	5	20	20	8,3
100	10	91	5	20	20	9,8
100	10	91	5	32	20	13,3
36	10	51	4	20	30	4,8
50	6	61	4	20	30	7,1
63	7	71	5	20	30	9,7
80	8	91	5	20	30	14,3
100	10	91	5	20	30	16,7
100	10	91	5	32	30	22,2
36	10	51	4	20	40	7
50	6	61	4	20	40	10,5
63	7	71	5	20	40	14,3
80	8	91	5	20	40	21,1
100	10	91	5	20	40	24,2
100	10	91	5	32	40	32
*		*	*	*	*	*

Рисунок 4.12 – Вікно перегляду вмісту бази даних

Для перегляду виду стандартного радіатора з підписаними розмірами потрібно обрати пункт підменю «Перегляд 3D моделі радіатора з розмірами». Результат виконання показано на рис. 4.13.

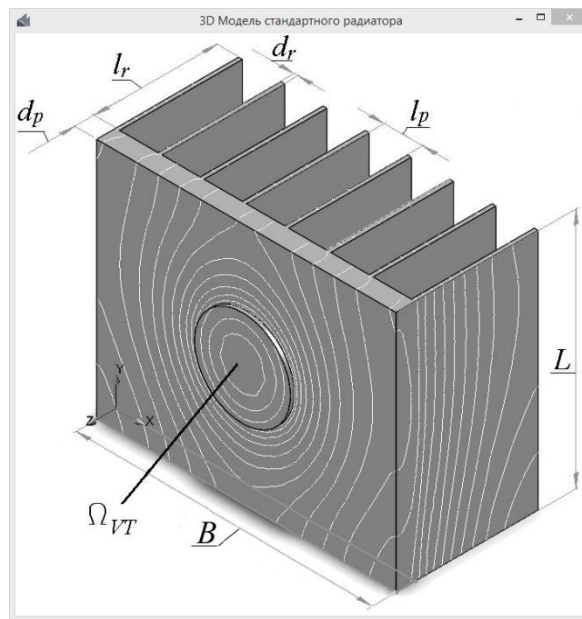


Рисунок 4.13 – Вікно виду стандартного радіатора з підписаними розмірами

Таким чином, розроблено структуру вхідних даних (максимально можлива температура контакту з прибором, температура навколишнього середовища) та вихідних даних (оптимальні розміри та масогабаритні параметри радіатора) та спосіб представлення їх у текстовому форматі для зручності контролю ходу оптимізаційного процесу. Сформульовано вимоги до тривимірної моделі радіатора з використанням табличної параметризації. Розроблено інтерфейс користувача для роботи з системою.

Розроблено інформаційну модель конструкцій радіаторів та концептуальну модель бази даних, яка містить базові розміри радіаторів та їх тепловий опір. Ці розміри вносяться у базу даних з довідників, ОСТ чи на основі експертних оцінок.

4.3. Проектування радіаторів з використанням розробленого програмного забезпечення

Графічний інтерфейс програмного комплексу надає можливість зручного вводу інформації. При запуску програми завантажується головне вікно (рис. 4.5), яке містить головне меню програми. На першому кроці необхідно побудувати геометричну модель стандартного радіатора. Для цього обирається

пункт головного меню «Робота з SolidWorks». З'явиться вікно роботи з алгоритмом з назвою «Побудова моделі радіатора», в якому потрібно обрати каталог для збереження моделей та файлів з результатами та задати теплову потужність, максимально допустиму температуру контакту з прибором, температуру навколишнього середовища (рис. 4.14).

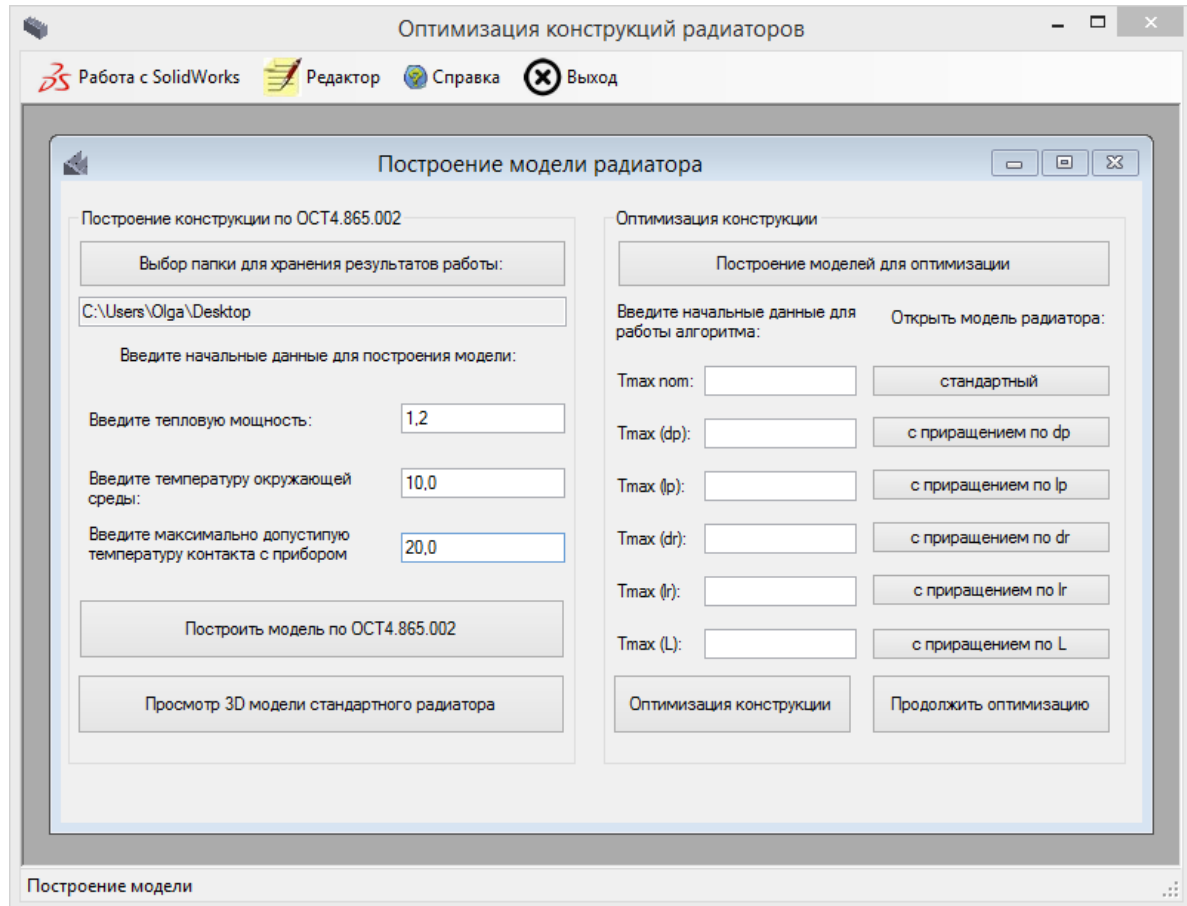


Рисунок 4.14 – Введення параметрів для побудови стандартного радіатора

Після цього буде побудовано модель стандартного радіатора та збережено її у робочий каталог (як показано на рис. 4.8) разом з файлом розмірів (рис. 4.9).

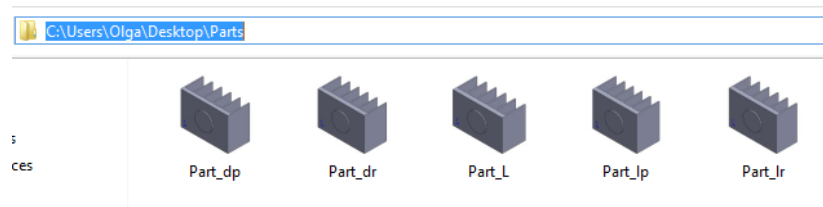


Рисунок 4.15 – Збережені геометричні конструкції радіатора

Для параметричного синтезу конструкції натискаємо на кнопку «Побудова моделей для оптимізації» та обираємо файл з параметрами радіатора (OSTsizes.txt з робочого каталогу). Після цього генерується k допоміжних моделей зі зміненими по чергово параметрами, де k – кількість параметрів. Тривимірні геометричні моделі будуть збережені у робочому каталозі з відповідними назвами (рис. 4.15).

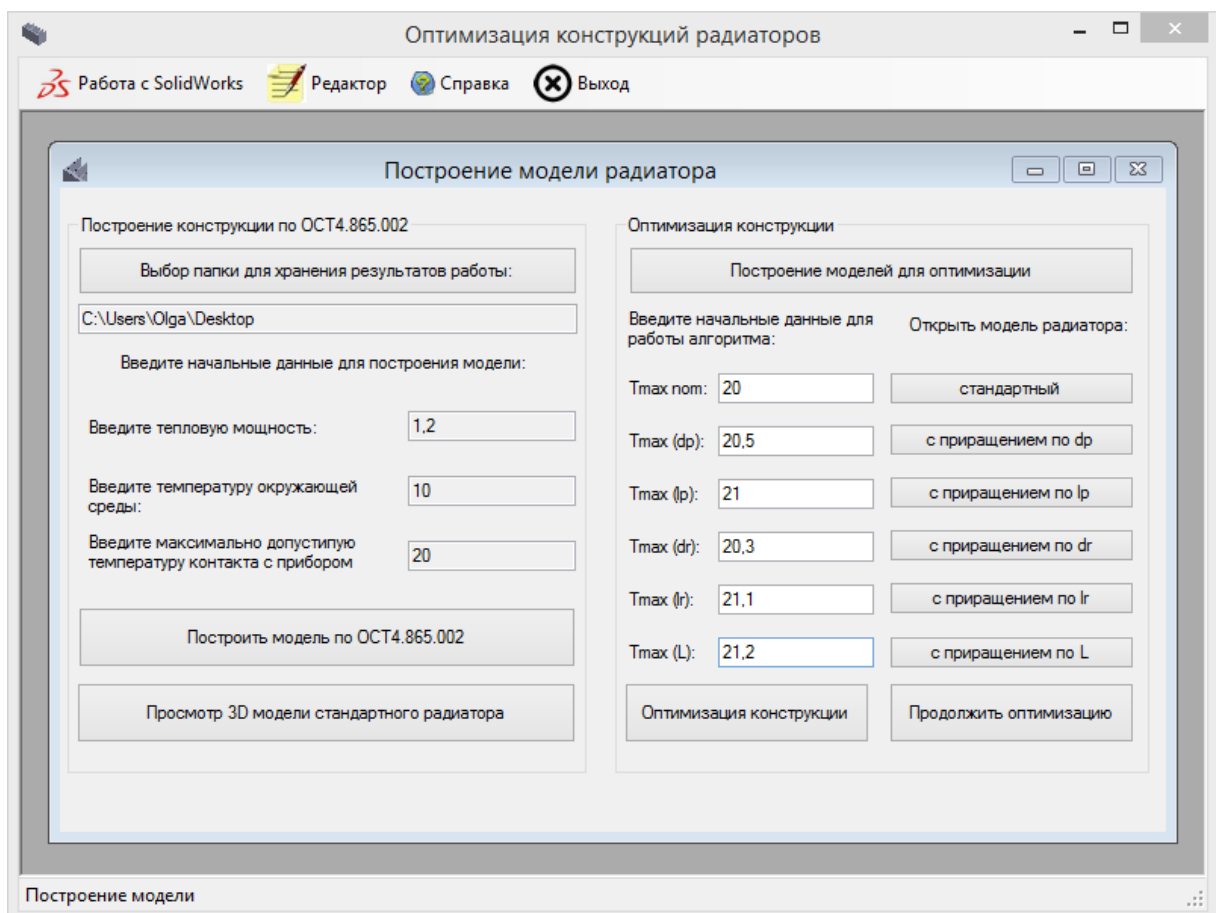
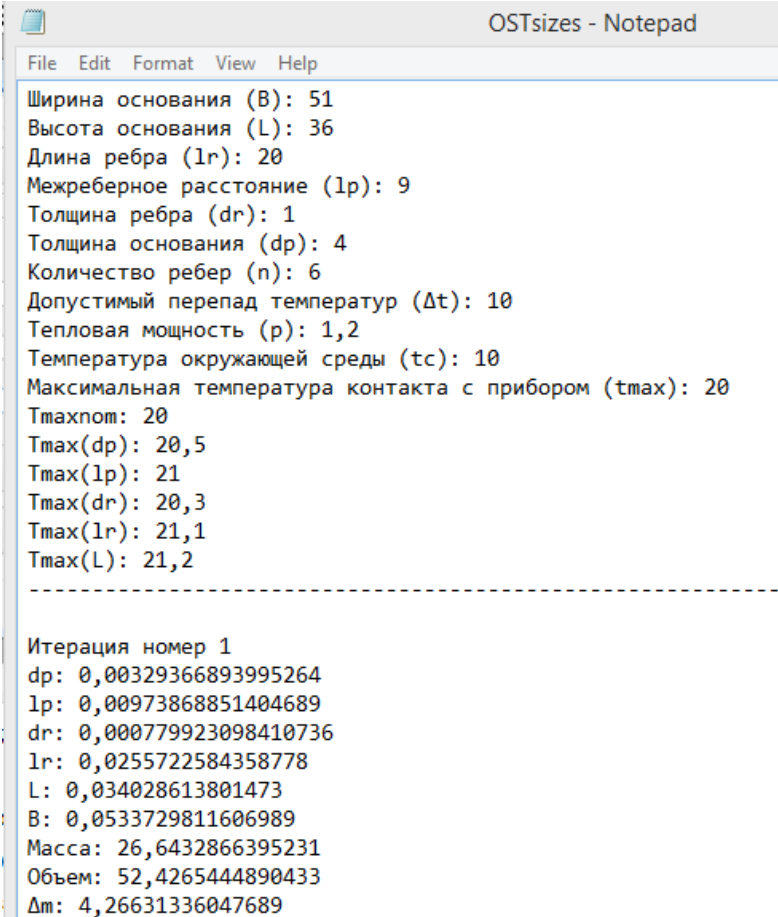


Рисунок 4.16 - Введення розрахованих температурних параметрів для стандартного радіатора

Після аналізу теплового режиму для моделей вводяться максимальні температури (наприклад, для ребристого радіатора: $T_{\max \text{ пом}}$ для стандартної

моделі радіатора, $T_{max}(dp)$ для моделі з відхиленням параметра товщини основи, $T_{max}(lp)$ з відхиленням параметра міжреберної відстані, $T_{max}(dr)$ з відхиленням параметра товщини ребра, $T_{max}(lr)$ з відхиленням параметру довжини ребра, $T_{max}(L)$ з відхиленням параметра висоти основи) та натиснути кнопку «Оптимізація конструкції» (як показано на рис. 4.16). Передбачена можливість перегляду побудованої моделі в SolidWorks.

На кожній ітерації буде виведено повідомлення для можливості закінчити роботу з алгоритмом. Результати роботи алгоритму на кожній ітерації для ребристого радіатора у вигляді текстового файлу OSTsizes.txt наведено на рис. 4.17.



```

OSTsizes - Notepad
File Edit Format View Help
Ширина основания (B): 51
Высота основания (L): 36
Длина ребра (lr): 20
Межреберное расстояние (lp): 9
Толщина ребра (dr): 1
Толщина основания (dp): 4
Количество ребер (n): 6
Допустимый перепад температур (Δt): 10
Тепловая мощность (p): 1,2
Температура окружающей среды (tc): 10
Максимальная температура контакта с прибором (tmax): 20
Tmaxnom: 20
Tmax(dp): 20,5
Tmax(lp): 21
Tmax(dr): 20,3
Tmax(lr): 21,1
Tmax(L): 21,2
-----
Итерация номер 1
dp: 0,00329366893995264
lp: 0,00973868851404689
dr: 0,000779923098410736
lr: 0,0255722584358778
L: 0,034028613801473
B: 0,0533729811606989
Масса: 26,6432866395231
Объем: 52,4265444890433
Δm: 4,26631336047689

```

Рисунок 4.17 – Вид змісту файлу після роботи алгоритму

Діалогове вікно на кожній ітерації має вигляд (рис. 4.18).

Введите максимальные температуры

Введите значения максимальных температур для построенных моделей:

T _{max} пом:	19,1	Модель радиатора
T _{max} (dp):	19,7	с новым параметром dp
T _{max} (lp):	19,3	с новым параметром lp
T _{max} (dr):	19,65	с новым параметром dr
T _{max} (lr):	19,7	с новым параметром lr
T _{max} (L):	19,9	с новым параметром L

Перейти к следующей итерации

Рисунок 4.18 – Форма для введення розрахованих значень максимальної температури на кожній ітерації

Після завершення алгоритму буде згенеровано та збережено нову модель у робочий каталог під назвою `Optimized_Model.SLDPRT`. Продовжити роботу алгоритму можна з будь-якого кроку, використовуючи кнопку «Продовжити оптимізацію» та обравши файл `OSTsizes.txt` з даними попередніх ітерацій.

За допомогою програмного комплексу було спроектовано радіатор для блока живлення на підприємстві КП НВК «Іскра» (рис. 4.19), де d_r , l_r і d_p , l_p – товщина та довжина ребер та міжреберних ділянок ланок основи, L – ширина радіатора, n – кількість ребер. На відміну від заданого радіатора, модель буда спрощена – відсутні отвори для кріплення та дрібні особливості геометрії. Такий підхід практично не впливає на результат оптимізації, але натомість дає змогу скоротити час розрахунків.

Потужні елементи розташовані зі зворотної сторони радіатора (рис. 4.20), де 1 - модуль VI-НАМ, 2 – модулі V375B, 3 – модулі VI-RAM, 4 – модуль V375C, 5 – модуль μ RAM. Контакт елементів з радіатором здійснюється по площі, умовно показаної на рисунку прямокутниками. Розмір контактних площинок відповідає розміру підкладки елементів, згідно специфікації виробника.

середовища $t_c = 60^0 C$, максимально допустимий вхідний тепловий опір $R = 0.104 K/Вт$, коефіцієнт чорноти поверхні радіатора $\varepsilon = 0.91$.

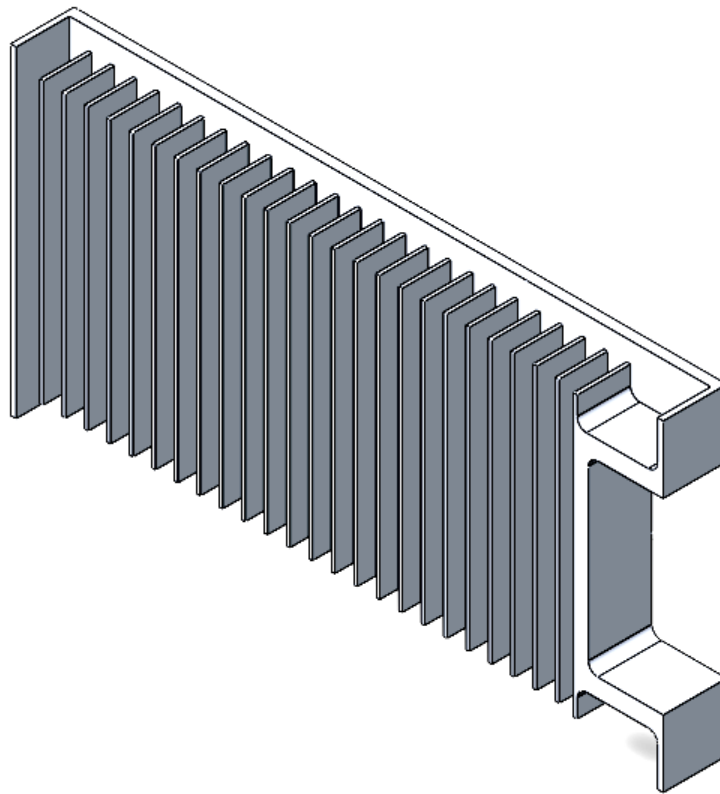


Рисунок 4.21 – Ребристий радіатор

Швидкість руху повітря $v = 1.5 м/с$. Начальні розміри радіатора $d_p = 6 мм, l_p = 8 мм, d_r = 2 мм, l_r = 26 мм, L = 150 мм$. Радіатор проектувався з обмеженнями, параметри l_r, L були зафіксовані. Отримані розміри радіатора представлені у табл. 4.1

Таблиця 4.1 – Розміри радіатора

	d_p , мм	l_p , мм	d_r , мм	n , ШТ	m , г
Вихідний радіатор	6	8	2	29	1952
М – критерій	5.52	10.12	1.87	24	1746

Аналіз табл. 4.1 показує, що використання М– критерію 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».

Таким чином, за допомогою запропонованого програмного забезпечення було оптимізовано ребристий радіатор, конструкція якого описана в розділі 3.2. В базу даних була введена інформація з [76]. В процесі роботи алгоритму були отримані результати, аналогічні до розділу 3.2. Для розширення функціональності програмного забезпечення можна додати вибір тривимірної моделі конструкції радіатора та критеріїв оптимізації.

4.4. Висновки

На базі запропонованого математичного забезпечення розроблено програмне забезпечення, що дає змогу проводити проектування радіаторів з оптимальними масогабаритними параметрами. Критеріями оптимізації можуть бути критерії мінімальної маси, мінімального об'єму та їх комбінацій.

Однією із переваг розробленої програмної системи є використання бази даних теплофізичних параметрів стандартних радіаторів, що надає можливість доповнювати програмний комплекс новими стандартами.

Розширення програмної системи можливо також за допомогою збільшення типів конструкцій радіаторів, наприклад пластинчастих та штирових або введення додаткових обмежень на геометричні розміри елементів конструкцій.

Програмну систему було впроваджено на підприємстві КП НВК «Іскра».

ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ

В дисертаційній роботі вирішено важливу наукову задачу вдосконалення методів та алгоритмів автоматизованого проектування радіаторів і інтегрованих тепловідвідних елементів з оптимальними масогабаритними показниками для охолодження вузлів радіоелектронних апаратів. Це дозволило уникнути тривалих експериментальних досліджень, значно покращити масогабаритні показники радіаторів і 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 в 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 наукових праць, у тому числі 7 статей у фахових наукових виданнях, 14 публікацій у матеріалах науково-технічних конференцій, 1 патент та 1 авторське свідоцтво на твір України.

Розроблені методи, методики та програмне забезпечення впроваджено в процес проектування радіоелектронних пристроїв на ТОВ НВП «Хартрон-Юком» та КП «НВК «Іскра», а також використовуються в 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 ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Baehr H.D. Heat and Mass Transfer [3rd. revised ed.] / H.D. Baehr, K. Stephan. – Springer Berlin Heidelberg, 2011. – 737 pp.
2. Jiji L.M. Heat Convection [2nd ed.] / L.M. Jiji. – Springer Berlin Heidelberg, 2010. – 543 pp.
3. Теплові процеси в електроніці / [Ю.Я. Бобало, В. Вуйцік, З.Ю. Готра та ін.] ; за ред. З.Ю. Готри. – Львів: Ліга-Прес, 2007. – 360 с.
4. Kim T.H. Closed form correlations for thermal optimization of plate-fin heat sinks under natural convection / Tae Hoon Kim, Kyu Hyung Do, Dong-Kwon Kim // International Journal of Heat and Mass Transfer. – 2011. – Vol. 54, Issues 5-6. – Pp 1210-1216.
5. Kim D-K. Thermal optimization of plate-fin heat sinks with fins of variable thickness under natural convection / Dong-Kwon Kim // International Journal of Heat and Mass Transfer. – 2012. – Vol. 55, Issue 4. – Pp 752-761.
6. Kim D-W. Thermal optimization of plate-fin heat sinks with variable fin thickness / Dong-Kwon Kim, Jaehoon Jung, Sung Jin Kim // International Journal of Heat and Mass Transfer. – 2010. – Vol. 53, Issues 25-26. – Pp 5988-5995.
7. Yu S-H. Optimum design of a radial heat sink under natural convection / Seung-Hwan Yu, Kwan-Soo Lee, Se-Jin Yook // International Journal of Heat and Mass Transfer. – 2011. – Vol. 54, Issues 11-12. – Pp 2499-2505.
8. Pat. US 7773383 B2, ICL H05K 7/20, H01L 23/34. Heatsink Assembly / Robert Liang(TW); Assignee Malico Inc(TW) – filed Jan. 6, 2009, pub. data Jul. 8, 2010 – 11 p.
9. Pat. US 7848108 B1, ICL H05K 7/20. Heatsink with periodically patterned baseplate structure / Bruce R. Archambeault(US) ... ; Assignee International Business Machines Corporation(US) – filed Aug. 6, 2009, pub. data Dec. 7, 2010 – 12p.

10. Pat. US 8056614 B2, ICL F28F 7/00, H05K 7/20. Heat sink and modular heat sink / Yu-Chu Chen(TW), Ching Ho(TW); Assignee AMA Precision Inc.(TW) – filed Jun. 4, 2008, pub. data Nov. 15, 2011 – 10p.

11. Pat. US 8327922 B2, ICL F28F 7/00, H01L 23/467, H05K 7/20. Heat sink and method for manufacturing the same / Jian Yang(CN), Jing Zhang(CN); Assignee Fu Zhun Precision Industry Co., Ltd.(CN) – filed Jul. 10, 2009, pub. data Dec. 11, 2012 – 9p.

12. Pat. US 8464780 B2, ICL H01L 23/427, H05K 7/20. Heat sink with pipes and method for manufacturing the same / Kenya Kawataba(JP), Masaru Oomi(JP), Ryoji Ohno(JP); Assignee The Furukawa Electric Co., Ltd.(JP) – filed Oct. 19, 2010 pub. data Jun. 18, 2013 – 17p.

13. Pat. US 8498116 B2, ICL H05K 7/20. Heat sink for power circuits / Glenn T. Siracki(US); Assignee Rockwell Automation Technologies, Inc.(US) – filed Jul. 16, 2010, pub. data Jul. 30, 2013 – 15p.

14. Pat. US 8567483 B2, ICL F28F 7/00, F28D 15/00, H05K 7/20. Heatsink with flexible base and height-adjusted cooling fins / Vinod Kamath(US), Jason A. Matteson(US), Assignee Aparna Vallury(US) – filed Nov. 6, 2009, pub. data Oct. 29, 2013 – 10p.

15. Pat. US 8724327 B2, ICL H05K 7/20. Heat sink assembly / Xiao-Feng Ma(CN), Lei Liu (CN); Assignee Hong Fu Jin Precision Industry Co., Ltd.(CN) – filed Apr. 25, 2012, pub. data May. 13, 2014 – 9p.

16. Pat. US 8780563 B2, ICL H05K 7/20. Load Distributed heat sink system / Douglas Alan Lostoski(US); Assignee Rockwell Automation Technologies Inc.,(US) – filed Dec. 12, 2011, pub. data Jul. 15, 2014 – 8p.

17. Цесарский И.Б. Проектирование ряда пластинчатых радиаторов минимального веса для полупроводниковых приборов. / И.Б. Цесарский, Э.А. Мотин // Вопр. радиоэлектроники, сер. ТРТО. – 1970. – вып. 3, С. 65-69.

18. Мотин Э.А. Методика расчета пластинчатых радиаторов минимального объема. / Э.А. Мотин, И.Б. Цесарский // Вопр. радиоэлектроники, сер. ТРТО. – 1971. – вып. 3, С. 74-76.

19. Цесарский И.Б. Методика расчета пластинчатых радиаторов минимального веса для полупроводниковых приборов. / И.Б. Цесарский, Э.А. Мотин // Вопр. радиоэлектроники, сер. ТРТО. – 1970. – вып. 2, С. 42-49.
20. Hamburgen W.R. Optimal Finned Heat Sinks / William R. Hamburgen. – Digital Equipment Corporation, 1986. – 66 pp.
21. Роткоп Л.Л. Обеспечение тепловых режимов при конструировании радиоэлектронной аппаратуры. / Л.Л. Роткоп, Ю.Е. Спокойный. – М.: Сов. радио, 1976. – 232 с.
22. Дульнев Р.Н. Тепло- и массообмен в радиоэлектронной аппаратуре / Р.Н. Дульнев. – М.: Высш.шк., 1984. – 247 с.
23. Ройзен Л.И. Тепловой расчет ребренных поверхностей / Л.И. Ройзен, И.Н. Дулькин : под. ред. В.Г. Фастовского. – М.: Энергия, 1977. – 256 с.
24. Скрипников Ю.Ф. Радиаторы для полупроводниковых приборов. / Ю.Ф. Скрипников. – М.: Энергия, 1974. – 48 с.
25. Дульнев Р.Н. Методы расчета теплового режима приборов / Г.Н. Дульнев, В.Г. Парфенов, А.В. Сигалов. – М.: Радио и связь, 1990 – 312 с.
26. Грабой Л.П. Методика определения коэффициента теплоотдачи ребрения пластинчато-штыревых радиаторов / Л.П. Грабой, Б.П. Базелев, В.И. Ефремов // Вопр. радиоэлектроники, сер. ТРТО. – 1973. – вып. 3, С. 38-43.
27. Семенюк В.А. Оптимальное расстояние между ребрами пластинчатых радиаторов, охлаждаемых путем естественной конвекции / В.А. Семенюк // Вопр. радиоэлектроники, сер. ТРТО. – 1973. – вып. 3, С. 44-51.
28. Иофин А.А. Графический метод выбора оптимального межреберного расстояния пластинчатых радиаторов при естественной конвекции / Иофин А.А. // Вопр. радиоэлектроники, сер. ТРТО. – 1976. – вып. 2, С. 54-57.
29. Martynenko O.G. Free-Convective Heat Transfer / O.G. Martynenko, P.P. Khramtsov. – Springer Berlin Heidelberg, 2005. – 519 pp.
30. Kutz M. Heat-Transfer Calculations / M. Kutz. – McGraw-Hill Education, 2006. – 729 pp.

31. SOLIDWORKS Flow Simulation 2015 Technical Reference // Dassault System, 2015 – 120 pp.
32. Алямовский А.А. Инженерные расчеты в SolidWorks Simulation / А.А. Алямовский. – М.: ДМК-Пресс, 2010. – 464 с.
33. Lombard M. SolidWork 2013 Bible / Matt Lombard. – John Wiley & Sons, Inc., Indianapolis, Indiana, 2013. – 1296 pp.
34. Stolarski T. Engineering Analysis with ANSYS Software / Т.А. Stolarski, N. Nakasone, S. Yoshimoto. – Elsevier Butterworth-Heinemann, 2006 – 480 pp.
35. NX Advanced Simulation. Инженерный анализ / [П.С. Гончаров, И.А. Артамонов, Т.Ф. Халитов и др.]. – М.: ДМК Пресс, 2012. – 504 с.
36. Wong S-C. Parametric study on the dynamic behavior of natural convection from horizontal rectangular fin arrays / Shwin-Chung Wong, Guei-Jang Huang // International Journal of Heat and Mass Transfer. – 2013. – Vol. 60 - Pp 334-342.
37. Kim J. Heat transfer characteristics of a centrifugal heat sink / Juwan Kim, Sung Jin Kim // International Journal of Heat and Mass Transfer. – 2013. – Vol. 56, Issues 1-2 - Pp 188-196.
38. Tari I. Natural convection heat transfer from inclined plate-fin heat sinks / Ilker Tari, Mehdi Mehrtash // International Journal of Heat and Mass Transfer. – 2013. – Vol. 56, Issues 1-2. - Pp 574-593.
39. Huang R-T. Orientation effect on natural convective performance of square pin fin heat sinks / Ren-Tsung Huang, Wen-Junn Sheu, Chi-Chuan Wang // International Journal of Heat and Mass Transfer. – 2008. – Vol. 51, Issues 9-10. – Pp 2368-2376.
40. Elshafei E.A.M. Natural convection heat transfer from a heat sink with hollow/perforated circular pin fins / E.A.M. Elshafei // Energy. – 2010. – Vol. 35, Issue 7. – Pp 2870-2877.
41. Wong M. Convective heat transfer and pressure losses across novel heat sinks fabricated by Selective Laser Melting / M. Wong, I. Owen, C.J. Sutcliffe, A. Puri // International Journal of Heat and Mass Transfer. – 2009. – Vol. 52, Issues 1-2. – Pp 281-288.

42. Боса Н.В. Теплообмін плоских поверхонь з сітчато-дротяним оребрением : дис. ... кандидата техніч. наук : 05.14.06 / К., 2001. – 166 с.

43. Шуваев В.А. Моделирование и оптимизация теплового проектирования радиоэлектронных устройств и комплексов на основе методов конструктивно-теплового синтеза : дис. ... кандидата техніч. наук : 05.13.12 / Воронеж, 2008. – 137 с.

44. Шалумова Н.А. Автоматизация создания тепловых моделей типовых конструкций радиоэлектронных средств : дис. ... кандидата техніч. наук : 05.13.12 / М., 2009. – 216 с.

45. Павлова А.Д. Особенности процессов теплообмена в радиоэлектронных аппаратах в герметичном исполнении : дис. ... кандидата техніч. наук : 01.04.14 / СПб., 2011. – 113 с.

46. Pukach A. The method of investigation of thermal portrait of integrated devices with a matrix of sensitive termistor elements / Pukach A., Teslyuk V., Ivantsiv R.-A. // Perspective Technologies and Methods in MEMS Design (MEMSTECH'2011) : Proc. of International Conf. – Polyana, Ukraine, 11-14 Mai 2011. – Pp. 16-17.

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

48. 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, Ukraine, 28 Feb-04 Mar 2006. – Pp. 554-556

49. 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. – г. Одесса, Украина: 2006. – С. 40

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

51. 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. - м. Запоріжжя: ЗНТУ, – 2006. – С. 42-43

52. Gaponenko, N. Reseach 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, Ukraine, 20-24 Feb. 2007. – Pp. 308-310

53. Проектирование ребристых теплоотводов минимальной массы / Г.Н. Шило, Е.В. Огренич, А.В. Филобок [та ін.] // Радиоэлектроника. Информатика. Управление. – 2010. – №2. – С. 42-47

54. 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. – г. Одесса, Украина: 2007. – С. 262

55. 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. – Pp. 545-546

56. 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. – Pp. 301-302

57. Шило, Г.М. Проектування ребристих радіаторів з оптимальними масогабаритними показниками / Г.М. Шило, Є.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. – м. Запоріжжя: ЗНТУ, – 2010. – С. 76-78

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

59. 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

60. 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 – г. Одесса, Украина: 2008. – С. 42

61. 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. – м. Запоріжжя: ЗНТУ, – 2008. – С. 188-190

62. 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 – г. Одесса, Украина: 2009. – С. 77

63. 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

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

65. Свідоцтво 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.

66. Кагітіна, О.Н. Автоматизированная система оптимизации конструкций радиаторов для охлаждения радиоэлектронной аппаратуры / О.Н. Кагітіна, 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. – м. Запоріжжя: ЗНТУ, – 2014. – С.283-284

67. 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.

68. Исследование тепловых характеристик оребренного канала при принудительном воздушном охлаждении / Г.Н. Шило, Н.А. Каспирович, Е.В. Огренич [та ін.] // Современные информационные и электронные технологии (СИЭТ–2013) : труды четырнадцатой междунар. конф. – Т2. – г. Одесса, Украина: 2013. – С.44-45

69. Оптимизация оребренного 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

70. Костиков В.Г. Источники электропитания электронных средств. Схемотехника и конструирование. : учебник для вузов [2-е изд] / В.Г. Костиков, Е.М. Парфенов, В.А. Шахнов. – М.: Горячая линия – Телеком, 2001 – 344 с.

71. Петухов В.М. Биполярные транзисторы средней и большой мощности сверхвысокочастотные и их зарубежные аналоги : справочник / В.М. Петухов. – Т.4 – М.: КУБК-а, 1997. – 544 с.

72. Pressman.A. Switching Power Supply Design / A. Pressman, K. Billings, T. Morey. – [3rd ed.] – McGraw-Hill Professional.: 2009. – 848 pp.

73. Пат. RU 247488 С2, МПК G12В 15/00 G06F 1/20 H05К 7/20. Охлаждающее устройство для электронных компонентов / Ю.В. Бухтияров(UA), И.Ю. Штурма(UA), В.Ю. Кравец(UA), А.Я. Паламарчук(UA); патентообладатель: ООО «Видео интернет технологии»(UA), Ю.В. Бухтияров(UA). – № 2011117046/07; заявл. 29.04.2011; опубл. 10.02.2013, Бюл. № 13.

74. Пат. RU 2509970 С1, МПК F28F 3/02 H05К 7/20. Радиатор / Л.П. Иванова(RU), А.Г. Полутов(RU), Т.К. Софронова(RU), И.Г. Федорова(RU); патентообладатель: ОАО «Научно-производственный комплекс “ЭЛАРА” имени Г.А. Ильенко(RU)». – №2012138582/06; заявл. 11.09.2012; опубл. 20.03.2014, Бюл. № 8.

75. Радиаторы охлаждения полупроводниковых приборов. Конструкция, размеры и тепловые характеристика : ОСТ5. 8794-88. – М.: 1988. – 96 с.

76. Радиаторы охлаждения полупроводниковых приборов. Технические условия : ОСТ4.865.002. – М.: 1975. – 393 с.

77. Радиаторы игольчато-штыревые охлаждения полупроводниковых приборов. Технические условия : ОСТ4:865.000. – М.: 1970. – 129 с.

78. Константінов С.М. Теоретичні основи теплотехніки : підручник / С.М. Константінов, Є.М. Панов. - К.: Золоті ворота, 2012. – 592 с.

79. Драганов Б.Х. Теплотехніка : підручник для студ. вищих техн. навч. закл. / Б.Х. Драганов [та ін.]; За ред. Б.Х. Драганова. – К.: ІНКОС, 2005. – 504 с.

80. Цветков Ф.Ф. Тепломассообмен: учебник для вузов / Ф.Ф. Цветков, Б.А. Григорьев. – М.: Издательский дом МЭИ, 2011. – 562 с.
81. Крейт Ф. Основы теплопередачи: пер. с англ. / Ф. Крейт, У. Блек. – М.: Мир, 1983. – 512 с.
82. Уонг Х. Основные формулы и данные по теплообмену для инженеров : справочник; пер. с англ. / Х. Уонг. – М.: Атомиздат, 1979. – 216 с.
83. Гусев С.Е. Свободно-конвективный теплообмен при внешнем обтекании тел / С.Е. Гусев, Г.Г. Шкловер. - М.: Энергоатомиздат, 1992. – 160 с.
84. Патанкар С. Численные методы решения задач теплообмена и динамики жидкости : пер. с англ. / С. Патанкар. – М.: Энергоатомиздат, 1984. – 152 с.
85. Трудношин В.А. Математические модели технических объектов : учеб. пособие для вузов / В.А. Трудношин, Н.В. Пивоварова : под ред. И.П. Норенкова. – М.: Высш. шк., 1986. – 160 с.
86. Ли К. Основы САПР (CAD/CAM/CAE) / К. Ли. – СПб.: Питер, 2004. – 560 с.
87. Ильин В.П. Методы конечных разностей и конечных объемов для эллиптических уравнений / В.П. Ильин. – Новосибирск: изд-во ин-та математики, 2000. – 345 с.
88. Норенков И.П. Основы автоматизированного проектирования: учеб. для вузов / И.П. Норенков. - М.: изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2002. – 336 с.
89. Реклейтис Г. Оптимизация в технике : в 2-х кн. кн. 1. пер с англ. / Г. Реклейтис, А. Рейвиндран, К. Рэгсдел. – М.: Мир, 1986. – 350 с.
90. Химмельблау Д. Прикладное нелинейное программирование: пер. с англ. / Д. Химмельблау : под. ред. М.Л. Быховского. – М.: Мир, 1975. – 536 с.
91. Акулич И.Л. Математическое программирование в примерах и задачах : учеб. пособие для студ. эконом. спец. вузов / И.Л. Акулич. – М.: Высш. шк., 1986. – 319 с.
92. Галеев Э.М. Оптимизация: теория, примеры, задачи / Э.М. Галеев, В.М. Тихомиров. – М.: Эдиториал УРСС, 2000. – 320 с.

93. Банди Б. Методы оптимизации. Вводный курс : пер. с англ. / Б. Банди. – М.: Радио и связь, 1998. – 128 с.

94. Пантелеев А.В. Методы оптимизации в примерах и задачах : учеб. пособие [2-е изд., исправл.] / А.В. Пантелеев, Т.А. Летова. – М.: Высш. шк., 2005. – 544 с.

95. Teslyuk V.M. Development of subsystems for solving optimization problems with the help of genetic algorithms / Teslyuk V.M., Kryvyy R.Z., Teslyuk T.M., Alomari T.A. // Experience of Designing and Application of CAD Systems in Microelectronics (CADSM'2009) : Proc. of the International Conf. – Lviv-Polyana, Ukraine, 24-28 Feb. 2009. – Pp. 364.

96. Denysyuk P. Development and study of subsystem for solution of tasks of multicriterial optimization / Denysyuk P., Teslyuk V., Alomari T.A., Teslyuk T. // Perspective Technologies and Methods in MEMS Design (MEMSTECH'2009) : Proc. of the International Conf. – Polyana, Ukraine, 22-24 Apr. 2009. – Pp. 166-167.

97. Lobur M. Evaluation the solution time of finite element analysis using gaussian elimination. / Lobur M, Farmaga I., Shmigelskyi P. // Комп'ютерні системи проектування. Теорія і практика: [зб. наук. пр.] відп. ред. М.В.Лобур. – Л.: Вид-во Львівської політехніки, 2012. – С. 114-116. – Вісник Нац. ун-т«Львів. політехніка»; № 747.

98. Farmaga I. Inclusions by Finite Element Method. Regular and Adaptive Meshing Algorithms for Modeling of Spherical. / I. Farmaga, M. Lobur, P. Shmigelskyi, N. Javorskyi, P. Spiewak. // Proc. of the XI-th Intern. Conf. Modern Problems of Radio Engineering, Telecommunications and Computer Science (TCSET'2012). – February 21-24, 2012, Lviv-Slavske, Ukraine. – Pp. 505-507.

99. Lobur M. Analysis and Problem Statement of the Optimal Thermal Design of Technical Objects. / M. Lobur, I. Farmaga, U. Marikutsa, O. Matviyukiv, L. Ciupinski. // Proc. of the International Conference Microtechnology and Thermal, Lodz, Poland, June 28 – July 1, 2011. – Pp. 223-227.

100. Koval V.A. Thermal Simulation of the Semiconductor IC's: General and Practical Approach / Koval V.A., Fedasyuk D.V // Microelectronics Journal, vol. 28. – N 3, 1997. – Pp. 221-227.

101. Коваль В.А. Автоматизация теплового проектирования микросистемных устройств средствами САПР / Коваль В.А., Федасюк Д.В., Маслов В.В., Тарновский В.Ф. // Под ред. В.А. Ковалю. – Львів: Вища шк. Видавн-во при Львів. Ун-ті, 1988. – 256 с.

102. Федасюк Д.В. Методи та засоби теплового проектування мікроелектронних пристроїв. – Львів: Видавництво Державного університету «Львівська політехніка», 1999. – 228 с.

103. Несущие конструкции радиоэлектронной аппаратуры / П.И. Овсищер, Ю.В. Голованов, В.П. Ковешников : под ред. П.И. Овсищера. – М.: Радио и связь, 1988. – 232 с.

104. Гелль П.П. Конструирование радиоэлектронной аппаратуры / П.П. Гелль, Н.К. Иванов-Есипович. – Л.: Энергия, 1972. – 232 с.

105. Шилдт. Г. C# 4.0 – полное руководство : пер. с англ. / Герберт Шилдт. – М.: ООО «И.Д. Вильямс», 2011. – 1056 с.

106. Roger W. Pryor Multiphysics Modeling Using COMSOL / Roger W. Pryor – Mercury Learning & Information, 2012. – 594 pp.

107. Software Engineering: A Practitioner's Approach / R. Pressman, B. Maxim. – [8th ed] – McGraw-Hill Education.: 2014. – 976 pp.

108. Unified Modeling Language / OMG Formal Versions Of UML [electronic resource], – Access mode: <http://www.omg.org/spec/UML/2.5>

ДОДАТКИ

Додаток А

Акти впровадження дисертаційної роботи



“ЗАТВЕРДЖУЮ”
Перший проректор
Запорізького національного
технічного університету
д.с.н., професор
Прушківський В.Г.
28 11 2014 р.

АКТ
про впровадження результатів дисертаційної роботи
Огренича Євгена Вікторовича

Комісія у складі завідувача кафедри інформаційних технологій електронних засобів к.т.н., професора Крищука В.М., к.т.н., доцента Гапоненко М.П. та старшого викладача Куляби-Харитонової Т.І. засвідчує цим актом, що результати дисертаційної роботи Огренича Є.В. впроваджені в лекційний курс та лабораторний практикум з дисципліни “Тепломасообмін в РЕА” напряму 6.050902 “Радіоелектронні апарати” та використовуються в дипломному проектуванні за спеціальністю 7.05090201 “Радіоелектронні апарати та засоби”.

Вивчення запропонованих у дисертаційній роботі методів проектування радіаторів дозволяє сформуванню у студентів навички вибору радіаторів для радіоелектронної апаратури з оптимальними масогабаритними параметрами.

Завідувач кафедри
інформаційних технологій
електронних засобів,
к.т.н., професор

В.М. Крищук

Доцент кафедри
інформаційних технологій
електронних засобів, к.т.н.

М.П. Гапоненко

Старший викладач кафедри
інформаційних технологій
електронних засобів

Т.І. Куляба-Харитонова

“ЗАТВЕРДЖУЮ”

Директор
КП НВК “ІСКРА”



Пресняк І.С.

2014 р.

АКТ

впровадження результатів дисертаційної роботи
Огренича Євгена Вікторовича

Цей акт, який складено комісією у складі: головного інженера НТЦ КП НВК „Іскра” Антохова Ю.М., заступника начальника відділу АСУП Кузнецова О.В., начальника КВ2 НТЦ Хара О.Л., засвідчує впровадження результатів дисертаційної роботи Огренича Є.В.:

- метод проектування радіаторів та функціональних вузлів з інтегрованими тепловідводними елементами;
- методика формування теплових моделей функціональних вузлів з інтегрованими тепловідводними елементами для блока секції антенної И7АА01МТ в системі інженерного аналізу;
- програмне забезпечення для автоматизованого проектування радіаторів з оптимальними масогабаритними параметрами.

Порівняння результатів розрахунків з експериментальними даними показало, що методика формування теплових моделей радіаторів забезпечують достатньо високу точність, а метод проектування радіаторів дозволив зменшити масу на 10%.

Результати дисертаційної роботи Огренича Є.В. дають можливість проектувати радіатори з оптимальними масогабаритними показниками та зменшити строки їх проектування.

Головний інженер НТЦ КП НВК „Іскра”

Ю.М. Антохов

Заступник начальника відділу АСУП
КП НВК „Іскра”

О.В. Кузнецов

Начальник відділу КВ2

О.Л. Хара

“ЗАТВЕРДЖУЮ”

Генеральний директор
ТОВ НВП «Хартрон-Юком»

Скотаренко Г. О.

“11/03/2015” р.



АКТ

впровадження результатів дисертаційної роботи з теми:
ВДОСКОНАЛЕННЯ МЕТОДІВ АВТОМАТИЗОВАНОГО
ПРОЕКТУВАННЯ ТЕПЛОВІДВІДНИХ ЕЛЕМЕНТІВ
РАДІОЕЛЕКТРОННИХ АПАРАТІВ
Огренича Євгена Вікторовича

Цей акт, який складено комісією у складі: начальника управління Руднева М.М., начальника групи Голуба П.В., інженер-конструктор 1-ї категорії Богма М.М. засвідчує впровадження результатів дисертаційної роботи Огренича Є.В.:

- метод параметричного синтезу тепловідвідних елементів;
- алгоритми моделювання теплових процесів в тепловідвідних елементах для радіоелектронних пристроїв космічних апаратів;

Порівняння результатів розрахунків з експериментальними даними показало, що методика формування теплових моделей забезпечує точність в межах 1%.

Результати дисертаційної роботи Огренича Є.В. дають можливість проектувати тепловідвідні елементи з оптимальними масогабаритними показниками та тепловими характеристиками.

Начальник управління

М.М. Руднев

Начальник групи

П.В. Голуб

Інженер-конструктор
1-ї категорії

М.М. Богма

Додаток Б
Патент на корисну модель

УКРАЇНА



ПАТЕНТ

НА КОРИСНУ МОДЕЛЬ

№ 81042

**СИСТЕМА ОХОЛОДЖЕННЯ ДРУКОВАНИХ ПЛАТ В БЛОКАХ
РАДІОЕЛЕКТРОННОЇ АПАРАТУРИ ЕТАЖЕРНОГО ТИПУ**

Видано відповідно до Закону України "Про охорону прав на винаходи і корисні моделі".

Зареєстровано в Державному реєстрі патентів України на корисні моделі **25.06.2013.**

Голова Державної служби
інтелектуальної власності України

 М.В. Ковіня



(11) **81042**

(19) **UA**

(51) МПК
H05K 7/20 (2006.01)

(21) Номер заявки: **u 2012 10215**
(22) Дата подання заявки: **28.08.2012**
(24) Дата, з якої є чинними права на корисну модель: **25.06.2013**
(46) Дата публікації відомостей про видачу патенту та номер бюлетеня: **25.06.2013, Бюл. № 12**

(72) Винахідники:
Шило Галина Миколаївна, UA,
Огренич Євген Вікторович, UA,
Сиротюк Оксана Валентинівна, UA,
Гапоненко Микола Прокопович, UA

(73) Власник:
ЗАПОРІЗЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ,
вул. Жуковського, 64, м. Запоріжжя, 69063, UA

(54) Назва корисної моделі:

СИСТЕМА ОХОЛОДЖЕННЯ ДРУКОВАНИХ ПЛАТ В БЛОКАХ РАДІОЕЛЕКТРОННОЇ АПАРАТУРИ ЕТАЖЕРНОГО ТИПУ

(57) Формула корисної моделі:

Система охолодження друкованих плат в блоках радіоелектронної апаратури етажерного типу, що містить тепловідвідну основу, теплорозподільчі пластини та тепловідвідні елементи, яка відрізняється тим, що теплорозподільчі пластини розташовані між кожними сусідніми друкованими платами і закріплені разом із друкованими платами на тепловідвідних елементах і з'єднаних з тепловідвідною основою.

Додаток В

Авторське свідоцтво на комп'ютерну програму

УКРАЇНА



ДЕРЖАВНА СЛУЖБА

ВЛАСНОСТІ УКРАЇНИ

ІНТЕЛЕКТУАЛЬНОЇ

СВІДОЦТВО

про реєстрацію авторського права на твір

№ 56326

Комп'ютерна програма "Автоматизована система оптимізації конструкцій радіаторів для охолодження радіоелектронних апаратів"

(вид, назва службового твору)

Автор(и) **Огренич Євген Вікторович, Кагітіна Ольга Миколаївна, Пархоменко Анжеліка Володимирівна, Шило Галина Миколаївна**

(повне ім'я, псевдонім (за наявності))

Авторські майнові права належать **Запорізький національний технічний університет, вул. Жуковського, 64, м. Запоріжжя, 69063**

(повне ім'я фізичної та/або повне офіційне найменування юридичної особи, адреса)

05.09.2014

Дата реєстрації



Голова Державної служби
інтелектуальної
власності України
М.В. Ковіня