

МЕТОДИКА ВЫБОРА КОНСТРУКЦИИ ГЕРМЕТИЧЕСКИХ РЭА ПО РЕЗУЛЬТАТАМ ТЕПЛОВОГО РАСЧЕТА

*С. Г. Вессельман, А. А. Чернышенко, И. М. Майко,
А. Л. Оксман*

Харьков

Одно из основных требований, предъявляемых при конструировании радиоэлектронного (радиорелейного) аппарата РЭА, — обеспечение заданного теплового режима. Для характеристики этого режима могут быть использованы среднеповерхностная u'_s и среднееобъемная u'_v температуры нагретой зоны [2], зависящие от целого ряда факторов, которые целесообразно объединить в три группы.

К первой группе относятся физические характеристики нагретой зоны и корпуса РЭА: суммарная мощность источников энергии P и закон изменения ее во времени, удельный вес γ , тепловые коэффициенты α , λ , a .

Ко второй группе факторов относятся геометрические характеристики РЭА: Σ , S , l_1 .

К третьей группе — тепловые коэффициенты среды в зазоре между нагретой зоной и корпусом аппарата, а также тепловые коэффициенты окружающей среды: α , α''' , λ , a , c и удельный вес γ .

При расчете теплового режима факторы первой группы, как правило, являются заданными, так как они определяются электрической схемой РЭА. Ряд факторов, относящихся ко второй и третьей группам, являются переменными и ими можно варьировать при конструировании РЭА (α , α''' , S , l_1).

Пределы изменения геометрических и тепловых коэффициентов зависят от назначения блока и условий его работы. В связи с этим целесообразно установить один или несколько обобщенных параметров, которые позволят наметить пути оптимизации конструкции для обеспечения заданного теплового режима РЭА, исходя из допустимых пределов изменения геометрических размеров и тепловых коэффициентов.

В РЭА с большой плотностью монтажа нагретую зону можно рассматривать как квазиоднородное твердое тело. Это позволяет распространить на такие аппараты теорию регулярного режима и принять в качестве единого обобщенного параметра темп нагрева m .

Среднееобъемная и среднеповерхностная температуры для аппаратов, функционирующих с постоянной мощностью P , однозначно определяются темпом нагрева m [1]:

$$u'_v - u_0 = \frac{P}{mC} (1 - e^{-m\tau}), \quad (1)$$

$$u'_s - u_0 = \frac{P}{mC} \psi (1 - e^{-m\tau}). \quad (2)$$

Для трехсоставного тела (рис. 1), согласно закону сохранения энергии, в случае пренебрежения энергией, расходуемой на нагрев среды

в зазоре между нагретой зоной и корпусом, m определяется из следующего уравнения:

$$m = \frac{m'}{1 + \frac{C''}{C'} \psi' \frac{\Sigma}{S} \frac{\alpha'}{\alpha} \left(1 - \kappa \frac{\alpha}{\alpha'''}\right)}, \quad (3)$$

где $\alpha' = \frac{\alpha''' \alpha}{\alpha''' \frac{\Sigma}{S} + \alpha}$ — приведенный коэффициент теплопередачи от нагретой зоны к окружающей среде; (4)

$m' = \frac{\alpha' \Sigma \psi'}{C'}$ — темп нагрева односоставного тела (нагретой зоны) при $C'' \ll C'$ (тонкая оболочка). (5)

$$\kappa = \frac{m}{m'} \quad (5)$$

Из уравнений (1—5) следует, что конструктор, варьируя геометрическими размерами и тепловыми коэффициентами, может обеспечить требуемое значение средних температур.

Ниже предлагается методика инженерного расчета теплового режима и выбора оптимальной конструкции блока для обеспечения $u'_{S \text{ зад}}$, $u'_{V \text{ зад}}$, которая предусматривает следующее:

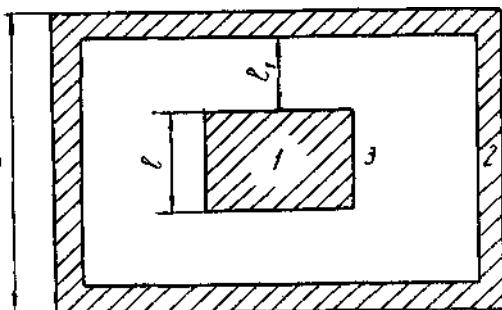


Рис. 1. Модель РЭА:

1 — нагретая зона; 2 — корпус; 3 — воздушная среда.

1. Составление таблиц или графиков зависимости $m = m(\alpha, \alpha''')$ при фиксированных геометрических размерах Σ, S, l_1 , тепловых коэффициентах нагретой зоны λ, C , удельном весе γ и температуре внешней среды u_0 .

Расчетные формулы для m' и ψ' односоставных тел различной формы приведены в работе [1]. Эти формулы, преобразованные для блока кубической формы (нагретая зона и корпус), имеют вид

$$m' = 3a \left(\frac{\rho}{l} \right)^2, \quad (6)$$

где $\rho \operatorname{tg} \rho = \frac{a}{\lambda} \frac{l}{2}$ ρ определяется по таблицам, приведенным в работе [1];

$$a = \frac{\lambda}{c\gamma};$$

$$\psi' = \frac{2\rho^2 \lambda}{\alpha' l};$$

α' — рассчитывается по формуле (4).

По формуле (3) и полученным значениям m', ψ' определяется темп нагрева трехсоставного тела m .

2. Составление таблиц (графиков) зависимости $m = m(l_1)$ при фиксированных значениях $\Sigma, C, \lambda, \gamma, u_0$.

Расчетные формулы α и α''' приведены в работе [2]. Для блока кубической формы α и α''' определяются из следующих соотношений:

$$\alpha''' = \alpha_k + \alpha_b = \frac{5}{6} \frac{\lambda_b \epsilon_k}{l_1} + \frac{1}{6} \frac{\lambda_b}{l_1} + \frac{l(u'_S, u_k)}{\frac{1}{\epsilon_1} + \left(\frac{1}{\epsilon_2} - 1 \right) \frac{\Sigma}{S(l_1)}}; \quad (8)$$

$$\alpha = \alpha_k + \alpha_n = A_2 \left[\frac{P}{\alpha S(l_1) L(l_1)} \right]^{\frac{1}{4}} + \varepsilon_2 f(u_k u_o), \quad (9)$$

где $f(u'_S, u_k)$, $f(u_k u_o)$, A_2 определяются по таблицам, приведенным в работе [2]; ε_k зависит от значения произведений критериев $Gr Pr$ [3]. В том случае, когда $Gr Pr < 10^3$, $\varepsilon_k = 1$ при $10^3 < Gr Pr < 10^6$ $\varepsilon_k = 0,105 (Gr Pr)^{0,3}$; $10^6 < Gr Pr < 10^{10}$ $\varepsilon_k = 0,400 (Gr Pr)^{0,2}$.

3. Составление таблиц (графиков) зависимости $m = m\left(\frac{\Sigma}{S}\right)$ при $l_1 = \text{const}$ и тех же фиксированных значениях тепловых коэффициентов.

4. Составление таблиц (графиков) зависимости $u'_S = u'_S(m, \tau)$, $u'_V = u'_V(m, \tau)$ по формулам (1) и (2).

После составления таблиц (графиков) производят оценку теплового режима блока. Для этой цели необходимо в соответствии с заданными условиями работы, тепловыми коэффициентами и геометрическими размерами РЭА рассчитать α , α''' . Затем по таблицам (графикам) $m = m(\alpha, \alpha''')$ и $u'_S = u'_S(m, \tau)$ определить m и u'_S .

Определение u'_S , u_k производится в два этапа. Вначале задаются u'_S , u_k и рассчитывают для этих температур α , α''' , m . Для найденного значения m определяют u'_S для момента времени $\tau \geq \frac{2-3}{m}$ и рассчитывают $u_k = u'_S - \frac{P}{\Sigma \alpha'''}.$

На втором этапе по полученным значениям u'_S и u_k уточняют α , α''' , m . По уточненному значению m находят u'_S для момента времени $\tau_{\text{зад}}$.

Если рассчитанное значение $u'_S = u'_{S_{\text{зад}}}$, то по графикам $u'_S = u'_S(m, \tau)$ определяется требуемое значение m для обеспечения заданного теплового режима.

Заданный тепловой режим РЭА можно обеспечить изменением l_1 , отношения $\frac{\Sigma}{S}$ (за счет оребрения корпуса) при сохранении размера l_1 , α (применяя внешний обдув) или α''' (осуществляя циркуляцию воздуха внутри блока).

В связи с этим по допустимым пределам изменения геометрических размеров и тепловых коэффициентов по графикам $m(l_1)$, $m\left(\frac{\Sigma}{S}\right)$, $m(\alpha, \alpha''')$ определяют необходимую величину изменения данного параметра (или нескольких параметров одновременно) для получения $u'_{S_{\text{зад}}}$, $u'_{V_{\text{зад}}}$.

Ниже приводится пример теплового расчета герметичного РЭА, имеющего форму куба с тонкой оболочкой, согласно приведенной методике.

Пример. Рассчитать и обеспечить заданный тепловой режим РЭА путем изменения геометрических размеров, оребрения корпуса, применения внешнего обдува и внутренней циркуляции воздуха. Блок кубической формы с тонкой оболочкой ($C'' \ll C'$); нагретая зона имеет форму куба и большую плотность монтажа.

Данные геометрических размеров: $L = 0,375$ м; $l = 0,250$ м; $l_1 = 0,0625$ м; $\Sigma = 0,375$ м²; $\frac{\Sigma}{S} = 0,44$.

Тепловые и физические коэффициенты нагретой зоны: $\lambda = 10$ Вт/м²°С; $c = 500$ Дж/кг °С; $\gamma = 720$ кг/м³; $\varepsilon_1 = \varepsilon_2 = 0,9$.

Блок функционирует с постоянной мощностью источников энергии $P = 60 \text{ вт}$ в течение $\tau_{\text{за}} = 1,5 \text{ ч}$ при температуре окружающей среды $u_0 = 20^\circ\text{C}$, $u'_{S_{\text{зад}}} = 40^\circ\text{C}$.

В соответствии с заданными условиями работы блока тепловые коэффициенты и геометрические размеры разрешается изменять в таких пределах: $\Delta l_1 = \pm 0,025 \text{ м}$; $\Delta \left(\frac{\Sigma}{S}\right) = -0,2$ (за счет оребрения); $\Delta \alpha = +6 \text{ вт/м}^2 \text{ }^\circ\text{C}$ (за счет обдува блока); $\Delta \alpha''' = +3,5 \text{ вт/м}^2 \text{ }^\circ\text{C}$ (за счет циркуляции воздуха).

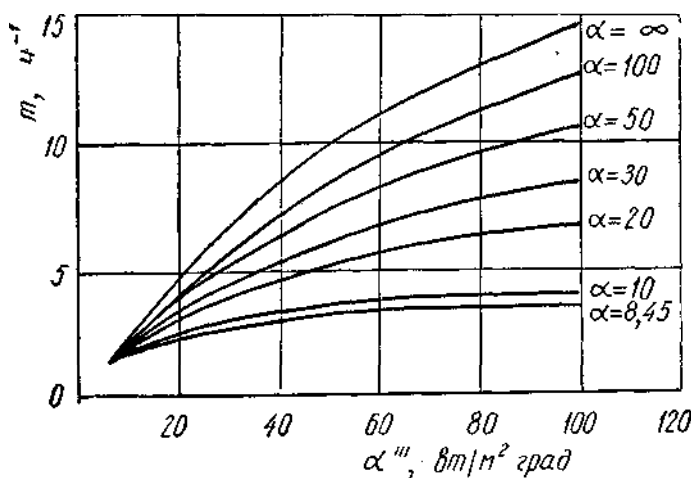


Рис. 2. Зависимость $m = m(\alpha''')$ при $l = 0,25 \text{ м}$.

Порядок расчета.

1. В соответствии с пп. 1—4 строим графики зависимостей

$$m(\alpha, \alpha'''); m(l_1); m\left(\frac{\Sigma}{S}\right); u'_S(m, \tau).$$

Кривые указанных зависимостей приведены на рис. 2—5.

2. Задаемся $u'_S = 2u_0 = 40^\circ\text{C}$; $u_k = 1,5u_0 = 30^\circ\text{C}$ и по формулам п. 1 рассчитываем α''' , α , m , ψ' .

Данные расчета приведены ниже:

$$\lambda_b = 2,6 \cdot 10^{-2} \text{ вт/м } ^\circ\text{C}; C' = 1,555 \text{ дж/}^\circ\text{C};$$

$$\text{Gr Pr} = 2,22 \cdot 10^6; \varepsilon_k = 4,2; f(u'_S, u_k) = 6,60 \text{ вт/м}^2 \text{ }^\circ\text{C};$$

$$f(u_k, u_0) = 6,05 \text{ вт/м}^2 \text{ }^\circ\text{C}; A_2 = 1,37 \text{ вт/м}^{3/4} \text{ }^\circ\text{C}^{1/4};$$

$$\alpha''' = 7,28 \text{ вт/м}^2 \text{ }^\circ\text{C}; \alpha = 8,45 \text{ вт/м}^2 \text{ }^\circ\text{C}; p = 0,254;$$

$$m' = 1,25 \text{ ч}^{-1}; \psi' = 0,98; m = 1,25 \text{ ч}^{-1}.$$

3. По графику (рис. 5) для $m = 1,25 \text{ 1/ч}$ и $\tau = 3 \text{ ч}$ (установившийся режим) определяем $u'_S = 49,7^\circ$; затем рассчитываем

$$u'_V = \frac{u'_S}{\psi'} = 50,3^\circ \text{ и } u_k = u'_S - \frac{P}{\Sigma \lambda^m} = 27,7^\circ.$$

4. По уточненным значениям u'_S и u_k вновь рассчитываем

$$\alpha''' = 7,82 \text{ вт/м}^2 \text{ }^\circ\text{C}; m = 1,3 \text{ ч}^{-1};$$

$$\alpha = 8,45 \text{ вт/м}^2 \text{ }^\circ\text{C}; \psi' = 0,97.$$

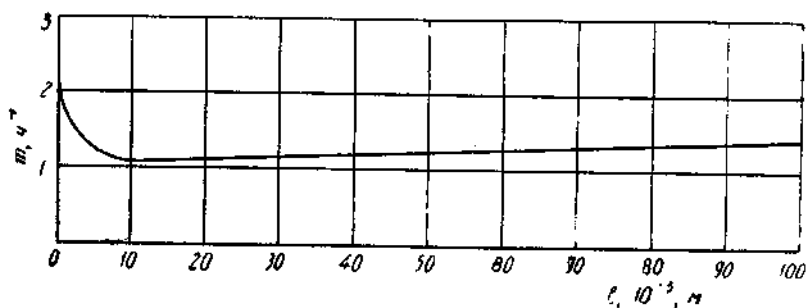


Рис. 3. Зависимость $m = m(l_1)$.

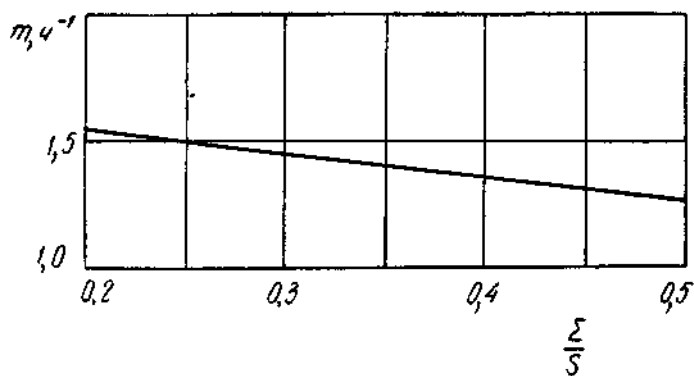


Рис. 4. Зависимость $m = m\left(\frac{\zeta}{S}\right)$ при $l_1 = 0,0625$ м.

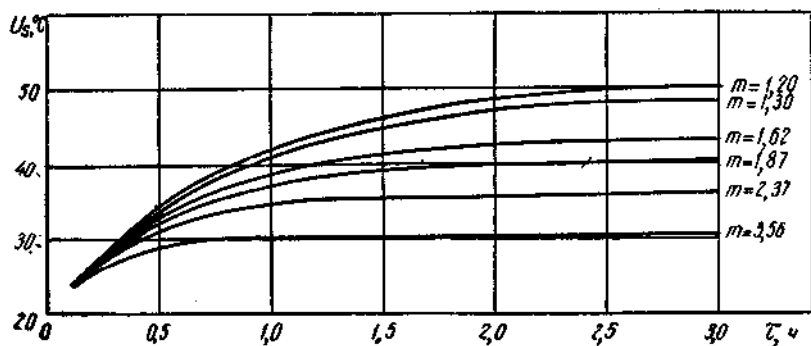


Рис. 5. Зависимость $u'_S = u'_S(m, \tau)$ при $U_0 = 20^\circ \text{C}$.

5. По графику (рис. 5) для $\tau_{\text{зад}} = 1,5$ ч находим $u'_S = 45^\circ\text{C}$. Рассчитываем $u'_V = 46,4^\circ\text{C}$ и $u_K = 24,5^\circ\text{C}$.

6. По графику (рис. 5) для заданного времени работы блока определяем $m = +1,75$ ч⁻¹, зная, что $u'_{S_{\text{зад}}} < u'_S$.

7. Для обеспечения заданного теплового режима по графикам (рис. 2—4) получаем следующие значения геометрических размеров блока и тепловых коэффициентов α , α''' :

$l_1 = 1,5$ мм; $\frac{\Sigma}{S} = 0,01$; $\alpha = 57$ вт/м² °C; $\alpha''' = 11$ вт/м² °C (при $\alpha = 8,45$ вт/м² °C) совместное действие $\alpha''' = 9,5$ вт/м² °C; $\alpha = 14$ вт/м² °C.

Анализ полученных данных показывает, что для обеспечения заданного теплового режима конструктор должен обеспечить внутреннюю циркуляцию или совместно внутреннюю циркуляцию и внешний обдув блока. Скорость обдува рассчитывается по формулам, приведенным в работе [2]. Так, например, для получения $\alpha''' = 11$ вт/м² °C необходима скорость $w = 1,38$ м/сек.

ВЫВОДЫ

1. В соответствии с теорией регулярного теплового режима предложена инженерная методика выбора конструкции РЭА, обеспечивающей заданный тепловой режим.

2. Предложена обобщенная характеристика теплового режима — темп нагрева m — которая позволяет давать оценку конструкции РЭА с точки зрения обеспечения теплового режима.

3. В соответствии с первой теоремой Г. М. Кондратьева, всякий радиоэлектронный аппарат имеет предельное значение темпа нагрева m_∞ при $\alpha \rightarrow \infty$, $\alpha''' \rightarrow \infty$.

4. Анализ влияния различных факторов на темп нагрева показывает, что наиболее эффективным является совместное изменение α и α''' . Изменение α и α''' в 10 раз (рис. 2) приводит к изменению m в 8 раз. При дальнейшем увеличении α , α''' рост m замедляется и эффективность влияния α и α''' падает.

Одностороннее изменение α''' в пределах от 8 до 100 вт/м² °C вызывает изменение m в 3 раза, а такое же изменение α вызывает изменение m на 30%.

5. Изменение геометрических размеров РЭА при фиксированном значении Σ незначительно сказывается на изменении теплового режима.

Увеличение поверхности корпуса в 2 раза путем его оребрения приводит к увеличению темпа нагрева на 20%. Изменение зазора между поверхностью нагретой зоны и поверхностью корпуса от 0 до 10 мм приводит к изменению m почти в два раза, а при изменении зазора от 10 мм до 100 мм m изменяется на 30%.

Таким образом, увеличение зазора между нагретой зоной и корпусом аппарата нецелесообразно, так как лишь при малых зазорах наблюдается увеличение темпа нагрева.

6. Результаты расчетов, выполненных по предлагаемой методике, удовлетворительно согласуются с результатами эксперимента и с расчетами для стационарных режимов [2].

Условные обозначения:

u_0 — температура окружающей среды, °C;

u'_S — средиповерхностная температура нагретой зоны, °C;

u'_V — среднеобъемная температура нагретой зоны, °C;

- u_k — среднеповерхностная температура корпуса РЭА, °C;
 m — темп нагрева, $ч^{-1}$;
 l — характерный размер нагретой зоны, м;
 L — характерный размер корпуса, м;
 l_1 — усредненное значение расстояния от поверхности нагретой зоны до корпуса, м;
 Σ — площадь поверхности нагретой зоны, $м^2$;
 S — площадь поверхности корпуса, $м^2$;
 τ — время функционирования РЭА, ч;
 λ — усредненный коэффициент теплопроводности нагретой зоны или корпуса, $вт/м^\circ C$;
 λ_v — коэффициент теплопроводности воздуха, $вт/м^\circ C$;
 c — усредненное значение удельной теплоемкости нагретой зоны или корпуса, $дж/кг^\circ C$;
 a — усредненный коэффициент температуропроводности нагретой зоны $м^2/ч$;
 γ — усредненное значение удельного веса нагретой зоны или корпуса, $кг/м^3$;
 α — усредненный коэффициент теплоотдачи от корпуса к окружающей среде, $вт/м^2^\circ C$;
 α'' — усредненный коэффициент теплопередачи от нагретой зоны к корпусу РЭА, $вт/м^2^\circ C$; (индекс к — конвекция, л — лучистый);
 C', C'' — усредненное значение теплоемкости нагретой зоны и корпуса, $дж/^\circ C$, $C' = c\gamma V$ (V — объем);
 ϵ_1, ϵ_2 — степень черноты поверхности нагретой зоны и корпуса;
 ϵ_k — коэффициент конвекции;
 Gr, Pr — критерии Грасгофа и Прандтля;
 P — суммарная мощность источников энергии, $вт$;
 $f(u'_s, u_k), f(u_k, u_o)$ — функции температур, определяемые по таблицам работы [2], $вт/м^2^\circ C$;
 A_2 — коэффициент, включающий физические параметры окружающей среды, определяемый по формулам работы [2];
 p — темп регулярного нагрева в критериальной форме;
 ψ' — безразмерный коэффициент.

ЛИТЕРАТУРА

1. Г. М. Кондратьев. Регулярный тепловой режим. Гостехтеориздат, 1954.
2. Г. Н. Дульнев. Теплообмен в радиоэлектронных устройствах. Госэнергоиздат, М. — Л., 1963.
3. М. А. Михеев. Основы теплопередачи. Госэнергоиздат, М. — Л., 1947.