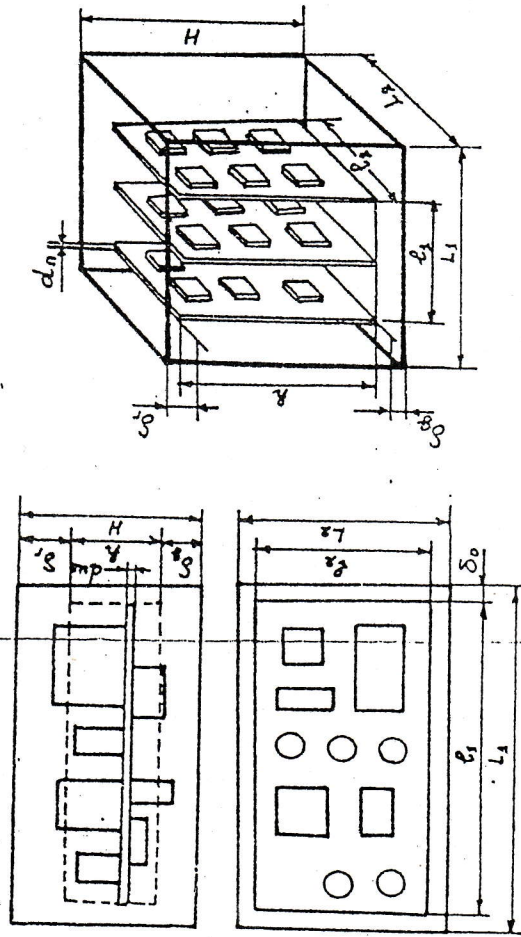


По аналогия с другите два разглеждани механизми на топлоотдаване и тук се въвежда топлинно съпротивление на излъчване $R_{\text{л}} = 1/(\alpha_{\text{л}} S)$, чрез което може да се представи топлинният модел на процеса топлоотвеждане чрез излъчване. За интензифициране на процеса на топлоотвеждане това съпротивление трябва да се намали, което се постига чрез увеличаване на топлоотдаващата повърхност (например чрез използване на радиатор) и на коефициента на топлоотдаване чрез излъчване. За повишаване на излъчващата способност на изделята (увеличаване на $\alpha_{\text{л}}$) те трябва да се оцветяват в тъмни тонове и повърхността им да не бъде полирана. Елементите и възли, които трябва да се защитят от топлинното излъчване на намиращи се в съседство силно нагривани се модули, се правят със светла полирана повърхност. Допълнителна защита се постига чрез топлинни екрани, които се изработват от материали с висока топлопроводимост (алуминий), имат светла и добре полирана повърхност и минимално топлинно съпротивление в мястото на контактуване с шасито.

3.3. ОПРЕДЕЛЯНЕ НА ТОПЛИННИЯ РЕЖИМ НА РСА

Конструктивните единици от второ (блокове) и по-високи йерархични нива от структурата на РСА представляват сложни системи от топлинни източници, чието топлинно поле се подава трудно на точно аналитично описание. Поради това при определяне на топлинния режим се използват приблизителни методи, които позволяват да се изчисти с достатъчна точност температурата на нагриватата зона и на средата в непосредствена близост до повърхността на елементите и на базата на получените резултати да се направи оценка на надеждността на изделята.



Фиг. 3.4

При определяне на топлинния режим апаратурата се заменя с физически топлинен модел, в който нагриватата зона се представя като паралелепипед, чието повърхност се приема за изотермична. Фиг. 3.4а е представен топлинен модел на блок на РСА и са нанесени размерите на неговия корпус (L_1, L_2 и H), на нагриватата зона (l_1, l_2 и на въздушните процеди между горната, долната и околната стени корпуса и нагриватата зона (δ_1, δ_2 и δ_0). За размери на нагриватата зона приети размерите на шасито l_1 и l_2 и височина h , която може да се определи от формулата:

$$(3.25) \quad h = d_{\text{ш}} + h_1 + h_2$$

където $d_{\text{ш}}$ е дебелина на шасито;

h_1 и h_2 - части от височината на нагриватата зона, разположени в двете полупространства, на които шасито дели блока.

Размерите h_1 и h_2 се определят от израза:

$$(3.26) \quad h_j = \frac{\sum_{i=1}^n V_i}{l_1 l_2}$$

където $j = 1, 2$ - номера на полупространствата на блока;
 V_i - обем на i -тия елемент в j -тото пространство;
 n_j - брой на елементите в j -тото полупространство.

По-голямата част от РСА е съставена от блокове с плътна конструкция, чието топлинен модел е представен на фиг. 3.4б. При изчисляване на топлинния режим на този блок се използва методът на поетапно моделиране. Същността на този метод (по аналогия с йерархичния принцип на проектиране на РСА) се свежда до поетапно моделиране на топлинния режим от по-високо йерархично ниво, включващо група модули, към по-ниско, състоящо се от конструктивно неделими елементи. Това означава, че първоначално се разглежда цялата система, цел описване на топлинните процеси с минимална степен на детайлност и получаване на средни характеристики за топлинните поле. Следващите етапи се свеждат до отделяне от системата на части, които се правят по-детайлно описание на техните топлинни полета.

Изчисляването на топлинния режим на блока, чието физическо топлинен модел е даден на фиг. 3.4б, може да се раздели условно на три етапа: 1) определяне на температурата на корпуса $T_{\text{к}}$; 2) определяне на средноповърхностната температура на нагриватата зона $T_{\text{з}}$ и 3) определяне на температурата на повърхността на елементите (електронните елементи и интегрални схеми) $T_{\text{е}}$. Както беше споменато по-горе, целите на конструирането задължителна точност при определяне на топлинния режим се постига чрез използване на приблизителни методи.

За изпгълнение на първите два етапа от изчислението на топлинния режим са необходими следните изходни данни: размери на корпуса, на нагрятата зона и на въздушните процепи между стените на корпуса и зоната, мощност, която блокът разсейва във вид на топлина P_k ; мощност, разсейвана от елементите, разположени непосредствено върху корпуса P_e ; сумарна площ на перфорирани в корпуса вентилационни отвори S_p ; температура и налягане на околната среда T_0 и p ; топлинни параметри на средата и на материалите на конструкцията.

Определяне на температурата на корпуса T_k . Корпусът отделя топлинната мощност P_k в околното пространство чрез конвекция и излъчване. За определяне на неговата температура се спазва следната последователност от действия:

Определяне на прегряването на корпуса спрямо околната среда в първо приближение ΔT_k . За целта се използва дадената на фиг. 3.5 зависимост на ΔT_k от специфичната повърхностна мощност на корпуса $P_{ks} = P_k/S_k$ (1), където $S_k = 2(L_1H + L_2H)$ е площ на външната повърхност на корпуса.

Изчисляване на топлинната проводимост между повърхността на корпуса и околната среда G_k , за което се използва изразът:

$$G_k = (\alpha_{кв} + \alpha_{лн})S_d + (\alpha_{кг} + \alpha_{лг})S_r + (\alpha_{к0} + \alpha_{л0})S_0 = \sum (\alpha_{ки} + \alpha_{ли})S_i, \quad (3.27)$$

където $\alpha_{ки}$ и $\alpha_{ли}$ са коефициенти на топлообмен чрез конвекция и излъчване на долната, горната и околната повърхнини на корпуса, а S_i — площи на съответните повърхнини. Определянето на коефициентите $\alpha_{ки}$ и $\alpha_{ли}$ се извършва по известни от предидущото изложение формули:

$$\alpha_{ки} = kA_2 \left(\frac{\Delta T_k}{L_i} \right)^{1/4} \quad \text{и} \quad \alpha_{ли} = kA_3 (\Delta T_k)^{1/3}, \quad (3.28)$$

където L_i са определящи размери на долната, горната или околната повърхнина на корпуса, а стойностите на коефициентите k , A_2 и A_3 са дадени в параграф 3.2.2 и

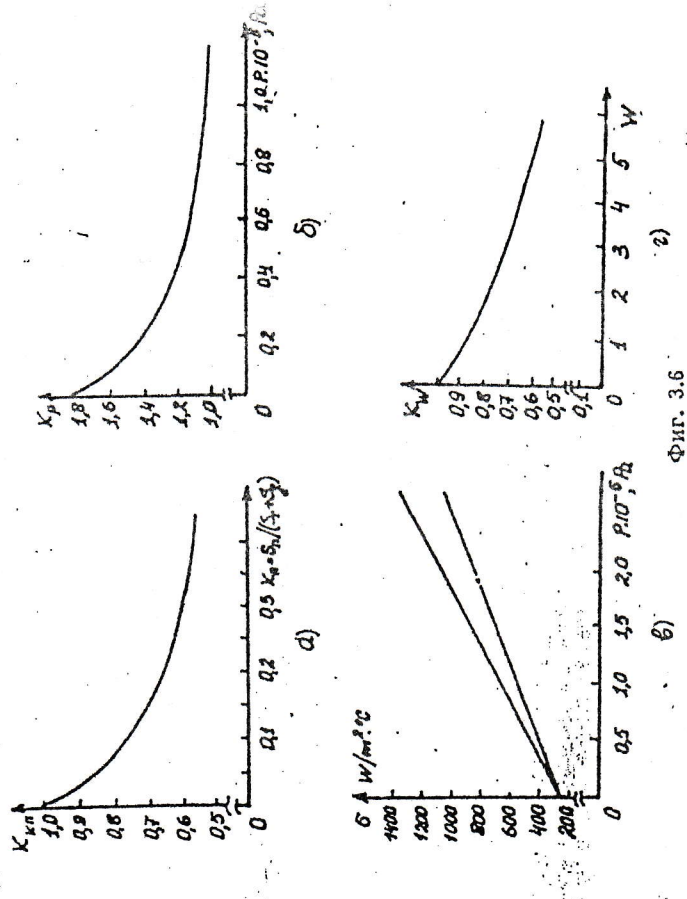
$$\alpha_{ли} = \epsilon_1 \cdot 5,67 \cdot 10^{-8} \frac{(T_0 + \Delta T_k + 273)^4 - (T_0 + 273)^4}{\Delta T_k}, \quad (3.29)$$

където ϵ_1 са степени на чернота на долната, горната и околната повърхнини на корпуса.

Изчисляване на прегряването на корпуса на блоко във второ приближение $\Delta T_k''$:

$$\Delta T_k'' = \frac{P_k}{G_k} K_{кп} K_p, \quad (3.30)$$

където $K_{кп}$ е коефициент, отчитащ коефициента на перфорация на корпуса на блока $k_p = S_p / (S_d + S_r)$, а K_p — коефициент, който зависи налягането на околната среда. Определянето на тези коефициенти извършва с помощта на известни в литературата зависимости, вид е представен на фиг. 3.6а и фиг. 3.6б.



Определяне на грейката при изчисляване на температурата на прегряване на корпуса по отношение на околната среда γ :

$$\gamma = \frac{|\Delta T_k'' - \Delta T_k'|}{\Delta T_k''} \leq 0,1. \quad (3.31)$$

Ако $\gamma \geq 0,1$, пресмятането за температурата на прегряване на корпуса се повтаря за друга стойност на $\Delta T_k'$, коригирана в посока $\Delta T_k''$.

Изчисляване на температурата на корпуса: $T_k = T_0 + \Delta T_k''$.
 Определяне на средноповърхностната температура на нагрятата зона T_z . Теплообменът между нагрятата зона и корпуса се извършва чрез излъчване, конвекция и топлопроводимост. Порядъкът на излъчване на T_z е същият, както при определяне на температурата на корпуса. И тук първоначално се определя прегряването на нагрятата спрямо околната среда в първо приближение $\Delta T_k'$. За изчисляване на прегряването на корпуса в първо приближение се използва графика (2) на фиг. 3.5, която отразява връзката между

и специфичната повърхностна мощност на зоната

$$(3.32) \quad P_{3z} = \frac{P_3}{1,82(l_1 l_2 + l_1 h + l_2 h)},$$

където $P_3 = P_k - P_c^*$ представлява мощност, разсеяна от всички елементи, които са затворени в обема на нагрятата зона.

След това се изчислява толинната проводимост между нагрятата зона и корпуса G_{3k} по формулата:

$$(3.33) \quad G_{3k} = K_\sigma \sum (\alpha_{3ki} + \alpha_{3li}) S_i,$$

където α_{3ki} , α_{3li} и S_i са коефициенти на топлоотдаване чрез конвекция и излъчване и площи на долната, горната и околната повърхнини на нагрятата зона, а K_σ е коефициент, отчитащ кондуктивния топлообмен, произтичащ от контактуването на рамката на модула с корпуса. Този коефициент се определя от:

$$(3.34) \quad K_\sigma = \begin{cases} 1,63 - 0,157/(\sigma S_T) & \text{при } 1/(\sigma S_T) \leq 4 \\ 1 & \text{при } 1/(\sigma S_T) > 4, \end{cases}$$

където S_T е площ на толинния контакт между рамката на модула и корпуса на блока, а σ - специфична толинна проводимост от модулите към корпуса на блока, която зависи от силата на притискане на рамката на модула към корпуса на блока. На фиг. 3.6е даден вида на тази зависимост за случай на контакт на медна (1) и на алуминиева (2) рамки с алуминиев корпус. (При отсъствие на притискане на рамката към корпуса $\sigma = 240 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot ^\circ\text{C})$).

Коефициентите на топлообмен чрез излъчване на отделните повърхнини на нагрятата зона се изчисляват от:

$$(3.35) \quad \alpha_{3li} = \epsilon_{\text{пр}i} 5,67 \cdot 10^{-8} \frac{(T_0 + \Delta T_3' + 273)^4 - (T_k + 273)^4}{\Delta T_3' - \Delta T_k''},$$

където приведената степен на чернота на i -тата повърхност на нагрятата зона се определя от:

$$(3.36) \quad \epsilon_{\text{пр}i} = \left[\frac{1}{\epsilon_{3i}} + \left(\frac{1}{\epsilon_{ki}} - 1 \right) \frac{S_{3i}}{S_{ki}} \right]^{-1}$$

Прегряването на нагрятата зона спрямо T_0 във второ приближение може да се изчисли по формулата:

$$(3.37) \quad \Delta T_3'' = \Delta T_k'' + \frac{P_3}{G_{3k}} K_{\text{кл}} K_p K_w,$$

където K_w е коефициент, отчитащ кратността на обмен на въздуха в блока w , която зависи от производителността на използвания вентилатор. За определяне на K_w се използват зависимости от вида, показан на фиг. 3.6г.

След оценка на грешката от изчислението $\gamma = |\Delta T_3'' - \Delta T_3'| / \Delta T_3'$ се определя средноповърхностната температура на нагрятата зона $T_3 = T_0 + \Delta T_3'$

Определяне на температурата на повърхността на елементите. Целената от елементите топлина се разсейва в околното пространство чрез топлопроводимост, конвекция и излъчване. За да се получи тината на разпределение на температурното поле във вътрешността на блока е необходимо да се определи температурата на повърхността на всеки един от включените в блока елементи. Това се извършва на колко етапа, по-важните от които са:

Определяне на еквивалентния коефициент на топлопроводимост на модула, в който е разположен разглеждания елемент $\alpha_{\text{те}}$. В най-общ случай на модул, представляващ печатна платка с разположениху повърхността ѝ топлоотвеждащи шини, $\alpha_{\text{те}}$ може да се изчисли по формулата:

$$(3.38) \quad \alpha_{\text{те}} = \alpha_{\text{тп}} (1 - A) \left[1 - \frac{V_{\text{ш}}}{V_{\text{п}}} + \frac{1}{(V_{\text{ш}}/V_{\text{п}})(\alpha_{\text{тп}}/\alpha_{\text{тп}})} + 1 - V_{\text{ш}}/V_{\text{п}} \right] + A \frac{\alpha_{\text{тп}}}{2} \left[1 + \frac{\alpha_{\text{тп}} V_{\text{ш}}}{\alpha_{\text{тп}} V_{\text{п}}} + \frac{1}{1 - V_{\text{ш}}/V_{\text{п}}} \right],$$

където $\alpha_{\text{тп}}$ и $\alpha_{\text{тш}}$ са коефициенти на топлопроводимост на материалите на печатната платка и на топлоотвеждащите шини за стъклоекстолита $\alpha_{\text{т}} = 0,24 \dots 0,34 \text{ W}/(\text{m} \cdot ^\circ\text{C})$, а за алуминий $\alpha_{\text{т}} = 208 \text{ W}/(\text{m} \cdot ^\circ\text{C})$;

$V_{\text{п}}$ - обем на печатната платка (с отчитане и на обема на шините);

$V_{\text{ш}}$ - обем на топлоотвеждащите шини;

$A = S_{\text{ш}}/S_{\text{п}}$ - повърхностен коефициент на зацъпване на шината платка от шините. При отсъствие на топлоотвеждащи шини върху повърхността на платката $\alpha_{\text{те}} = \alpha_{\text{тп}}$.

Определяне на коефициента на разпространение на топлинния поток m , за което се използва изразът:

$$(3.39) \quad m = \left(\frac{\alpha_1 + \alpha_2}{\alpha_{\text{те}} \cdot d_{\text{п}}} \right)^{1/2},$$

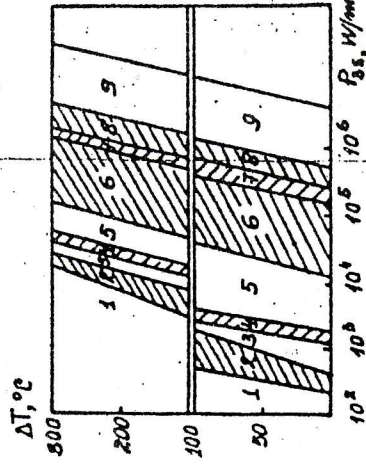
където α_1 и α_2 са коефициенти на топлоотдаване на страна спротивно и страна елементи на печатната платка - при естествена конвекция $\alpha_1 + \alpha_2 = 17 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot ^\circ\text{C})$, а $d_{\text{п}}$ е дебелина на печатната платка.

Определяне на прегряването на повърхността на елемента по обем на температурата на оръждаващата блока среда ΔT_e . За всеки елемент на печатната платка прегряването може да се определи от:

$$(3.40) \quad \Delta T_{ej} = \Delta T_{\text{ср}} + k T_j + \sum_{i=1}^N T_i,$$

въздуха при височина над 12 km). В системите за въздушен конвективен топлообмен за интензифициране на охлаждането широко се използват топлообменници с развита повърхност (радиатори); естествена вентилация, при която охлаждащият въздух циркулира през обема на апаратурата чрез вентилационни отвори в горната и долната стена на нейния корпус, а така също вентилатори. В бордовите РСА се използват предимно течни конвекционни системи за охлаждане (използването на течни системи в наземни апаратури е ограничено поради тяхната сложност и висока цена). Ефективността на тези системи произтича от по-високия коефициент на топлоотдаване на течностите (по-голямата им специфична топлемост и плътност) в сравнение с този на въздуха. Топлоносителят в течните системи може да бъде изолиран от охлаждащите елементи и транспортиран до тях с помощта на тръби, или да охлажда непосредствено нагревите елементи. Охлаждащата течност, в която са потопени елементите, трябва да бъде химически инертна по отношение на метала и диелектриците; да притежава малка и сравнително стабилна в целия работен температурен обхват диелектрична проницаемост $\epsilon = 1,6 - 1,9$, малки загуби ($\operatorname{tg} \delta < 2 \cdot 10^{-3}$) в честотен обхват до 500 MHz и висока електрическа якост (до 200 kV/cm) при температурите на кипене и т.н. Тези изисквания се удовлетворяват от фреоните, но по екологични съображения тяхното приложение се ограничава. В системите с изолиран течен топлоносител се използват вода, амониак, етилов спирт и по-рядко етиленгликол. Специално място сред системите за конвекционно охлаждане заемат изпарително-кондензационните системи, които ще бъдат разглеждани в следващия раздел.

За избор на системата за конвекционно охлаждане може да се използва диаграмата на фиг. 3.8, където по ординатната ос се насяа допустимото прегряване на повърхността на елемента с най-малка температурна устойчивост по отношение на околната среда $\Delta T, ^\circ\text{C}$, а по абсцисата — плътността на топлинния поток, разсеян от нагрятата зона $P_{zs}, \text{W/m}^2$. Горната част на диаграмата се използва за избор на системата за охлаждане на елементи, разсейващи големи мощности — генераторни лампи, магнетрони, дросели и др. В диаграмата има 9 области, за всяко от които се препоръчва определен тип охлаждане: за област 1 — естествено въздушно охлаждане; за 2 — естествено и принудително въздушно охлаждане; за 3 — принудително въздушно охлаждане; за 4 — принудително охлаждане с въздух и течност; за 5 — охлаждане



Фиг. 3.8

с течност; за 6 — охлаждане с течност и чрез естествено изпаряване; за 7 — охлаждане с течност и чрез естествено и принудително изпаряване; за 8 — охлаждане с течност и чрез принудително изпаряване; за 9 — охлаждане чрез естествено и принудително изпаряване. За зъбни шприхованите области на диаграмата, в които е възможно използването на два вида охлаждане, съществуват допълнителни графични зависимости, които позволяват да се отчете вероятността, с която избраният метод за охлаждане удовлетворява изискванията за осигуряване на необходим топлинен режим на апаратурата.

3.5. ОХЛАЖДАНЕ С РАДИАТОРИ И ТОПЛИННИ ТРЪБИ

Радиаторите се използват за отвеждане на топлината от силно прегряващи се полупроводникови прибори (обикновено със средна и голяма разсейвана мощност) в оръжващото пространство.

Проектирането на охлаждането с радиатора се свежда до определяне на конструкцията и размерите на радиатора така, че той да обезпечи зададената (или допустимата) температура на чипа на полупроводниковия елемент T_j при известна разсеяна от прибора мощност P и зададена температура на оръжващата среда T_0 . Температурата на $p-n$ перехода на полупроводниковите елементи е най-същественият показател, който определя надеждността на тяхната работа и тя не трябва да прераства в зададената в каталозите допустима стойност $T_{j, \max}$ (ориентирановъчно за германиеви полупроводникови елементи $T_{j, \max}$ е 70°C , а силициеви — 150°C).

Ако се разгледа изолиран полупроводников прибор, в който източник на топлина е разсеяната в неговата структура мощност P , температурата на чипа може да се определи от:

$$T_j = T_0 + P(R_{thj-c} + R_{thc-r} + R_{thr-0}), \quad (3.42)$$

където R_{thj-c} е топлинно съпротивление между чипа и корпуса, което се посочва в каталожните данни на прибора; R_{thc-r} — топлинно съпротивление между корпуса и радиатора, което зависи от качеството и топлинния контакт между двете повърхнини (за намаляване на топлинно съпротивление е необходимо да се осигури голяма контактна повърхност, като за премеахване на микронеравностите двете повърхнини полират, а така също между корпуса и радиатора се поставят уплътнители от мек топлопроводящ материал, например мед, или специални топлопроводящи, например силиконови, пасти); R_{thr-0} — топлинно съпротивление между радиатора и околната среда, което зависи от голямината на повърхността на радиатора и нейното състояние.

Известно е, че радиаторът отделя топлината в околното пространство чрез конвекция (около 70%), излъчване (около 20%) и топлопроводимост. За намаляване на R_{thr-0} радиаторите се изготвят с монолитна конструкция и голяма топлоотдаваща повърхност, като за целта се използват материали с добра топлопроводимост и сравнително голям степен на чернота (оксидиран алуминий, магнезиеви и др. сплави).