

0

ХАРКІВСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ
РАДІОЕЛЕКТРОНІКИ

Сінотін Анатолій Мефодійович

УДК 004.896: 621. 396.6

**АВТОМАТИЗАЦІЯ РОЗРАХУНКІВ НЕСТАЦІОНАРНИХ ТЕПЛОВИХ
РЕЖИМІВ ПРИ ПРОЕКТУВАННІ ОДНОБЛОКОВИХ
РАДІОЕЛЕКТРОННИХ АПАРАТІВ**

05.13.12 – системи автоматизації проектувальних робіт

АВТОРЕФЕРАТ

дисертації на здобуття наукового ступеня
доктора технічних наук

Харків – 2008

Дисертацією є рукопис.

Робота виконана у Харківському національному університеті радіоелектроніки Міністерства освіти і науки України.

Науковий консультант – доктор технічних наук, професор Семенець Валерій Васильович, Харківський національний університет радіоелектроніки, перший проректор.

Офіційні опоненти:

доктор технічних наук, професор Нефьодов Леонід Іванович, Харківський національний автомобільно-дорожній університет, завідувач кафедри автоматизації та комп'ютерно-інтегрованих технологій;

доктор технічних наук, професор Писаренко Леонід Дмитрович, Національний технічний університет України “Київський політехнічний інститут”, завідувач кафедри електронних приладів та пристроїв;

доктор технічних наук, професор Федасюк Дмитро Васильович, Національний університет “Львівська політехніка”, проректор з навчально-педагогічної роботи, завідувач кафедри програмного забезпечення.

Захист відбудеться « 18 » 11 2008 р. о 12 годині на засіданні спеціалізованої вченої ради Д 64.052.02 Харківського національного університету радіоелектроніки за адресою 61166, м. Харків, пр. Леніна, 14.

З дисертацією можна ознайомитися у бібліотеці Харківського національного університету радіоелектроніки за адресою 61166, м. Харків, пр. Леніна, 14.

Автореферат розісланий « 17 » 10 2008 р.

Вчений секретар
спеціалізованої вченої ради

В.В. Безкорвайний

ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

Проникнення радіоелектроніки у всі області науки і техніки потребує все більшого вдосконалення радіоелектронної апаратури, зменшення її ваги і габаритів, підвищення її надійності. Ці вимоги привели до якісно нових принципів проектування і виробництва апаратури, до створення науки про проектування радіоелектронних пристроїв.

Різко збільшився обсяг необхідної початкової інформації для створення оптимальних радіоелектронних систем. Отримання такої інформації потребує тісного зв'язку радіоелектроніки з іншими галузями науки і техніки (математикою, фізикою, теплофізикою, електронно-обчислювальною технікою та ін.) У потоці необхідної інформації чинне місце посідають відомості про характер теплового режиму приладу, який разом з іншими чинниками істотно позначається на надійності, вагових і габаритних розмірах системи в цілому.

У зв'язку з цим набуває актуального значення дослідження теплових режимів і розробка методів розрахунку температурних полів РЕА, що дозволяють отримати для конструктора апарату необхідну інформацію про температурний режим, як окремих елементів монтажу, так і апарату в цілому.

Актуальність теми. Проектування оптимального за габаритами і надійністю радіоелектронного апарату, що відповідає всім вимогам сучасної електроніки, передбачає строгий облік температурного режиму його елементів. Напружений тепловий режим сучасних РЕА визначає надійність і витікає із таких особливостей їх конструкцій:

- інтенсивне розсіювання теплової енергії. Приблизно 90% усіх форм енергії перетворюється в РЕА на теплову енергію;
- висока густина монтажу елементів у середині апарату і деталей у середині самих елементів, що сприяють тепловому контакту (взаємодії) між елементами. За останні 10 – 15 років густина елементів РЕА зросла в 10 – 100 разів, а деталей у самих елементах - в 300 разів. Ще більш швидкими темпами очікується це зростання у майбутньому;
- низькі гранично допустимі значення температур (50°C – 100°C), що забезпечують надійне функціонування елементів.

Таким чином, це викликає необхідність вирішення ряду теплотехнічних задач, пов'язаних із визначенням характеру температурного поля РЕА на всіх етапах проектування.

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами. Дослідження проводилось в рамках основних наукових напрямків Харківського національного університету радіоелектроніки у період з 1978 по 2007 роки, в тому числі на замовлення регіональних підприємств міста Харкова за такими темами:

– ДР № 68038709 – “Дослідження і розробка методик розрахунку теплових режимів релейної та електронної апаратури, яка працює в вакуумі та в середовищі інертних газів”. Автор є виконавцем. Розробка випробувального стенду, теплових макетів, проведення експериментів та їх аналіз;

– ДР № 70011101 – “Дослідження і розробка алгоритму розрахунку теплових режимів радіоелектронних апаратів”. Автор є відповідальним виконавцем теми;

– ДР № 71012510 – “Дослідження ефективної теплопровідності нагрітих зон, доопрацювання алгоритму і доопрацювання програм розрахунку теплових режимів РЕА типу А, Б, С з обліком емпіричної залежності для розрахунку коефіцієнта теплопровідності”. Автор був керівником теми;

– ДР № 0103U001813 – “Розробка інтелектуальної системи управління процесів водовідводу на КНС № 2 м. Харків”. Автор був відповідальним виконавцем теми;

– ДР № 72014634 – “Розробка методики корекції розміщення елементів на платах з метою забезпечення оптимального теплового режиму ЕРЕ та дослідження ефективної теплопровідності нагрітих зон радіоелектронної апаратури, збудованій на мікромодульних елементах та твердих схемах”. Автор був керівником теми;

– ДР № 74025286 – “Розробка алгоритму синтезу одноблокових РЕА, що задовольняють заданому тепловому режиму”. Автор був керівником теми;

– ДР № 75041325 – “Дослідження температурних полів та розробка теплофізичних методів конструювання багатоблочної електронно-релейної апаратури автоматичних систем управління газової промисловості. Конструкційна надійність”. Автор був відповідальним виконавцем теми.

Мета і завдання дослідження. Метою дисертаційної роботи є підвищення ефективності та надійності одноблокових радіоелектронних апаратів з компактним монтажем, температурозалежною та змінною розсіювальною потужністю шляхом урахування нестационарних теплових режимів при проектуванні радіоелектронних апаратів, що виникають у процесі функціонування, та впливу конструктивних параметрів на температурне поле нагрітих зон, таким чином, щоб не перевищити задану стабільну максимальну температуру.

Для досягнення поставленої мети в дисертації сформульовано та вирішено задачі:

– розробки методів розрахунку нестационарних температурних полів РЕА з температурозалежними джерелами енергії методами регулярного режиму;

– розрахунку нестационарних теплових режимів РЕА з довільним законом зміни розсіюваної потужності від температури і часу за методом елементарних балансів;

– створення методів експериментального дослідження теплових макетів РЕА з температурозалежною і змінною в часі розсіюваною потужністю для оцінки коректності використання методів регулярного режиму й елементарних балансів при синтезі розрахункових алгоритмів дослідження нестационарного теплового режиму РЕА;

– експериментального дослідження характеру анізотропії нагрітих зон РЕА, монтажні плати яких виконані з різних матеріалів, від металів до пластичних мас ($\lambda = 0,3 - 380$ Вт / м · град.);

– визначення коефіцієнтів теплопровідності, повної теплоємності γ апаратури, що дозволяє здійснити розрахунки теплових режимів РЕА вже на початкових стадіях проектування апаратів, коли елементна база задана орієнтовно;

– створення методики синтезу радіоелектронних апаратів із заданим тепловим режимом для використання в системах автоматичного проектування РЕА;

– проведення теоретичних та експериментальних досліджень для оцінки точності алгоритму синтезу РЕА із заданим тепловим режимом.

Об'єкт дослідження – одноблокові радіоелектронні апарати, які працюють в умовах нестационарних температурних режимів.

Предмет дослідження – нестационарні теплові режими одноблокових радіоелектронних апаратів.

Методи дослідження ґрунтуються на використанні методів регулярного режиму для РЕА з температурозалежними джерелами енергії; методу елементарних балансів для РЕА із змінною в часі потужністю розсіювання; для отримання розрахункової залежності коефіцієнту форми тіл складної конфігурації використовувався метод приблизної подібності температурних полів; методу експериментальних досліджень – методу регулярного режиму "багатьох точок", оснований на нестационарному тепловому потоці. Для перевірочних розрахунків отриманих значень ефективної теплопровідності складних систем був застосований метод "пластини", побудований на стаціонарному режимі. Для одержання кількісної залежності відносної похибки визначення ефективної теплопровідності від відносних похибок параметрів – метод повного диференціалу. Для визначення величини похибки залежно від величини лінійного розміру розбиття апарату на елементарні об'єми при розрахунку температурних полів використовувався ряд Маклорена.

Наукова новизна отриманих результатів. Експериментальні та теоретичні дослідження температурних режимів одноблокових РЕА на діючих апаратах та теплових макетах з високою щільністю монтажу, працюючих в нестационарному режимі, дозволили розробити моделі розрахунків нестационарних теплових режимів та створити модель синтезу апаратів за заданою максимальною температурою на стадії розробки. Розроблений метод теплофізичного конструювання забезпечує синтез температуростійкої конструкції апарату.

При цьому:

– досліджено вплив геометричних розмірів, форми, теплофізичних коефіцієнтів, початкового параметру, параметру теплопровідності, анізотропії, концентрації елементів, параметру потужності. Результати цих досліджень дозволили забезпечити оптимальну мінімізацію кожного

параметра. Показано, що якщо мінімізація всіх параметрів синтезу в межах заданих обмежень не забезпечує виконання нерівності (20), то необхідно від поверхневих систем охолодження перейти до більш складних в конструктивній реалізації об'ємних систем охолодження. Синтез апарату в цьому випадку зводиться до відносного вибору параметрів систем охолодження (38, 39).

- вперше отримано алгоритм синтезу одноблокових РЕА за заданою максимальною температурою, що виражається нерівністю (20). За отриманим алгоритмом проведено синтез РЕА і виконано експериментальні дослідження температурних полів синтезованих конструкцій;

- вперше показано, що для розв'язання загальної задачі синтезу одноблокових РЕА із заданим тепловим режимом необхідно задати допустимі межі зміни параметрів синтезу, тобто межу на кожний параметр. Це призведе до необхідності розв'язання прямих задач теплопровідності;

- вперше результати виконаних досліджень використані для синтезу температурних полів одноблокових РЕА в області розв'язання задач стаціонарної і нестаціонарної теплопровідності, а також можуть бути використані в практиці визначення теплопровідності анізотропних матеріалів;

- удосконалена модель регулярного теплового режиму трьохскладової системи тіл, в ядрі якої рівномірно розподілені внутрішні джерела теплової енергії змінної потужності, що є лінійною функцією температури;

- набув подальшого розвитку метод елементарних теплових балансів для трьохскладової системи тіл (РЕА) з довільним законом розподілу джерел енергії змінної потужності в нагрітій зоні і змінними теплофізичними коефіцієнтами;

Практичне значення отриманих результатів. Одержані в ході експериментальних і аналітичних досліджень результати дали можливість запровадити в системи і технології, що дозволило підвищити їх адаптивність, ефективність розрахунків нестаціонарних теплових режимів та синтезу РЕА, рівень автоматизації, точність розрахунків, оптимальність прийняття рішень; зменшити час і вартість проектування.

Результати досліджень запроваджені для практичних розрахунків на підприємствах м. Харкова: на Харківському приладобудівному заводі ім. Т. Г. Шевченка (акт від 29.11.06.), в інституті сцинтиляційних матеріалів Національної академії наук України (довідка від 27.12.06.). За результатами дисертаційної роботи видано і впроваджено у навчальний процес монографію.

Результати дисертації впроваджені в навчальний процес Харківського національного університету радіоелектроніки, в тому числі в лекційні курси, практичні заняття, лабораторні роботи, курсові та дипломні проекти (довідка від 22.12.06.).

Особистий внесок здобувача. Усі наукові результати дисертаційної роботи отримані здобувачем особисто і опубліковані в роботах [1 – 26]. У монографії [1] розділи 2–5 написані здобувачем особисто. У розділі 2 приведена теплова модель одноблокових радіоелектронних

апаратів та її математичний опис. Представлений метод синтезу багатоплатних радіоелектронних апаратів за максимальним допустимим перегрівом, приведена методика і структурна схема синтезу одноблокових РЕА за максимальним допустимим перегрівом. Надані методи мінімізації параметра форми, ефективної теплопровідності, вплив анізотропії по теплопровідності на ефективність параметра $F_{a\lambda}$. Оптимальне розміщення плати з плоскими теплостоками, вплив закону концентрації елементів, які розсіюють тепло в нагрітій зоні, на максимальну температуру перегріву апарату. Метод мінімізації параметра F_w . У розділі 3 наведені приклади синтезу одноблокових радіоелектронних апаратів за максимальною допустимою температурою. У розділі 4 приведені результати експериментального дослідження впливу основних конструктивних і теплофізичних параметрів на температурне поле радіоелектронної апаратури. У розділі 5 розглянуто поширення узагальненої теорії регулярного режиму на тіла з внутрішніми джерелами енергії змінної потужності.

У роботах, опублікованих із співавторами, здобувачу належить: у [3] – дослідження залежності параметрів ефективної теплопровідності від ефективної максимальної теплопровідності нагрітої зони і відносної товщини плоских теплостоків; у [4] – отримані залежності, які дозволяють робити оцінку впливу об'єму нагрітої зони на максимальний перегрів апарату. Наведені рекомендації для отримання оптимальних розмірів апаратів при проектуванні; у [9] – аналітично та практично показано можливість узагальнення існуючих розрахункових залежностей визначення початку регулярного теплового режиму для ізотропних тіл. Отримано розрахункові залежності, які задовільно узгоджуються з експериментальними даними; у [13] – розглянуто систему, що являє собою односкладове квазіоднорідне тверде тіло, оскільки має різні коефіцієнти ефективних теплопровідностей вздовж основних напрямків. Показано, що для експериментального дослідження ефективної теплопровідності систем, складених тільки із ядра, можна застосовувати метод регулярного режиму "багатьох точок"; у [14] – зроблено аналіз існуючих методів визначення ефективної теплопровідності для анізотропної трьохскладової системи тіл. Показано, що найбільш доцільними для дослідження ефективної теплопровідності нагрітих зон РЕА є експериментальні дослідження. Найкращим є метод регулярного режиму, відомий під назвою методу "багатьох точок"; у [16] – проведено аналітичні дослідження точності методу для визначення оптимальних умов проведення експериментів для анізотропних матеріалів. Згідно з отриманими результатами були виготовлені макети і проведені експерименти; у [17] – спроектовано і виготовлено стенд для експериментальних досліджень теплових режимів радіоелектронних апаратів. Проведено дослідження одноблокових радіоелектронних апаратів в пілозахисному корпусі, працюючих в умовах вакууму; у [18] – проведені дослідження теплообміну тіл найпростішої геометричної форми в умовах вакууму та зроблено аналіз; у [19] – проведено експериментальні дослідження теплових режимів радіоелектронних елементів, які

працюють в умовах вакууму, зроблено аналіз; у [20] – проведено експериментальні дослідження ефективної теплопровідності теплових макетів радіоелектронних апаратів з малою густиною монтажу, зроблено аналіз та побудовано графічну залежність теплопровідності від зазору між радіоелектронними блоками; у [22] – проведено аналітичні та експериментальні дослідження впливу нерівномірності розподілу джерел енергії на температурне поле нагрітої зони;

Апробація результатів дисертації. Основні положення дисертаційної роботи докладались та обговорювались на конференціях: 10-й Міжнародній науковій конференції "Теорія і техніка передачі, прийому та обробки інформації" (Туапсе, 2004); 2-му Міжнародному радіоелектронному форумі «Прикладная радиоэлектроника. Состояние и перспективы развития» МРФ – 2005. Т.6 (Харків, 2005); Науковій сесії МИФИ – 2005. Московский инженерно – физический институт. Сборник научных трудов. Том 1, (Москва, 2005); Научно-практическая конференция «Повышение качества продукции в условиях автоматизированного производства». (Харьков, 1988); Минимизация перегрева радиоэлектронной аппаратуры // Материалы III – й научно – практической конференции. Министерство внутренних дел Украины. Украинский научно – исследовательский институт пожарной безопасности. Пожарная безопасность (Київ, 1997).

Публікації. За результатами дисертаційної роботи опубліковано 26 наукових праць. У тому числі 1 монографія (із співавторами), 21 стаття у фахових виданнях, які увійшли до переліків ВАК України (10 без співавторів) і 5 публікацій у збірниках праць наукових конференцій та форумів.

Структура та обсяг дисертації: Дисертація складається із вступу, 6 розділів основного змісту, висновків, списку використаних джерел із 303 найменувань на 17 с., та 6 додатків на 39 с. Загальний обсяг становить 341 с., рисунків 52 (з них 10 на 10 окремих сторінках), таблиць – 38 (з них 22 на окремих сторінках).

ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ

У вступі обґрунтовано актуальність обраної теми дисертації, сформульовано мету та завдання дослідження, визначено об'єкт, предмет і методи досліджень, визначено наукову новизну та практичне значення отриманих результатів, а також особистий внесок автора в роботи, виконані у співавторстві, апробацію результатів дисертації та кількість публікацій за темою дисертаційної роботи.

У першому розділі, на основі проведеного аналізу робіт вітчизняних та закордонних авторів проектування оптимального за габаритами та надійністю радіоелектронного апарату, що відповідає всім вимогам сучасної електроніки, необхідно проводити строгий облік температурного режиму як його елементів, так і радіоелектронного апарату в цілому. Досліджено існуючі методи проведення розрахунків температурних полів апаратів, працюючих в стаціонарних і

нестационарних режимах. Визначена мета і поставлені задачі для проведення досліджень.

У другому розділі розглянуто можливість поширення узагальненої теорії регулярного режиму на тіла з внутрішніми джерелами енергії змінної потужності.

Рівняння теплопровідності для однорідного тіла з рівномірно розподіленими джерелами енергії, потужність яких (P) лінійно залежить від температури, граничні і початкові умови при постійних теплофізичних коефіцієнтах і температурі навколишнього середовища (t_c) мають вигляд:

$$\frac{\partial \mathcal{G}(x, y, z, \tau)}{\partial \tau} = a \cdot \nabla^2 \mathcal{G} + \frac{P_0}{C} (1 \pm \beta \mathcal{G}); \quad (1)$$

$$\left(\frac{\partial \mathcal{G}}{\partial n} + \frac{\alpha}{\lambda} \mathcal{G} \right)_s = 0; \quad \mathcal{G}|_{\tau=0} = \mathcal{G}_0(x, y, z), \quad (2)$$

де $\mathcal{G} = t - t_c$ – надмірна температура; a, α, λ – коефіцієнти температуропровідності, тепловіддачі і теплопровідності.

Після введення нової змінної $\varepsilon = \mathcal{G}_{cm} - \mathcal{G}$, загальний розв'язок рівняння (1), отриманий методом Фур'є, в критерійній формі набуває вигляду:

$$\varepsilon = \sum_{j=0}^{\infty} A_j^* \mathcal{G}_j e^{-M_j^* F_{0k}}, \quad (3)$$

де $A_j^*(\varphi, H, \mathcal{G}_{ст}, \mathcal{G}_0)$ – теплові амплітуди; $U_j(\varphi, H, \frac{x}{L}, \frac{y}{L}, \frac{z}{L})$ – власні функції задачі; $F_{0k} = a\tau / K$ – узагальнений критерій Фур'є; $H = \alpha KS / \lambda V$ – узагальнений критерій Біо; $M_j^*(H, P_0) = m_j^* / m_\infty$ – узагальнені критерії теплової інерції; $m_j^* = m_j \pm \Delta m$; m_j – позитивні числа; $m_\infty = a/K$; Δm – поправка, яка викликана температурною залежністю потужності; Φ – параметр форми тіла; K, S, V – коефіцієнт форми, поверхня теплообміну і об'єм тіла; $\mathcal{G}_{ст}$ – надмірна стаціонарна температура; P_0 – початкова потужність температурозалежних джерел енергії при $t - t_c$; β – температурний коефіцієнт потужності; C – повна теплоємність тіла.

Аналіз загального розв'язку (3) дозволяє встановити основні закономірності регуляризації температурного поля при температурозалежних джерелах енергії:

– через нерівність $0 < m_0 < m_1 < m_2 < \dots$ і обмеженості за модулем величин A_j^* і U_j ряд (3) збігається, тому, починаючи з деякого моменту часу τ_p ($F_{0кр} = a\tau_p / K$), можна нехтувати всіма членами ряду окрім першого ($j = 0$). Настає регулярний тепловий режим із загальним для всіх точок тіла експоненціальним законом зміни температури в часі. Опускаючи індекс "0", отримаємо:

$$\varepsilon = A \cdot U e^{-M^* F_{0k}}; \quad F_0 \geq F_{0kp}. \quad (4)$$

Темп регулярного теплового режиму (показник експоненти), визначуваний з умови $m^* = -\frac{\partial \ln \varepsilon}{\partial \tau}$, у відмінності від випадку постійної потужності, залежить від величини початкової потужності джерел енергії і відрізняється чисельно від темпу регулярного режиму простого охолодження на деяку величину – поправку. Знак поправки протилежний знаку приросту потужності, а її величина визначається із співвідношення: $|\Delta m| = P_0 \beta / C$.

Основна критерійна залежність набуває вигляду:

$$M^* = M \pm \Delta M = H / \sqrt{H^2 + 1,437H + 1} \pm (P_0 \beta / \lambda V) K. \quad (5)$$

При негативній поправці, коли $|\Delta m| = m$, настає тепла нестійкість, і $\Theta_{ст}$ втрачає смислове значення.

Підкуплива інженерна простота методу регулярного режиму, що дозволяє описати нестационарне температурне поле тіла експоненціальною залежністю (4), в цілому знижується невизначеністю моменту часу τ_p початку регуляризації.

Теоретично оцінка часу τ_p пов'язана з дослідженням швидкості збіжності ряду (3). Існуючі в літературі (А.В. Ликов, Б.Н. Олійник, П.В. Черпаков) методи кількісної оцінки τ_p розроблені стосовно випадку простого охолодження і для тіл основних форм (куля, циліндр, пластина). Тому, в розділі 2 виконано дослідження швидкості збіжності ряду (3) для тіл з деформованою поверхнею по відношенню до основних форм за наявності внутрішніх джерел енергії з різними законами розподілу. При дослідженні швидкості збіжності ряду (3) зроблено такі обмеження:

– згідно з теорією наближеної подібності всі тіла довільної конфігурації розбиті на три групи (перша група – тіла з трьома вимірюваннями одного порядку; друга група – тіла з двома вимірюваннями кінцевого порядку і одним нескінченно великим вимірюванням; третя група – тіла з одним кінцевим вимірюванням і двома нескінченно великими вимірюваннями) з еталонними тілами відповідно куля (К), циліндр (ц), пластина (пл.), рівновеликими за об'ємом досліджуваному тілу. Коефіцієнт форми (К), що входить в узагальнені критерії H і $F_{ок}$ характеризуватиме наближену подібність температурних полів досліджуваного й еталонного тіла, що дозволяє виключити з (3) параметр форми Φ . Показано, що для еталонних тіл мають місце співвідношення:

$$|U_j| \leq 1; \quad M = \mu_j^2 / \mu_\infty^2; \quad \mu_{j+1} - \mu_j \approx \pi; \quad \mu_j = \mu_1 + (j - 1)\pi; \quad (6)$$

– початкове температурне поле рівномірне і $\Theta_0(x, y, z) = 0$. Джерела енергії розподілені

рівномірно або сконцентровані в центрі, або зосереджені на периферії тіла. У разі рівномірного розподілу потужність джерел енергії може бути функцією температури, а в решті випадків постійна.

$$P = P_0 \cdot e^{-\frac{r/L}{B}}; \quad (7) \quad P = P_0 \cdot e^{-\left(1-\frac{r/L}{L}\right)\frac{1}{B}}, \quad (8)$$

де B – постійне позитивне число.

При $B \ll 1$ з (7) одержуємо центральний, а з (8) - периферійний розподіл, а при $B \gg 1$ обидва вирази дають центральний розподіл джерел енергії.

Закони (7) і (8) дозволяють отримати вирази для співвідношення амплітуд в (3).

$$\frac{|A_j^\bullet|}{A^\bullet} = \frac{|A_j|}{A} \left(\frac{M}{M_j} \right)^n, \quad (9)$$

де $\begin{cases} 1=0 - \text{рівномірний розподіл джерел енергії;} \\ n=0,5 - \text{центральний розподіл при } H \gg 1; \\ 0 - \text{периферійне і центральне (при } H < 1) \text{ розподіл;} \end{cases}$

A_j – теплові амплітуди за відсутності джерел енергії. Для всіх еталонних тіл $\max |A_j| = |A_1|$.

З урахуванням зроблених вище обмежень остаточний вираз для оцінки швидкості збіжності ряду (3) набуває вигляду:

$$\delta \varepsilon_\kappa \leq \frac{\Delta \varepsilon_{\max}}{\varepsilon_{\max}} \leq \frac{|A_1|}{A} \left(\frac{M^\bullet}{M_1^\bullet} \right)^n e^{-\left(1-\frac{M}{M_1}\right) \cdot M_1 \cdot F_{0\kappa p}} \left(1 + \sum_{j=2}^{\infty} \frac{|A_j|}{|A_1|} \left(\frac{M_1}{M_j} \right)^n \cdot e^{-\left(\frac{M}{M_1}-1\right) \cdot M_1 F_{0\kappa p}} \right) \leq \delta \varepsilon_{\text{дон}}, \quad (10)$$

де $\Delta \varepsilon_{\max} = \sum_{j=1}^{\infty} |A_j^\bullet| \cdot e^{-M_j \cdot F_{0\kappa p}}; \quad \varepsilon_{\max} = A^\bullet \cdot e^{-M^\bullet F_{0\kappa p}}$ при $|U_j| = 1$;

$\delta \varepsilon_{\text{дон}} \geq \delta \mathcal{G}_{\text{дон}} = \Delta \mathcal{G}_{\max} / \mathcal{G}_{\text{стmax}}$ – максимальна допустима помилка розрахунку температури за (4).

З (10) отримано розрахункову залежність для оцінки часу τ_p ($F_{0\kappa p}$) для двох, найнеобхідніших з практичної точки зору, випадків:

– випадок 1. $F_{0\kappa p} = 0$

$$\delta\varepsilon_{\kappa} = \zeta / A_1 // A \cdot M^{\bullet} / M_1^{\bullet} \bar{n} \leq \delta\varepsilon_{\text{дон}}, \quad (11)$$

$$\text{де } \zeta = \sum 1 + |A_j| // |A_1| \cdot M_1 / M_j \bar{n}.$$

Показано, що значення $|A_j|$ виражаються для різних значень критерію Біо (Н) рівністю, представленою в табл. 1

Таблиця 1

Залежність для $|A_j|$

Теплов. ампліт.	Форма еталонного тіла						Примітка
	Пластина		Циліндр		Куля		
	Н < 1	Н > 10	Н < 1	Н > 10	Н < 1	Н > 10	
$ A_j $	$\frac{2B_i}{\mu_j^2}$	$\frac{2}{\mu_j}$	$\frac{2Bi}{\mu_j^2 J_0(\mu_j)}$	$\frac{2}{\mu_j J_1(\mu_j)}$	$\frac{2B_i}{\mu_j}$	2	J > 1

Примітка: – критерій Біо; J_0, J_1 – функції Бесселя.

Випадок 2. $Fo_{\text{кр}} \geq 0,5$

Таблиця 2

Значення ζ

Закон розподілу джерел	Пластина		Циліндр		Куля	
	Н < 1	Н > 10	Н < 1	Н > 10	Н < 1	Н > 10
Рівномірний	1,08	1,40	1,20	1,80	1,40	2,36
Центральний	1,64	2,11	3,12	4,24	∞	∞
Периферійний	1,64	∞	3,12	∞	∞	∞

Знак " ∞ " означає, що ряд в (11) розходиться.

Аналіз значень M_j і їх відношень у всьому діапазоні критерію Біо показує, що сума ряду в (10) на багато менше за одиницю і нею можна нехтувати для всіх $Fo_{\text{кр}} \geq 0,5$, тоді

$$\delta\varepsilon_{\kappa} \leq |A_1| // A \cdot M^{\bullet} / M_1^{\bullet} \bar{n} e^{-M/M_1} \bar{M}_1 \cdot Fo_{\text{кр}} \leq \delta\varepsilon_{\text{дон}}. \quad (12)$$

У розділі 2 приведена таблиця значень для різних Н, що дозволяє, при заданому рівні

помилки $\delta \varepsilon_{\text{доп}}$, оцінити виконання нерівності (11), а у разі її виконання розрахувати значення $(Fo_{\text{кр}})$ по (12).

Уся розрахункова залежність теорії регулярного режиму припускає відоме значення коефіцієнта форми тіла (K). Для тіл основних еталонних форм існують аналітичні вирази для K :

$$K_{\text{ш}} = R_{\text{ш}}^2 / \pi^2; \quad K_{\text{ц}} = R_{\text{ц}}^2 / 2,405; \quad K_{\text{пл}} = L_{\text{пл}}^2 / \pi^2. \quad (13)$$

У роботі на підставі теорії наближеної подібності було встановлено зв'язок між коефіцієнтами форми досліджуваного й еталонного тіла кожної групи, який має вигляд:

$$E = K / K_{\text{ет}} = S_{\text{ет}} / S, \quad (14)$$

де S , $S_{\text{ет}}$ – площа поверхонь досліджуваного й еталонного тіла, рівновеликого за об'ємом досліджуваному тілу.

На закінчення розділу 2 показано, що на ділянці нестационарного теплового процесу з відносним часом $0 < M \cdot Fo_{\text{кр}} \leq 1$, де має місце основна зміна температури ($0 < \vartheta / \vartheta_{\text{ст}} < 0,7$), відносна помилка у визначенні темпу регулярного режиму δM^* , (δm^*) викликає практично таку ж або дещо меншу помилку в розрахунку температури за методом регулярного режиму, що робить необхідним облік поправки Δm на температурну залежність потужності.

У **третьому** розділі проведено дослідження теплообміну в радіоелектронних апаратах з перемінною розсіюваною потужністю методами регулярного режиму. Експериментальні й аналітичні дослідження, проведені у цьому розділі показали можливість узагальнення основних положень теорії регулярного режиму односкладного тіла (розділ 2) на трьохскладову систему тіл: ядро з нерівномірним полем температури, тонку металеву оболонку (кожух), зазор із заповнювачем, що має малу повну теплоємність. В ядрі системи рівномірно розподілені температурозалежні джерела енергії. На рис. 1, 2 представлені результати експериментального дослідження нестационарного температурного поля трьохскладової системи тіл. Ядро системи було котушкою у вигляді тонкого металевого стрижня заввишки 15 мм з ебонітовими кільцями діаметром 18 мм на кінцях. На котушці намотаний мідний дріт ПЕВ – 2 діаметром 0,8 мм. Ядро поміщалось в пілозахисний дюралюмінієвий кожух (оболонку) діаметром 20 мм і заввишки 17 мм.

Рис. 1. Регуляризація температурного поля трьохскладової системи тіл з температурозалежними джерелами енергії.

а. $x \text{ --- } x$ – (нагрівання)

б. $O \text{ ---- } o$ – $\vartheta = t - t_c$ (охолодження)

Рис. 2. Залежність поправки до темпу з регулярного режиму охолодження від початкової потужності температурозалежних джерел енергії:

$o \text{ --- } o$ – дослід; $x \text{ ---- } x$ – розрахунок за (15):

$$1. P_0 = P_0 - (1 + \beta \vartheta); \quad 2. P = P_0 (1 - \beta \vartheta)$$

Між оболонкою і ядром був повітряний зазор, товщиною меншою за 1 мм. При пропусканні електричного струму по мідних дротах в системі виділялося тепло. Потужність джерел тепла безперервно змінювалася як функція температури у міру прогрівання мідних дротів і зміни їх омичного опору. Початкова потужність складала 1–6 Вт. Знак приросту потужності змінювався за рахунок стабілізації або напруги, або струму джерела живлення. Як температурні датчики використовувалися мідно - константанові термопари, встановлені на поверхні кожуха і в ядрі системи.

Лінійний характер зміни температури в напівлогарифмічній системі координат (рис.1) свідчить про виконання експоненціальної залежності (4) у всіх точках системи. Різний нахил прямих при охолодженні і нагріванні, залежність кута нахилу при нагріванні від початкової потужності і знака приросту потужності (рис. 1а, б) свідчать про наявність поправки до темпу регулярного режиму, величина якої залежить від початкової потужності джерел енергії, а знак протилежний знаку приросту потужності. Чисельні значення поправок при різних початкових потужностях і знаках приросту потужності (див. рис. 2) задовільно узгоджуються з розрахунками за формулою (15) для темпу регулярного режиму трьохскладового тіла. Для дослідження нестационарних температурних полів трьохскладових тіл з температурозалежними джерелами енергії в розділі 3 отримані формули, що дозволяють пов'язати темп регулярного режиму (m^*) з геометричними і теплофізичними параметрами таких систем.

$$m^* = k^i \cdot S \cdot \psi / C \pm P_0 \cdot \beta^* / C; \quad (15)$$

$$K^i = K / \left(1 + \frac{\left(1 + \frac{P_0 \beta}{C m^*} \right) \left(1 - \frac{K}{k^i} \right)}{\left(\frac{m}{m^*} = 1 \right)} \right); \quad (16)$$

$$K = \frac{K^i}{1 + S K^i / S_k \alpha}; \quad m = \alpha S_k / C_k; \quad \psi = \varepsilon_s / \varepsilon_k; \quad \beta^* = \beta \cdot K^i / K, \quad (17)$$

де S, S_k, C, C_k – площі поверхонь і повні теплоємності ядра і кожуха;

K_i – коефіцієнт теплопередачі від ядра до кожуха (оболонки); $\varepsilon_s, \varepsilon_k$ – різниця середня поверхнева і об'ємна температури ядра.

У критеріальній формі рівність (15) набуває вигляду:

$$M^{\bullet} = H^{\bullet} / \sqrt{H^{\bullet 2} + 1,437H^{\bullet} + 1} \pm \Delta M^{\bullet} \quad (18)$$

З (18) і (5) витікає, що трьохскладову систему тіл можна розглядати, як односкладне тіло (ядро), якщо в критеріальну залежність ввести замість коефіцієнта тепловіддачі узагальнений коефіцієнт теплопередачі (16) і узагальнений температурний коефіцієнт потужності β^* (17).

У розділі 3 приведена класифікація радіоелектронних апаратів. В основу класифікації покладені конструктивні особливості кожуха (оболонки) і густина монтажу нагрітої зони (ядра), що визначається коефіцієнтом густини монтажу

$$\eta_m = \ell_{max} / \Delta, \quad (19)$$

де ℓ_{max} – найбільший лінійний розмір елемента або функціонального вузла на монтажній платі; $\Delta = \sum_{i=1}^N \Delta_i \cdot n_i / \sum_{i=1}^N n_i$ – середня зважена відстань між елементами на платі.

Виконані в роботі розрахунки й експериментальні дані для РЕА з повітряним типовим або компаундним заповнювачем ($\lambda < 1$ Вт/м·град.) показали, що значення η_m подібно до χ критеріям Н.А. Яришева, однозначно визначає якість теплових зв'язків між елементами монтажу нагрітої зони РЕА. Із класифікації безпосередньо витікає, що тепла модель одноблокових РЕА в пилезахищеному (герметичному) кожусі може бути представлена, як трьохскладова система тіл. Тому всі подальші дослідження виконані тільки для цього класу РЕА. На закінчення розділу розроблена розрахункова схема (алгоритм) дослідження нестационарних теплових режимів одноблокових РЕА з температурозалежними джерелами енергії за методом регулярного режиму.

Показано, що метод регулярного режиму найбільш ефективний при дослідженні температурних полів з рівномірним розподілом джерел енергії і великою густиною монтажу ($\eta_m \gg 1$). У цьому випадку $\tau_p \approx 0$, тобто регулярний режим починається з початку теплового процесу, що дозволяє досліджувати нестационарні температури у всьому діапазоні їх зміни ($0 < \vartheta / \vartheta_{ct} < 1$).

При нерівномірному розподілі джерел енергії час τ_p істотно зростає, і на ділянці регулярного режиму ($\tau > \tau_p$) нестационарні температурні поля виявляються близькими до граничних стаціонарних значень (див. розділ 4), тобто діапазон досліджень обмежений ($\vartheta / \vartheta_{ct} \rightarrow 1$).

На рис. 3 наведені результати розрахунку середніх нестационарних температур РЕА з рівномірним розподілом температурозалежних ($\beta = 0,004 \text{ град}^{-1}$) джерел енергії, а також для оцінки правомочності допущень методу надані дослідні значення цих температур (див. розділ 4). Розрахункові й експериментальні дані експонують задовільно. Нехтування поправкою Δm до темпу регулярного режиму приводить до зниження розрахункових температур на ділянці основної зміни нестационарної температури в часі.

Четвертий розділ присвячений дослідженню нестационарного теплового режиму в радіоелектронних апаратах з довільним законом зміни потужності. Досліджений вплив на точність розрахунків основних допущень методу елементарних балансів, розробленого А.П. Ванічевим стосовно односкладних систем щільно дотичних твердих тіл, на трьохскладові системи (теплові моделі одноблокових РЕА). При розробці розрахункового алгоритму були зроблені такі допущення:

- у межах j – го елементарного об'єму ΔV_j на які розбивається нагріта зона і кожух РЕА, закон зміни температури близький до лінійного;
- величина середнього теплового потоку через поверхню граней елементарного об'єму за час від τ до $\tau + \Delta\tau$ пропорційна початковому температурному градієнту (у момент часу τ);
- зміна теплоємності пропорційно зміні температури в центральній точці елементарного об'єму, яка приймається за розрахункову;
- джерела енергії та квазіоднорідна маса елементів рівномірно розподілені в елементарному об'ємі;
- стінки кожуха РЕА достатньо тонкі, температурне поле кожної грані – рівномірне;
- повна теплоємність заповнювача між нагрітою зоною і кожухом значно мала.

З урахуванням зроблених допущень отримана явна різницева розрахункова схема (набір екстраполяційних поліномів) шляхом безпосереднього застосування гіпотез Фур'є і Ньютона до кожного елементарного об'єму розбиття і грані кожуха. Такий метод отримання екстраполяційних поліномів відрізняється інженерною простотою і наочністю результатів у порівнянні із звичайними методами сіток розв'язання задач нестационарної теплопровідності. Доповнення розрахункової схеми залежністю потужності і теплофізичних коефіцієнтів від температури і часу дозволяє практично досліджувати методом елементарних балансів нестационарні температурні поля РЕА із довільним законом зміни цих параметрів. При цьому закон зміни може бути безперервний, дискретний і заданий в довільній формі: аналітично, табличний або в змішаній формі.

Шляхом математичного аналізу і порівняльних розрахунків (рис. 4) встановлено, що помилка методу, що визначається трьома першими допущеннями, при виборі кроку часу $\Delta\tau$ з умови стійкості явної різницевої розрахункової схеми, є лінійною функцією кроку розбиття на

елементарні об'єми Δi ($i = x, y, z$). Це дозволяє методом подвійного рахунку при Δi і $2\Delta i$ оцінити помилку методу, як різницю між значеннями температур першого та другого рахунку.

Рис. 3. Середні температури блоку у формі паралелепіпеда ($P_0 = 4$ Вт; $\beta = 0,004$ град⁻¹) 1 – розрахунок; 2 – дослід; 3 – розрахунок без урахування поправки до темпу регулярного режиму на температурну залежність потужності

Рис. 4. Розрахована відносна температура в центрі пластині. – розрахунок за аналітичними залежностями. Розрахунок по методу елементарних балансів: ---- – при $2R/\Delta x = 1,3$; x ---- x – розрахунок за методом елементарних балансів при $2R/\Delta x = 7$

У табл. 3 приведено залежність помилки розрахунку температури δt в центрі пластини від кількості елементарних об'ємів розбиття. форм. Допущення четверте викликане особливостями побудови нагрітої зони РЕА і накладає умову на характер розрахункової температури як деякої середньої температури елементарного об'єму і на спосіб розбиття на елементарні об'єми.

Таблиця 3

Залежність помилки від числа елементарних об'ємів

R/ Δx	7	13	25	49
δt 100%	8,4	4,1	1,7	1,0

Необхідно щоб у межах такого об'єму були зосереджені елементи монтажу близькі за потужністю та теплофізичними коефіцієнтами. Допущення п'яте і шосте є типовими для теплових моделей РЕА, і їх правомочність

підтверджена розрахунками одноблокових апаратів різних форм. На основі алгоритму методу елементарних балансів складено програму рахунку і виконано розрахунки температурних полів РЕА, потужність яких змінювалася, як безперервна функція температури і дискретна функція часу. Це дозволяло досліджувати характер температурних полів апаратів з нерівномірним розподілом джерел енергії (рис. 5), температурні режими елементів за об'ємом нагрітої зони (рис. 6) і т.д.

Рис. 5. Характер регуляризації температурного поля РЕА з нерівномірним розподілом джерел енергії і $\eta_m > 1$: 1,2 – циліндровий блок ($H = 127$ мм; $D = 315$ мм); 3,4 – блок у формі паралелепіпеда (460 x 423 x 265 мм). --- – розрахунок; x --- x – дослід; τ_{p1} τ_{p2} – розрахунок за (12) при $\delta \epsilon_{доп} = 1\%$

Рис. 6. Об'ємне температурне поле РЕА розрахунок: □---□ – масив I; o---o – масив II; Δ---Δ – масив IУ; Дослід: x --- x – контрольна термопара в масиві II; 1, 4, 5 – максимальна температура в центрі масивів. 2 – контрольна термопара. 3, 6 – мінімальна температура на периферії масивів

Проведені температурні випробування і порівняння експериментальних і розрахункових методів дослідження теплових режимів РЕА із змінною потужністю з метою отримання необхідної інформації:

- для оцінки правомочності основних допущень, прийнятих при розробці розрахункових схем (алгоритмів) дослідження теплових режимів апаратів по методу регулярного теплового режиму і методу елементарних балансів;

- для отримання значень ефективної середньої теплопровідності нагрітої зони досліджуваних РЕА, що входить в розрахункову залежність обох алгоритмів. Температурним випробуванням піддавалися одноблокові радіоелектронні апарати в пилозахисному кожусі у формі паралелепіпеда з середньою ($\eta_m > 1$) і високою ($\eta_m \gg 1$) густиною монтажу нагрітої зони. Нагріті зони РЕА були зібрані в основному з малогабаритних електромагнітних реле (джерела енергії з температурозалежною потужністю), резисторів, діодів і інших елементів. В апаратах з середньою густиною монтажу джерела енергії були розподілені у край нерівномірно. В апараті циліндрової форми частина дослідів проводилася при послідовному включенні і виключенні джерел по певній тимчасовій діаграмі протягом всього часу функціонування, що складало 60 – 105 хвилин. Таким чином, мав місце рівномірний ($n = 1$) і нерівномірний ($n = 0$) розподіл джерел енергії, потужність яких змінювалася, як безперервна функція температури і дискретна функція часу. В розділі запропонована методика проведення температурних випробувань на спеціально розробленому стенді. Досліди з РЕА проводилися в умовах природної конвекції при нормальному атмосферному тиску і постійній температурі середовища.

Зроблено оцінку точності вимірювального комплексу, де як температурні датчики використовувалися мідно - константанові термопари з діаметром дротів 0,1 – 0,2 мм. Максимальна помилка вимірювання температури складала $\pm(1-2)^\circ\text{C}$. Отримані закономірності і кількісні зміни нестационарних експериментальних температурних полів РЕА (рис. 7, 8) задовільно експонують з теоретичними дослідженнями і розрахунками (рис. 1, 3, 5, 6), наведеними в розділах 2, 3, 4, тобто підтверджують повноважність основних допущень розрахункових методів дослідження теплових режимів апаратів, заснованих на теорії регулярного режиму та методу теплових балансів.

Проведені експериментальні дослідження теплових режимів елементів РЕА, працюючих в умовах вакууму.

Мета експериментального дослідження теплових режимів елементів і електронної апаратури полягала у визначенні температур перегріву, характеру температурного поля груп елементів і плат залежно від ступеня вакууму, взаємного розташування елементів і плат, а також порівняння отриманих даних з результатами теоретичного дослідження і даними експериментів,

проведеними в умовах нормального атмосферного тиску.

Рис. 7. Температурні поля РЕА із середньою густиною монтажу і нерівномірним розподілом температурозалежних джерел енергії:

а) апарат циліндрової форми ($H = 127$ мм; $D = 315$ мм; $\Sigma P_0 = 25$ Вт);

б) апарат у формі паралелепіпеда ($460 \times 423 \times 263$ мм); $\Sigma P_0 = 60$ Вт

о ---- о – нагрівання (ϵ); х ---- х – охолодження (ϑ).

Дослідження проводилися на спеціально виготовленому стенді зображеному на рис. 8. Наведено методику проведення експериментів на теплових макетах і на діючих апаратах, працюючих за певною часовою діаграмою.

а

б

Рис. 8. Експериментальна установка з вакуумною камерою:

а – випробування групи радіоелементів; б – випробування приладу.

Встановлено, що при переході від нормального тиску до вакууму (10^{-1} мм. рт. ст.) у всіх точках блоку спостерігається підвищення температури перегріву на 3 – 10 град, що у відносному відношенні складає 20 – 35% і задовільно узгоджується з результатами розрахунків (рис. 9, 10).

У роботі запропоновано методику проведення експериментів на теплових макетах і на діючих апаратах, працюючих за певною часовою діаграмою.

У п'ятому розділі проведено аналітичні дослідження точності методів регулярного теплового режиму, які використовуються для експериментального визначення ефективної теплопровідності нагрітих зон РЕА. Виконане теоретичне дослідження показало, що вживаний метод дозволяє з мінімальною помилкою визначати в умовах природної конвекції значення λ які не перевищують одиниці. При експериментальному визначенні λ більшого за одиницю ($Bi < 3$) метод призводить в умовах природної конвекції до великих помилок.

Отримано експериментальну залежність ефективної теплопровідності від величини зазору між блоками що враховує конвекцію і випромінювання (рис. 11).

Проведені дослідження теплофізичних коефіцієнтів одноблокових радіоелектронних апаратів підприємства. Результати статистичної обробки РЕА показали слабу залежність питомої теплоємності від елементної бази нагрітої зони апарату, що дозволяє прийняти її постійним значенням 860 Дж / кг \cdot °С.

Рис. 9. Температурне поле теплового макета при нормальному тиску

Рис. 10. Температурне поле теплового макета у вакуумі

Об'ємна теплоємність на початковій стадії теплофізичного проектування може бути рекомендованою з постійним значенням $3,25 \cdot 10^3 \text{ Дж / кг} \cdot ^\circ\text{C}$ з подальшим уточненням в наслідок більш істотної залежності від конструкції апарату.

Рис. 11. Залежність ефективної теплопровідності від величини зазору між блоками:

————— — апроксимація дослідних значень; o — дослідні значення при вертикальному розташуванні макета; x — дослідні значення при горизонтальному розташуванні макета; □ — дослідні значення за методом «багатьох точок».

Значення теплофізичних коефіцієнтів λ , C , γ апаратури дозволяють здійснювати розрахунки теплових режимів РЕА вже на початкових стадіях проектування апаратів, коли елементна база задана орієнтовно.

У таблиці 4 наведено відносну середньоквадратичну погрішність результатів серії вимірювань.

Таблиця 4

Оцінка точності апроксимації

Тип плати	Плати теплопровідні і нетеплопровідні		Плати теплопровідні		Плати нетеплопровідні	
	10	40	10	25	15	40
Значення λ , вт/м·град	λ_z	λ_z	$\lambda_{x,y}$	$\lambda_{x,y}$	$\lambda_{x,y}$	$\lambda_{x,y}$
Відносна середньо квадратична помилка $\delta G_i = \frac{G_m}{\lambda_{cp}} 100\%$	3	6	4	8	13	15

Шостий розділ присвячений апробації і структурному синтезу в одноблокових РЕА

працюючих в умовах нестационарних теплових режимів. Представлена загальна теплова модель одноблокових РЕА та її математичний опис. Отримані розв'язки для різних випадків симетричної концентрації джерел (стоків) тепла в об'ємі нагрітої зони. Розроблені до теперішнього часу методи розрахунку температурних полів РЕА дозволяють визначати тепловий режим такого апарату, конструкція якого вже розроблена, тобто вирішують задачу аналізу.

Методи аналізу дозволяють вирішувати цю задачу шляхом розрахунку декількох варіантів конструкцій апарату, тобто методом проб. Вибраний у такий спосіб варіант не завжди може виявитися оптимальним, а сам процес розрахунків виявляється надзвичайно трудомістким.

Проте в процесі проектування необхідно вибрати конструкцію, розмір, об'єм, розсіювану потужність, спосіб охолодження й інші параметри апарату за заданою допустимою температурою, тобто вирішити задачу синтезу.

Під синтезом РЕА із заданим тепловим режимом розуміється задача кількісного визначення параметрів форми апарату (нагрітої зони), теплофізичних коефіцієнтів і потужності джерел і стоків тепла, які з урахуванням обмежень на кожний параметр, що накладаються технічним завданням, електричною схемою, механічними діями і так далі, забезпечать те, що вимагається просторово – тимчасова зміна $t_{\text{номрїб.}}(x, y, z, \tau)$ температурного поля апарату [2].

Отримано математичний вираз алгоритму синтезу РЕА за заданою максимальною температурою у вигляді рівняння зв'язку між параметрами синтезу F_j за відсутності об'ємних стоків енергії ($q = 0$):

$$F_0 \cdot F_\phi \cdot F_\lambda \cdot F_{a\lambda} \cdot F_{ak} \cdot F_w \leq 1, \quad (20)$$

де F_0 – початковий параметр;

F_ϕ – параметр форми параллелепіпеду;

F_λ – параметр ефективної теплопровідності нагрітої зони;

$F_{a\lambda}$ – параметр анізотропності за теплопровідністю;

F_{ak} – параметр анізотропності по теплообміну на гранях параллелепіпеду

($k_x \neq k_y \neq k_z$);

F_w – параметр впливу закону концентрації потужності джерел тепла в об'ємі нагрітої зони.

Початковий параметр визначається:

$$F_0 = \frac{P_0}{\vartheta_0} \cdot \frac{1}{4\lambda_0 \cdot V^{1/3}} \cdot \frac{0,82A_0^3}{3\mu_0^2}, \quad (21)$$

$$B_{i_0} = \frac{k_0}{\lambda_0} \cdot \frac{1}{2} \sqrt[3]{V}, \quad (22)$$

де P_0 – сумарна потужність джерел тепла, Вт; ϑ_0 – максимальний допустимий перегрів апарату, град.; λ_0 – ефективна теплопровідність за відсутності теплостоків при газовому (повітряному) заповнювачі, Вт/м·град; V – об'єм нагрітої зони, м³; A_0, μ_0 – амплітуди і власні значення при B_{i_0} ; K_0 – середній поверхневий коефіцієнт теплопередачі;

Із (21) безпосередньо випливає, що початковий параметр можна мінімізувати за рахунок зменшення відношення P_0/ϑ_0 , збільшення об'єму нагрітої зони V і збільшення інтенсивності поверхневого теплообміну K_0 . Розглянемо кожний фактор окремо. Зменшення відношення P_0/ϑ_0 пред'являє певні вимоги до розробки електричної схеми апарату.

Доцільно для реалізації схемних рішень вибирати елементну базу і матеріали з найменшою споживаною потужністю і високою температуростійкістю. У випадку необхідності використання окремих елементів з малою допустимою температурою перегріву ϑ_0 доцільно виділяти ці елементи в самостійну групу, щоб не ускладнювати забезпечення теплового режиму конструкції апарату в цілому. Це зауваження дуже важливо враховувати при виборі елементної бази електричної схеми, оскільки після завдання конструктором електричної схеми він не має можливості впливати на фактор розсіювання потужності і температуростійкості елементів схеми.

Аналіз показує, що для одноблокових кубічних конструкцій РЕА об'ємом $\sqrt[3]{V} > 0,5$ м мінімізація початкового параметра F_0 за рахунок збільшення об'єму нагрітої зони (густини розміщення елементів) і переходу до більш інтенсивної системи поверхневого охолодження ($K_0 \rightarrow \infty$) стає практично неможливо.

Навпаки, для конструкції об'ємом $\sqrt[3]{V} > 0,5$ м збільшення об'єму і ріст K_0 приводять до мінімізації F_0 в три рази при $\sqrt[3]{V} = 0,1$ м і на 50% при $\sqrt[3]{V} = 0,3$ м за рахунок зміни K_0 від 4 Вт/м²·град до ∞ . Практично вже при $K_0 \geq 100$ Вт/м²·град. настає граничний випадок, тобто для апаратів з газовим заповнювачем (з малою ефективною теплопровідністю $\lambda = 0,2$ Вт/м·град) не недоцільно використовувати рідинні та інші більш ефективні системи поверхневого охолодження.

Параметр форми паралелепіпеду

$$F_{\phi} = 3 \cdot \frac{A_I}{A_0^3} \cdot \mu_0^2 \frac{\sqrt[3]{\xi_{x_0}^2 \cdot \xi_{y_0}^2 \cdot \xi_{z_0}^2}}{(\mu_{x_I} \xi_{x_0})^2 + (\mu_{y_I} \xi_{y_0})^2 + (\mu_{z_I} \xi_{z_0})^2}, \quad (23)$$

$$B_{i_I} = B_{i_0} \frac{\sqrt{\xi_{x_0} \cdot \xi_{y_0} \cdot \xi_{z_0}}}{\xi_{i_0}}; \quad i = x, y, z., \quad (24)$$

$$A_I = A_{x_I}^* \cdot A_{y_I}^* \cdot A_{z_I}^*; \quad (25)$$

$$A_{i_I}^* = A_{i_I} - (A_{i_I} - 1) \cdot (1 - \xi_{i_0}) \quad i = x., y, z. \quad (26)$$

де ξ_{i_0} – відносні довжини сторін параллелепіпеду; $A_{i_I}; \mu_{i_I}; A_0; \mu_0$ – значення амплітуд і власних значень при критерії B_{i_0} та B_{i_I} (табл. 5).

Аналіз залежності (23) показує, що при деформуванні куба ($\xi_{x_0} = \xi_{y_0} = \xi_{z_0}$) в квадратний “брус” ($\xi_{x_0} = \xi_{y_0} = \ell; \xi_{z_0} \rightarrow 0$) того ж об’єму параметр форми F_{ϕ} зменшується, тобто мінімізується. Форма квадратного “брусу” забезпечує більш ефективну мінімізацію параметра форми, ніж будь-яка інша форма того ж об’єму.

Найбільш істотно зменшення параметра F_{ϕ} має місце при значенні критерію $B_{i_0} > 1$. Так, для квадратного брусу при переході від $\xi_z = 1$ (куб) до $\xi_z = 2$ параметр F_{ϕ} мінімізується до 0.4 при $B_{i_0} = \infty$ і до 0.7 при $B_{i_0} = 1$.

Для форми квадратної пластини практично вже при $B_{i_0} \leq 1$ параметр форми зберігає постійне значення, близьке до граничного, тобто $F_{\phi} \approx 1$.

Таким чином, для мінімізації параметра форми необхідно нагрітій зоні апарату надавати форму квадратного “брусу”. При цьому плати з елементами можуть мати квадратну форму з найменшим розміром $2\ell_{\min} \cdot 2\ell_{\min}$ або форму прямокутника $2\ell_{\min} \cdot 2\ell_y$, розміщуючись відповідно перпендикулярно великій або малій осі квадратного брусу.

Практично деформування нагрітої зони до форми квадратного брусу обмежене найбільшим лінійним розміром елемента ℓ_{\max_e} .

Параметр ефективної теплопровідності нагрітої зони.

$$F_{\lambda} = \frac{1}{1 + \frac{\delta_M}{\lambda_0} \cdot \frac{\delta_m}{\Delta + \delta_m}} \cdot \frac{A_2}{A_I} \cdot \frac{(\mu_{X_s} \cdot \xi_{X_0})^2 + (\mu_{Y_s} \cdot \xi_{Y_0})^2 + (\mu_{Z_s} \cdot \xi_{Z_0})^2}{(\mu_{X_2} \cdot \xi_{X_0})^2 + (\mu_{Y_2} \cdot \xi_{Y_0})^2 + (\mu_{Z_2} \cdot \xi_{Z_0})^2}, \quad (27)$$

$$B_i = B_{i_0} \cdot \frac{\sqrt{\xi_{X_0} \cdot \xi_{Y_0} \cdot \xi_{Z_0}}}{\xi_{i_0}} \cdot \frac{\lambda_0}{\lambda_{max}}; \quad i = x, y, z. \quad (28)$$

Таблиця 5

Значення A_i, μ_i в залежностівід B_i

B_i	A_i	μ_i
0,00	1,0000	0,0000
0,01	1,0020	0,0998
0,10	1,0159	0,3111
0,50	1,0701	0,6533
0,60	1,0813	0,7051
0,70	1,0918	0,7506
0,80	1,1016	0,7910
0,90	1,1192	0,8603
1,00	1,1192	0,8603

$$\frac{\lambda_0}{\lambda_{max}} = \frac{1}{1 + \frac{\lambda_n}{\lambda_0} \frac{\delta_m}{\Delta + \delta_m}}, \quad (29)$$

де λ_0, λ_m – ефективна теплопровідність нетеплопровідної і теплопровідної плати;

δ – товщина плати; Δ – відстань між платами; A_i, μ_i – амплітуди і власні значення при B_{i_0} ; ξ_I – відносні розміри сторін апарату;

$$A_2 = A_{x_2}^* A_{y_2}^* A_{z_2}^*; \quad A_{i_2}^* = A_{i_2} - (A_{i_2} - 1)(1 - \xi_{i_0}); \quad (30)$$

де A_{i_2}, μ_{i_2} – значення амплітуд і власних значень при B_{i_2} .

Параметр анізотропності по теплопровідності

($\lambda_x \neq \lambda_y \neq \lambda_z$).

Аналіз (27) показує, що форма паралелепіпеда практично не впливає на характер мінімізації параметра F_λ ізотропних нагрітих зон ($\lambda_x = \lambda_y = \lambda_z = \lambda_{max}$). Зі збільшенням λ_{max} параметр F_λ мінімізується. При цьому ефективність мінімізації істотно зростає із зростанням інтенсивності охолодження на поверхні нагрітої зони.

При зростанні B_{i_0} від 0.5 до 20 параметр F_λ відповідно мінімізується від 1 до рівнів від 0.7 до 0.07.

Досягнення граничних рівнів мінімізації спостерігається при певних значеннях ефективної теплопровідності для кожного B_{i_0} . Подальше збільшення λ_{max} практично не викликає істотної зміни F_λ .

Конструктивно змінювати теплопровідність нагрітої зони можна двома шляхами. Перший шлях полягає в застосуванні високотеплопровідних заповнювачів. У цьому випадку нагріта зона буде ізотропною за теплопровідністю ($\lambda_x = \lambda_y = \lambda_z = \lambda_{max}$), тобто буде задовольняти всім розглянутим вище закономірностям мінімізації параметра F_λ . Параметр анізотропності при

цьому буде дорівнювати одиниці ($F_{a\lambda}$).

Другий шлях полягає в застосуванні плоских теплостоків, виконаних або у вигляді суцільних металічних плат (мідь, дюралюміній та ін.), або у вигляді теплопровідних пластин за розміром плат. При цьому матиме місце анізотропія за теплопровідністю ($\lambda_x = \lambda_y = \lambda_{\max} \neq \lambda_z$), що потребує дослідження впливу параметра анізотропності $F_{a\lambda}$.

Параметр анізотропності по теплопровідності ($\lambda_x \neq \lambda_y \neq \lambda_z$)

$$F_{a\lambda} = \zeta^2 \frac{A_3 (\mu_{x_2} \xi_{x_0})^2 + (\mu_{y_2} \xi_{y_0})^2 + (\mu_{z_2} \xi_{z_0})^2}{A_2 (\mu_{x_3} \xi_x)^2 + (\mu_{y_3} \xi_y)^2 + (\mu_{y_3} \xi_z)^2}; \quad (31)$$

$$B_{i_{i_3}} = B_{i_0} \frac{\sqrt{\xi_{x_0} \xi_{y_0} \xi_{z_0}}}{\xi_{i_0}} \cdot \frac{\lambda_0}{\lambda_{\max}} \cdot \frac{\lambda_{\max}}{\lambda_i}; \quad i = x, y, z; \quad (32)$$

$$A_3 = A_{x_3}^* A_{y_3}^* A_{z_3}^*; A_{i_3}^* = A_{i_3} - (A_{i_3} - 1)(1 - \xi_i); \quad i = x, y, z; \quad (33)$$

$$\zeta = \frac{\min_i (l_{\min} \sqrt{\lambda_{\max} / \lambda_i})}{l_{\min}}; \quad \xi_i = \xi_{i_0} \frac{\zeta}{\sqrt{\lambda_{\max} / \lambda_i}}, \quad (34)$$

де K_i – коефіцієнти теплопередачі на гранях нагрітої зони, $\text{Вт}/\text{м}^2 \cdot \text{град}$.

З (22) випливає, що малі значення Bi_0 відповідають апаратам з лінійними розмірами $\sqrt[3]{V} < 0.1$ м при слабкому поверхневому охолодженні (природна конвекція в повітрі $K_0 \approx 4 - 5$ $\text{Вт}/\text{м}^2 \cdot \text{град}$ і $\lambda_0 \approx 0.2$ $\text{Вт}/\text{м} \cdot \text{град}$). Великі значення критерію Bi_0 відповідають апаратам з $\sqrt[3]{V} > 0.1$ м, а також РЕА з інтенсивним охолодженням.

Аналіз показує, що кількісно параметр $F_{a\lambda} \geq 1$, тобто задача мінімізації цього параметра полягає в приведенні його до одиничного значення. При малих значеннях $Bi_0 < 1$ параметр $F_{a\lambda} \approx 1$, тобто мінімізований.

При великих значеннях $Bi_0 > 1$ мінімізація параметра анізотропності для різних типів теплостоків може бути здійснена за рахунок їх правильного розміщення в об'ємі при заданій формі нагрітої зони, а саме теплостоки завжди повинні розміщуватись вздовж найменшого лінійного розміру ($\xi_{i_0} = 1$). Порушення цієї вимоги різко знижує ефективність використання теплостоків, оскільки параметр анізотропності $F_{a\lambda}$ наближається до зворотної величини

граничного значення параметра ефективної теплопровідності $F_{\lambda\infty}$.

Тоді добуток цих параметрів буде близький до 1 ($F_{\lambda} \cdot F_{\lambda\infty} \approx 1$), тобто застосування теплостоків стає недоцільним, оскільки не сприяє мінімізації параметра синтезу F_{λ} .

Форма квадратного “брусу” у випадку плоских теплостоків і квадратної пластини у випадку лінійних теплостоків забезпечують граничну мінімізацію параметра анізотропності при розміщенні теплостоків вздовж найменших лінійних розмірів.

Таким чином, застосування плоских теплостоків, які звичайно технологічно виконуються або у вигляді суцільних теплопровідних плат, або спеціальних теплопровідних пластин за формою плат, накладає обмеження на розміщення і форму монтажних плат в оптимальній формі квадратного “брусу”. Плати повинні мати квадратну форму з найменшим лінійним розміром нагрітої зони і розміщуватись перпендикулярно великій осі “брусу”. Неправильне розміщення плат різко зменшує ефективність використання теплостоків.

Параметр анізотропії по теплообміну на гранях паралелепіпеда ($\kappa_x \neq \kappa_y \neq \kappa_z$).

$$F_{ak} = \frac{A}{A_3} \frac{(\mu_{x_3} \cdot \xi_x)^2 + (\mu_{y_3} \cdot \xi_y)^2 + (\mu_{z_3} \cdot \xi_z)^2}{(\mu_x \cdot \xi_x)^2 + (\mu_y \cdot \xi_y)^2 + (\mu_z \cdot \xi_z)^2}; \quad (35)$$

$$B_i = B_{i_0} \frac{\sqrt{\xi_{x_0} \cdot \xi_{y_0} \cdot \xi_{z_0}}}{\xi_{i_0}} \cdot \frac{\lambda_0}{\lambda_i} \div \frac{K_i}{K_0}; \quad i = x, y, z; \quad (36)$$

$$A = A_x^* \cdot A_y^* \cdot A_z^*; \quad A_i^* = A_i - (A_i - 1)(1 - \xi_i), \quad (37)$$

де A_i, μ_i - значення амплітуд і власних значень при B_i ;

K_i - коефіцієнти теплопередачі на гранях нагрітої зони, $\text{ют/м}^2 \cdot \text{град}$.

Параметр впливу закону концентрації потужності і джерел тепла в об'ємі нагрітої зони [2].

При введенні об'ємних температурозалежних стоків, потужність яких істотно перевищує потужність поверхневих стоків, алгоритм синтезу за максимальною стаціонарною температурою виражається рівнянням зв'язку вигляду

$$F_q \leq 1, \quad (38)$$

$$F_q = P_0 / V \cdot q_v. \quad (39)$$

Згідно з (38) і (39) для отримання оптимальних конструкцій РЕА, що дозволяють використовувати в схемах елементи з максимальною споживаною потужністю при заданому максимальному перегріві, необхідно мінімізувати параметри синтезу F_j в межах обмежень, накладених на кожний параметр технічним завданням на розробку апарату.

Внаслідок теплофізичного синтезу отримуємо конструкцію апарату, що забезпечує при сумарній потужності P_0 температурний режим нагрітої зони, що не перевищує температуру $t_0 = \theta_0 + t_c$. У процесі синтезу визначаються габаритні основні розміри кожуха і нагрітої зони, кількість і розміщення плати, а також розміщення елементів на платі.

Надано загальну характеристику теплових макетів і методику проведення експериментальних температурних досліджень за визначенням впливу конструктивних основних і теплофізичних параметрів на температурне поле РЕА. Проведена оцінка точності вимірювань.

У **додатках** наведено методи розрахунку суми ξ числового ряду (2.73) в нерівності (2.72), темпу регулярного режиму трьохскладової системи тіл (РЕА), визначення середньої ефективної теплопровідності нагрітої зони методом регулярного режиму, приведені типи блоків які піддавалися розрахунку, приклади синтезу одноблокових радіоелектронних апаратів по максимальній допустимій температурі, акти впровадження результатів дисертаційної роботи.

ВИСНОВКИ

1. Конструювання сучасних РЕА, поряд з розробкою електричних схем, вимагає строгого урахування температурного режиму майбутньої конструкції. Це ставить перед конструктором задачу здійснити теплофізичне конструювання на всіх стадіях розробки надійної, економічної, малогабаритної РЕА. Спроба емпіричного пошуку прийняттого варіанта конструкції стає економічно не виправданою. Тому в поданій роботі розроблено алгоритм теплофізичного проектування, який забезпечує синтез температуростійкої конструкції апарату.

2. Літературні джерела що до теплофізичного конструювання РЕА із заданим тепловим режимом представлені, головним чином, журнальними статтями. Основні розробки спрямовані на вибір та оптимальне використання повітряних систем охолодження. Монографії що до загального конструювання РЕА передбачають лише повірочні розрахунки температурних полів. Теплофізичне конструювання проводиться на основі багаторазових розрахунків при різних значеннях параметрів, тобто використовується метод проб і помилок.

3. Розв'язано задачу регулярного теплового режиму трьохскладової системи тіл, нагрітої зони, в якій рівномірно розподілені внутрішні джерела енергії, потужність яких лінійно залежить від температури:

– отримано розрахункові залежності для коефіцієнта форми нагрітої зони з деформованою поверхнею по відношенню до кулі, циліндра або пластини і темпу регулярного режиму.

– підтверджено, що на відміну від систем з постійною потужністю джерел, темп регулярного режиму залежить від величини та характеру розподілу початкової потужності та температурного коефіцієнта потужності і відрізняється чисельно від темпу регулярного режиму простого охолодження.

– досліджено вплив темпу регулярного режиму на точність розрахунку температури методом регулярного режиму, і підтверджено необхідність урахування поправки, викликані температурнозалежними джерелами.

4. Виконані дослідження сходження ряду загального розв’язання рівняння нестационарної теплопровідності однорідного тіла (нагрітої зони) і отримані розрахункові залежності для оцінки часу початку регулярного теплового режиму при різних законах розподілення джерел (рівномірний, периферійний, центральний) і рівномірному початковому полі температури.

5. Встановлено, що характер теплових зв’язків між елементами монтажу нагрітої зони РЕА з типовим повітряним або компаундним заповнювачем однозначно визначається коефіцієнтом

густини монтажу $\eta_M = \frac{\ell_{max}}{\Delta}$, що дозволило з урахуванням особливостей конструкції кожуха здійснити класифікацію РЕА.

Для досліджень було вибрано одноблокові апарати в герметичному (пилозахищеному) кожусі з густим монтажем ($\eta_M \gg 1$) і монтажем середньої густини ($\eta_M > 1$), теплова модель яких являє собою трьохскладову систему тіл.

6. Підтверджено можливість використання для РЕА з температурозалежними джерелами енергії розрахункових методів дослідження нестационарних теплових режимів, заснованих на теорії регулярного режиму.

7. Розв’язано задачу узагальнення методу елементарних теплових балансів на трьохскладову систему тіл (РЕА) з довільним законом розподілу джерел енергії змінної потужності в нагрітій зоні і змінними теплофізичними коефіцієнтами:

– проведено аналіз основних припущень і встановлено, що помилка методу при виконанні умови стійкості різницевої розрахункової схеми є практично лінійною функцією тільки кроку розбивки на елементарні об’єми.

– досліджено нестационарні температурні поля РЕА із середньою густиною монтажу ($\eta_M > 1$) і нерівномірним розподіленням джерел енергії, потужність яких змінювалась, як нерозривна функція температури і дискретна функція часу.

8. Проведено експериментальні дослідження РЕА з різною густиною монтажу і змінною потужністю показали правильність основних припущень методу регулярного режиму і методу

елементарних балансів. Обидва методи дають можливість з достатньою для практичних цілей точністю дослідити нестационарні теплові режими РЕА із змінною розсіяною потужністю.

9. При переході від нормального тиску до вакууму (10^{-1} мм рт. ст.) в усіх точках блоку відбувається підвищення температури перегріву на 3 – 10 град., що у відсотковому відношенні є 20 – 35% і задовільно узгоджується із результатами розрахунків.

10. Відносне підвищення температури перегріву більш суттєво (до 35%) відбувається на кожусі і платах. Це може бути пояснено суттєвою долею впливу конвективного теплообміну на загальний характер теплообміну кожуху і плат у порівнянні із елементами нагрітої зони.

11. Слід відзначити, що температурний перегрів деяких елементів у умовах РЕА при переході до вакууму підвищується значно менше, ніж при самостійному функціонуванні елемента. Так, для реле РЕС – 9, РЕС – 10 відносне підвищення перегріву в умовах блоку зменшується з 50% до 20% по відношенню до перегріву при нормальному тиску.

12. Згідно з вище наведених п. п. 9 – 11 і теоретичними розрахунками для апаратів інших конструкцій можна зробити висновки, що для РЕА, навіть з середньою щільністю монтажу ($\eta_M > 1$), частка конвективного теплообміну між елементами нагрітої зони мала. Основний теплообмін відбувається шляхом кондукції (теплопровідності) і випромінювання.

13. Загальний характер і закономірності зміни температурного поля в умовах вакууму (10^{-1} мм рт. ст.) у блоці, що функціонує із змінною розсіяною потужністю, залишаються практично такими ж, як в умовах нормального тиску навколишнього середовища.

14. Отримано залежність ефективної теплопровідності від величини зазору між блоками при зміні відстаней в межах 25 – 200 мм. (рис. 11).

15. Проведені дослідження коефіцієнтів λ , C , γ апаратури, що дозволяє здійснити розрахунки теплових режимів РЕА вже на початкових стадіях проектування апаратів, коли елементна база задана орієнтовно.

16. Результати статистичної обробки радіоелектронних апаратів показали малу залежність питомої теплоємності від елементної бази нагрітої зони апарату, що дозволяє прийняти її постійним значенням $860 \text{ Дж} / (\text{кг} \text{ } ^\circ\text{C})$. Об'ємна теплоємність на початковій стадії теплофізичного конструювання може бути рекомендованою з постійним значенням $3,25 \cdot 10^3 \text{ Дж} / (\text{кг} \text{ } ^\circ\text{C})$ з наступним уточненням внаслідок більш суттєвої залежності від конструкції апарату.

17. Показано, що для розв'язання загальної задачі синтезу одноклокових РЕА із заданим тепловим режимом необхідно задати допустимі межі зміни параметрів синтезу, тобто межу на кожний параметр. Це приведе до необхідності розв'язання прямих задач теплопровідності.

18. Сучасний математичний апарат не дозволяє отримати аналітичний розв'язок інтегрального рівняння зворотної задачі теплопровідності при довільному законі зміни допустимої

температури по об'єму РЕА. Тому задача була обмежена отриманим алгоритмом синтезу РЕА за максимальною, стаціонарною допустимою температурою РЕА.

19. Отримано алгоритм синтезу одноблокових РЕА за заданою максимальною температурою, що виражається нерівністю (20).

20. Показано, що процес теплофізичного проектування зводиться до послідовної мінімізації параметрів синтезу для виконання нерівності (20) і задоволення обмежень, накладених на параметри синтезу технічними умовами і т.д.

21. За отриманим алгоритмом проведено синтез РЕА та виконані експериментальні дослідження температурних полів синтезованих конструкцій (Додаток Е).

22. Проведено теоретичні і експериментальні дослідження впливу геометричних розмірів, форми, теплофізичних коефіцієнтів на параметри синтезу, що дозволяє дати рекомендації, які забезпечують оптимальну мінімізацію кожного параметру.

23. Ефективна мінімізація початкового параметру (21) може бути здійснена для конструкцій апаратів з лінійним розміром 0,5 м за рахунок переходу до малої густини монтажу або збільшення ефективності системи поверхневого охолодження. Для конструкцій з лінійними розмірами більшими за 0,5 м мінімізація початкового параметру практично неможлива.

24. Встановлено, що перехід до конструкцій у формі квадратного “бруса” забезпечує найбільш ефективну мінімізацію параметра форми. Ступінь мінімізації зростає із зростанням ефективності системи охолодження апарату.

25. Ступінь мінімізації параметру теплопровідності (27) залежить від інтенсивності системи охолодження і лінійного розміру апарату. При лінійних розмірах апарату більших від 0,5 м, або при інтенсивному поверхневому охолодженні має місце максимальна мінімізація параметру теплопровідності. Встановлено, що підвищення ефективної теплопровідності більше за 2 – 4 Вт/м · град не викликає подальшої мінімізації. Отже не слід намагатись підвищити теплопровідності заповнювачів (компаундів) більшої, ніж ці значення.

26. Мінімізація параметра анізотропності (31) за теплопровідністю потребує такого розміщення плат, щоб мінімальні розміри нагрітої зони апарату співпали з напрямом дії максимальної теплопровідності. Для оптимальної форми квадратного “бруса” та плоских теплостоків ця умова виконується при розміщенні квадратних плат перпендикулярно більшій осі “бруса”, що приводить до граничної мінімізації параметру анізотропності по теплопровідності. Порушення цієї умови різко знижує ефективність кондуктивних теплостоків.

27. Концентрація елементів, що розсіюють тепло, до центру нагрітої зони сприяє підвищенню параметра потужності, тобто незадовільно впливає на температурний режим елемента в порівнянні з рівномірним розподілом потужності джерел.

28. Мінімізація параметру потужності можлива за рахунок концентрації (розміщення) тепловиділяючих елементів на периферії нагрітої зони апарату. Ступінь мінімізації визначається інтенсивністю поверхневого охолодження апарату, величиною ефективної теплопровідності нагрітої зони і розмірами апарату. Для апаратів з лінійними розмірами меншими за 0,5 м і малою ефективністю поверхневого охолодження або з великою ефективною теплопровідністю закон концентрації тепловиділяючих елементів практично не впливає на параметр потужності у порівнянні з рівномірним розподілом. Має місце лише переміщення максимальної температури з центральної зони до периферії.

29. У апараті з плоскими теплостоками в умовах звичайної конвекції нерівномірність розподілення потужності практично не впливає на максимальний перегрів.

30. Оптимальна форма і характер розміщення плат з елементами в об'ємі нагрітої зони визначається умовами мінімізації параметру анізотропності за теплопровідністю (дивитись п. 27), а оптимальне розміщення елементів на платах впливає з умови мінімізації параметру потужності.

31. Показано, що якщо мінімізація всіх параметрів синтезу в границях заданих обмежень не забезпечує виконання нерівності (20), то необхідно від поверхневих систем охолодження перейти до більш складних в конструктивній реалізації об'ємних систем охолодження. Синтез апарату в цьому випадку проводиться за алгоритмом (39) і зводиться до відносного вибору параметрів систем охолодження.

32. Створений метод розрахунків теплових режимів радіоелектронної апаратури легко реалізується на ЕОМ, що дозволяє широко використовувати її в системах автоматичного проектування радіоелектронних апаратів на початкових етапах їх проектування.

СПИСОК ОПУБЛІКОВАНИХ ПРАЦЬ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

1. Синотин А. М. Проектирование одноблочных радиоэлектронных приборов с заданным тепловым режимом / В. В. Семенец, А. М. Синотин, Т. А. Колесникова – Харьков: Навчально-науковий видавничо-поліграфічний центр ХНУРЕ, – 2006. – 171 с.

2. Синотин А. М. Исследование влияния характера размещения источников тепла на температурное поле аппарата / А. М. Синотин // Автоматизированные системы управления и приборы автоматики. – 2002. – Вып. 119. – С. 50 – 53.

3. Синотин А. М. Минимизация параметра эффективной теплопроводности нагретых зон радиоэлектронных аппаратов / И. Ш. Невлюдов, А. М. Синотин // Радиоэлектроника и информатика. – 2002. – № 3. – С. 18 –19.

4. Синотин А. М. Влияние объёма нагретой зоны и интенсивности системы поверхностного

охлаждения на максимальный перегрев аппарата / И. Ш. Невлюдов, А. М. Синотин // Радиоэлектроника и информатика. – 2002. – № 4. – С. 11– 12.

5. Синотин А. М. Общая тепловая модель одноблочных радиоэлектронных аппаратов и её математическое описание / А. М. Синотин // Радиотехника. – 2002. – № 129. – С. 169 – 172.

6. Синотин А. М. Теплофизические и конструктивные параметры алгоритма синтеза багатоплатных РЭА по максимальному допустимому перегреву / А. М. Синотин // Радиотехника. – 2003. – № 131. – С. 145 – 149.

7. Синотин А. М. Влияние формы нагретой зоны на максимальный перегрев аппарата / А. М. Синотин // Радиоэлектроника и информатика. – 2003. – № 4. – С. 27 – 30.

8. Синотин А. М. Исследование влияния элементов радиоэлектронного аппарата на эффективную теплопроводность в основных направлениях / А. М. Синотин // Автоматизированные системы управления и приборы автоматики. – 2003. – Вып. 124. – С. 61 – 66.

9. Синотин А. М., Начало регулярного теплового режима в анизотропных телах / А. М. Синотин, В. В. Семенец // Радиоэлектроника и информатика. – 2004. – № 2. – С. 20 – 22.

10. Синотин А. М. Влияние анизотропии теплопроводности на эффективность минимизации параметра F_λ . Оптимальное размещение плат с плоскими теплостоками / А. М. Синотин // Радиотехника. – 2004. – № 136. – С. 143 – 145.

11. Синотин А. М. Алгоритм теплового синтеза различных конструкций одноблочных радиоэлектронных аппаратов / А. М. Синотин // Прикладная радиоэлектроника. – 2004. – Т. 3, № 3. – С. 110 – 113.

12. Синотин А. М. Комбинированный метод определения эффективной теплопроводности для сложных систем при $\lambda > 1$ / А. М. Синотин // Прикладная радиоэлектроника. – 2004. – Т.3, № 1. – С. 82 – 84.

13. Синотин А. М. Математическая модель сложной системы тел и её эффективная теплопроводность / А. М. Синотин, Т. А. Колесникова // Автоматизированные системы управления и приборы автоматики. – 2004. – Вып. 128. – С. 16 – 18.

14. Синотин А. М. Метод определения эффективных теплопроводностей сложных систем тел / А. М. Синотин, В. В. Семенец // Автоматизированные системы управления и приборы автоматики. – 2004. – № 127. – С. 48 – 52.

15. Синотин А. М. Метод определения коэффициента формы аппарата сложной конфигурации / А. М. Синотин // Радиоэлектроника и информатика. – 2004. – № 3. – С. 20 – 22.

16. Синотин А. М. Исследование точности метода многих точек для определения теплопроводности анизотропных материалов / А. М. Синотин, В. И. Азаренков // Автоматизированные системы управления и приборы автоматики. – 2004. – Вып. 129. – С. 37 – 40.
17. Синотин А. М. Экспериментальное исследование тепловых режимов радиоэлектронных аппаратов работающих в условиях вакуума / А. М. Синотин, Т. А. Колесникова // Автоматизированные системы управления и приборы автоматики. – 2005. – Вып. 132. – С. 61 – 65.
18. Синотин А. М. Исследование теплообмена тел простейшей геометрической формы в вакууме / А. М. Синотин, Т. А. Колесникова // Автоматизированные системы управления и приборы автоматики. – 2005. – Вып. 131. – С. 92 – 96.
19. Синотин А. М. Экспериментальное исследование тепловых режимов радиоэлектронных элементов работающих в условиях вакуума / А. М. Синотин, Т. А. Колесникова // Автоматизированные системы управления и приборы автоматики. – 2005. – Вып. 130. – С. 56 – 59.
20. Синотин А. М. Экспериментальное исследование эффективной теплопроводности в электронных аппаратах с малой плотностью монтажа / В. И. Азаренков, А. М. Синотин // Радиотехника. – 2005. – № 140. – С. 111 – 117.
21. Синотин А. М. Исследование теплофизических коэффициентов сложных систем / А. М. Синотин // Прикладная радиоэлектроника. – 2005. – № 2. – С. 240 – 242.
22. Синотин А. М. Синтез одноблочных радиоэлектронных аппаратов с заданным тепловым режимом / А. М. Синотин, Т. А. Колесникова // Прикладная радиоэлектроника. Состояние и перспективы развития: 2 – й Междунар. радиоэлектронный форум. Харьков, 19 – 23 сентября, 2005 г. М–во освіти і науки України. – Т. 6. – С. 103 – 107.
23. Синотин А. М. Методы исследования эффективной теплопроводности нагретых зон многоплатных одноблочных радиоэлектронных аппаратов / А. М. Синотин // 10 - я юбилейная международная научная конференция "Теория и техника передачи, приёма и обработки информации" Сб. тезисов докладов. Ч. 2 – Харьков – Туапсе: ХТУРЭ. 28 сентября – 1 октября 2004 г. М–во образования и науки Украины. – С. 173 – 174.
24. Синотин А. М. Синтез одноблочных радиоэлектронных аппаратов с заданным тепловым режимом / А. М. Синотин, Т. А. Колесникова // Научная сессия МИФИ – 2005. Московский инженерно – физический институт. Сборник научных трудов по материалам научной сессии МИФИ 24 – 28 января 2005 г. М – во образования и науки Российской федерации. – М.: 2005 – Т 1. – С. 223 – 224.
25. Синотин А. М. Минимизация перегрева радиоэлектронной аппаратуры / А. М. Синотин, И. А. Чуб, Г. Э. Винокуров // Материалы III-й научно-практической конференции 14 – 15 сентября 1988 г. Министерство внутренних дел Украины. Украинский научно-исследовательский институт

пожарной безопасности. Пожарная безопасность. – К., 1997. – С. 126 – 127.

26. Синотин А. М. Автоматический привод юстировочного устройства / Ю. И. Сальников, А. М. Синотин, С. В. Маслов // Харьковское областное правление общества «Знание» УССР. Харьковское областное правление общества научно-технического творчества машиностроителей. Харьковский институт радиоэлектроники. – Х., 1988. – С. 129.

АНОТАЦІЯ

Синотін А.М. Автоматизація розрахунків нестационарних теплових режимів при проектуванні одноблокових радіоелектронних апаратів. – Рукопис.

Дисертація на здобуття наукового ступеня доктора технічних наук за спеціальністю 05.13.12 – системи автоматизації проектувальних робіт. – Харківський національний університет радіоелектроніки, Харків, 2008.

Дисертаційна робота присвячена дослідженню характеру теплообміну в радіоелектронних апаратах, що функціонують у повітряному середовищі при нормальному атмосферному тиску; розробці методики розрахунку нестационарних температурних полів РЕА з довільним законом зміни розсіюваної елементами потужності від температури і часу; дослідженню впливу конструктивних параметрів апарату з урахуванням анізотропії нагрітих зон по теплопровідності на загальний температурний режим.

Вперше, на основі проведених аналітичних і експериментальних досліджень, отримано алгоритм теплофізичного проектування одноблокових радіоелектронних апаратів, що дозволяє забезпечити заданий температурний режим на початкових етапах конструювання паралельно з розробкою електричної схеми і вибором елементної бази. Це значно підвищує економічну ефективність розробок і виключає необхідність істотних змін в конструкції за наслідками перевірочних розрахунків і температурних випробувань.

Ключові слова: нагріта зона, ефективна теплопровідність, синтез РЕА, регулярний режим, нестационарне температурне поле, темп охолодження (нагрівання) системи.

АННОТАЦИЯ

Синотин А.М. Автоматизация расчётов нестационарных тепловых режимов при проектировании одноблочных радиоэлектронных аппаратов. – Рукопись.

Диссертация на соискание учёной степени доктора технических наук по специальности

05.13.12 – системы автоматизации проектных работ. – Харьковский национальный университет радиоэлектроники, Харьков, 2008.

Диссертационная работа посвящена исследованию характера теплообмена в одноблочных радиоэлектронных аппаратах, функционирующих в воздушной среде при нормальном атмосферном давлении, разработке методики расчёта нестационарных температурных полей РЭА с произвольным законом изменения рассеиваемой элементами мощности от температуры и времени. Исследованию влияния конструктивных параметров на температурное поле аппарата.

В первом разделе проведен анализ состояния и тенденция развития теоретических основ проведения расчётов нестационарных температурных полей радиоэлектронных аппаратов. Проведенный анализ отечественных и зарубежных специалистов, занимающихся проблемами создания надёжных радиоэлектронных аппаратов, показал, что в настоящее время конструктор, работающий в области проектирования аппаратов, должен принимать во внимание не только законы электроники, но и законы переноса и рассеивания тепловой энергии.

Во втором разделе рассмотрена возможность распространения общей теории регулярного режима на тела с внутренними источниками энергии переменной мощности, а именно, закон изменения температуры во времени на стадии регулярного режима, регулярный тепловой режим тела с внутренними источниками энергии мощность которых является линейной функцией температуры, начало регулярного режима тела с внутренними источниками энергии, влияния характера распределения источников энергии на продолжительность иррегулярного режима, приближённый метод определения формы тел сложной конфигурации.

Третий раздел посвящён исследованию теплообмена в радиоэлектронных аппаратах с переменной рассеиваемой мощностью методами регулярного режима, экспериментальной проверке регуляризации температурного поля трёхсоставной системы тел с температурозависимыми источниками энергии, темпа регулярного режима трёхсоставной системы тел с температурозависимыми источниками энергии, построению алгоритма исследования нестационарного теплообмена в радиоэлектронных аппаратах методами регулярного режима,

В четвёртом разделе проведены исследования нестационарного теплового режима в радиоэлектронных аппаратах с произвольным законом изменения мощности методом элементарных балансов. Рассмотрена возможность автоматизации расчётов нестационарного теплового режима радиоэлектронных аппаратов, разработан алгоритм расчёта по методу элементарных балансов. Описана методика проведения экспериментов на тепловых макетах в условиях вакуума. Проведены экспериментальные исследования тепловых режимов радиоэлектронных аппаратов в условиях вакуума и представлены их результаты.

Пятый раздел посвящён исследованию точности методов регулярного теплового режима путём экспериментального определения эффективной теплопроводности нагретых зон.

Определению эффективной теплопроводности для радиоэлектронных аппаратов с теплопроводностью больше единицы. Оценке точности стационарного метода пластины, выбору методов испытаний, методике проведения экспериментов, экспериментальному исследованию эффективной теплопроводности тепловых макетов радиоэлектронных аппаратов. Приведена характеристика температурных датчиков, метод их тарирования и контроля. Методика обработки экспериментальных данных и аппроксимация эмпирических зависимостей. Проведены статистические исследования теплофизических коэффициентов одноблочных радиоэлектронных аппаратов.

Шестой раздел посвящён разработке методов автоматизации проектирования радиоэлектронных аппаратов работающих в условиях нестационарных температурных режимов. Представлена общая тепловая модель одноблочного радиоэлектронного аппарата и дано её математическое описание, дано решение неоднородного уравнения теплопроводности при различных схемах размещения источников и стоков энергии в нагретой зоне радиоэлектронного аппарата, получено общее решение неоднородного уравнения теплопроводности для нагретой зоны радиоэлектронного аппарата. Приведено решение уравнения теплопроводности при отсутствии объёмных стоков энергии и равномерном распределении источников тепла, при отсутствии поверхностных стоков энергии и равномерном распределении источников и температурозависимых объёмных стоков энергии. Даны решения уравнений теплопроводности при наличии температурозависимых объёмных стоков энергии и различной концентрации мощности источников по объёму нагретой зон. В работе разработан алгоритм теплофизического проектирования радиоэлектронного аппарата, обеспечивающий синтез температуростойкой конструкции. Показано, что для решения общей задачи синтеза одноблочных РЭА с заданным тепловым режимом необходимо задать допустимые пределы изменения параметров синтеза, т.е. ограничения на каждый параметр. Это приводит к необходимости решения прямых задач теплопроводности. Показано, что процесс теплофизического проектирования сводится к последовательной минимизации параметров синтеза полученного неравенства и удовлетворения ограничениям, наложенным на параметры синтеза техническим заданием, техническими условиями и т.д. По полученному алгоритму произведен синтез РЭА и выполнены экспериментальные исследования температурных полей синтезированных конструкций. Проведены теоретические и экспериментальные исследования влияния геометрических размеров, формы, теплофизических коэффициентов на параметры синтеза, что позволяет дать рекомендации, обеспечивающие оптимальную минимизацию каждого параметра. Показано, что если минимизация всех параметров синтеза в пределах заданных ограничений не обеспечивает выполнения полученного неравенства, то необходимо от поверхностных систем охлаждения перейти к более сложным в конструктивной реализации объёмным системам охлаждения. Синтез

аппарата, в этом случае, сводится к оптимальному выбору параметров системы охлаждения.

Ключевые слова: нагретая зона, эффективная теплопроводность, синтез РЭА, регулярный режим, нестационарное температурное поле, темп охлаждения (нагревания) системы.

ABSTRACT

Sinotin A.M. Automation of calculations of the non-stationary thermal modes at planning of onesectional radio electronic vehicles. – Manuscript.

Dissertation on the receipt of scientific degree of doctor of technical sciences on speciality 05.13.12 – computer aided desing works systems. – Kharkiv National University of Radioelectronics, Kharkiv, 2008.

Dissertation work is devoted to the research of heat exchange character in radio electronic vehicles which function in an air environment at normal atmospheric pressure; the development of calculation method of the non-stationary temperature fields of REA with the arbitrary law of change of the power dispersed elements from a temperature and time; the research of influence of structural parameters of vehicle taking into account the anisotropy of the heated areas on a heat-conducting on a general temperature condition.

First, on the basis of the conducted analytical and experimental researches, the algorithm of the thermophysical planning of onesectional radio electronic vehicles is got that allows to provide the set temperature condition on the initial stages of constructing parallell with development of electric chart and choice of element base. It considerably promotes economic efficiency of developments and eliminates the necessity of substantial changes for a construction on results checking calculations and temperature tests.

Keywords: heated area, effective heat-conducting, synthesis of REA, regular mode, non-stationary temperature field, rate of cooling (heating) of the system.

Під. до друку 19.09.08. Формат 60 x 84 1/16. Спосіб друку – ризографія.

Умов. друк. арк. 2,1. Тираж 100 прим.

Зам. № 2-673.

ХНУРЕ, 61166, Харків, просп. Леніна, 14

Віддруковано в навчально-науковому
видавничо-поліграфічному центрі ХНУРЕ
Харків, просп. Леніна, 14