

КАЛОРИМЕТРИЧЕСКИЙ МЕТОД ИЗМЕРЕНИЯ МОЩНОСТИ СВЧ И ВОПРОСЫ МЕТРОЛОГИИ

К РАСЧЕТУ ПОГРЕШНОСТЕЙ ИЗМЕРЕНИЯ СВЧ МОЩНОСТИ ВОЛНОВОДНЫМИ КАЛОРИМЕТРИЧЕСКИМИ НАГРУЗКАМИ

Ю. С. Архангельский, В. А. Коломейцев

С а р а т о в

Обычно при тепловых расчетах систем предполагается неизменность теплофизических параметров во времени, что позволяет значительно упростить анализ тепловых процессов. Такое предположение может привести к ошибкам при рассмотрении переходного процесса и анализе тепловых полей нагрузок, работающих в импульсном режиме и на частотах, при которых наблюдается резкая неоднородность поглощения удельной СВЧ мощности. Получить строгое решение краевой задачи теплопроводности с переменными во времени параметрами для различных режимов теплообмена практически невозможно. В качестве приближенного метода решения указанной задачи можно использовать метод вариации начального условия, который позволяет воспользоваться результатами расчета тепловых полей нагрузок, полученных при условии постоянства теплофизических параметров (соотношения (5) — (9) работы [1]).

В данной работе исследуются процессы установления температуры в нагрузке, представляющей собой отрезок прямоугольного волновода с тонкой поглощающей пленкой на внутренней поверхности. Рассматривается влияние параметров импульсного режима на величину отклонения средней в импульсе температуры (t_{Ω}) в установившейся области от средней для непрерывного режима ($t_{уст}$) при естественной конвекции с внешней поверхности волновода в случае переменного коэффициента теплоотдачи. Для упрощения задачи будем считать поглощение СВЧ мощности постоянным по периметру и длине волновода, что достигается ((2), (3) в [1]) при $\Theta=1$ и малых

величинах длины волновода и коэффициента затухания волны H_{10} .

Расчетные соотношения для анализа работы волноводной нагрузки в импульсном режиме при выполнении исходных предположений работы [1] имеют следующий вид:

$$t(y, z, \tau) = \sum_{m_1} \sum_{p=1}^{\infty} T_{\text{тор}}(\tau) Z_m(z) \cos K_p(y + b/2); \quad (1)$$

$$\bar{t}_z^*(y, z) = \sum_{m_1} \sum_{p=1}^{\infty} (\overline{T_{\text{тор}}(\tau)})_z Z_m(z) \cos K_p(y + b/2),$$

где

$$\begin{aligned} T_{\text{тор}}(\tau) = & C_{\text{тор}} e^{-\lambda_{\text{тор}}^2 a_1^2 (\tau - \tau_q)} + \\ & + \vartheta_{\text{тор}} \left\{ \frac{1}{(\lambda_{\text{тор}} a_1)^2} \left(1 - e^{-\lambda_{\text{тор}}^2 a_1^2 (\tau - \tau_q)} \right) + \right. \\ & + \sum_{j=1}^{\infty} \frac{2}{(\lambda_{\text{тор}} a_1)^4 + (\omega q)^2} \frac{\sin(j\omega \cdot \tau_{\text{нм}}/2)}{(j\omega \cdot \tau_{\text{нм}}/2)} \left[(\lambda_{\text{тор}} a_1)^2 \times \right. \\ & \times \cos \left[j\omega \left(\tau - \frac{\tau_{\text{нм}}}{2} \right) \right] + j\omega \sin \left[j\omega \left(\tau - \frac{\tau_{\text{нм}}}{2} \right) \right] - e^{-\lambda_{\text{тор}}^2 a_1^2 (\tau - \tau_q)} \times \\ & \left. \left. \times \left((\lambda_{\text{тор}} a_1)^2 \cos \left[j\omega \left(\tau_q - \frac{\tau_{\text{нм}}}{2} \right) \right] + j\omega \sin \left[j\omega \left(\tau_q - \frac{\tau_{\text{нм}}}{2} \right) \right] \right) \right] \right\}; \quad (2) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} (\overline{T_{\text{тор}}(\tau)})_z = & \frac{\vartheta_{\text{тор}}}{(\lambda_{\text{тор}} a_1)^2} + \frac{1}{(\tau_{q+1} - \tau_q)} e^{\lambda_{\text{тор}}^2 a_1^2 \tau_q} \left(e^{-\lambda_{\text{тор}}^2 a_1^2 \tau_{q+1}} - \right. \\ & \left. - e^{-\lambda_{\text{тор}}^2 a_1^2 \tau_q} \right) \frac{1}{(\lambda_{\text{тор}} a_1)^2} \left(\frac{\vartheta_{\text{тор}}}{(\lambda_{\text{тор}} a_1)^2} - C_{\text{тор}} \right) + \\ & + \sum_{i=1}^{\infty} \frac{2\vartheta_{\text{тор}}}{(\lambda_{\text{тор}} a_1)^4 + (j\omega)^2} \frac{\sin \left(j\omega \frac{\tau_{\text{нм}}}{2} \right)}{\left(j\omega \frac{\tau_{\text{нм}}}{2} \right)} \left[\frac{\sin \left(j\omega \frac{\tau_{q+1} - \tau_q}{2} \right)}{j\omega \frac{\tau_{q+1} - \tau_q}{2}} \left((\lambda_{\text{тор}} a_1)^2 \times \right. \right. \\ & \left. \left. \times \cos \left[j\omega \frac{\tau_{q+1} + \tau_q - \tau_{\text{нм}}}{2} \right] + j\omega \sin \left[j\omega \frac{\tau_{q+1} + \tau_q - \tau_{\text{нм}}}{2} \right] \right) + \right. \\ & \left. + \frac{1}{(\lambda_{\text{тор}} a_1)^2} \frac{1}{\tau_{q+1} - \tau_q} e^{\lambda_{\text{тор}}^2 a_1^2 \tau_q} \left(e^{-\lambda_{\text{тор}}^2 a_1^2 \tau_{q+1}} - \right. \right. \end{aligned}$$

$$-e^{-\lambda_{\text{top}}^2 a_1^2 \tau_q} \left) \left((\lambda_{\text{top}} a_1)^2 \cos \left[j\omega \left(\tau_1 - \frac{\tau_{\text{HM}}}{2} \right) \right] + j\omega \sin \left[j\omega \left(\tau_1 - \frac{\tau_{\text{HM}}}{2} \right) \right] \right) \right]; \quad (3)$$

$$C_{\text{top}} = - \frac{4 \tilde{U}_0}{K_m} \frac{\sin(K_p \alpha)}{(K_p \alpha)} \frac{1}{\left[\frac{l}{2} \left(\left(\frac{K_m}{\beta} \right)^2 + 1 \right) + \frac{1}{\beta} \right] \left(1 + \frac{\sin(2K_p \alpha)}{2K_p \alpha} \right)}, \quad (4)$$

где \tilde{U}_0 — начальное распределение температуры в нагрузке в момент времени $(\tau_{q+1} - \tau_q)$;
 $(\tau_{q+1} - \tau_q)$ — интервал времени, за который температура нагрузки изменится на один градус;
 \bar{t}_2^* — средняя на отрезке времени $(\tau_{q+1} - \tau_q)$ температура в импульсном режиме работы.

Остальные обозначения аналогичны принятым в работе [1]. Если в соотношениях (1), (2) положить $\tau_{\text{HM}} = T$, то с их помощью можно исследовать процесс установления температуры при непрерывном поглощении пленкой СВЧ мощности.

Расчеты тепловых полей нагрузок на основе соотношений (1) — (5) проводились на ЭЦВМ; зависимость коэффициента теплоотдачи от температуры (рис. 1) задавалась в виде таблицы с шагом 1°C [2]. В интервале температуры, соответствующем шагу вычисления $h(t)$, коэффициент теплоотдачи считается постоянным и равным среднему от его крайних на интервале значений, что позволяет на каждом интервале использовать результаты расчета, проведенного в работе [1] для $h = \text{const}$. Температура, соответствующая концу интервала, а также время, при котором она достигается, определяют начальное условие для следующего шага. Проводя последовательные вычисления на каждом интервале, можно исследовать тепловые поля волноводной нагрузки с переменным коэффициентом теплоотдачи.

Учитывая дискретность определения $h(t)$, среднюю на периоде СВЧ импульса температуру можно определить с помощью формулы математического ожидания

$$\bar{t}_2 = \frac{1}{T} \sum_{q=N_1}^{N_2} \bar{t}_2^* (\tau_{q+1} - \tau_q), \quad (5)$$

где N_1 — число узловых точек (время достижения температуры начала или конца интервала изменения $h(t)$), предшествующих данному периоду;

N_2 — число узловых точек рассматриваемого периода, включая точки начала и конца периода.

С надежной теплоизоляцией калориметрической жидкости ее установившаяся температура при $Q=1$, измеряемая на выходе нагрузки, совпадает с температурой средней на периоде СВЧ импульса в установившейся области $(\bar{t}_2)_{уст}$. Следовательно-

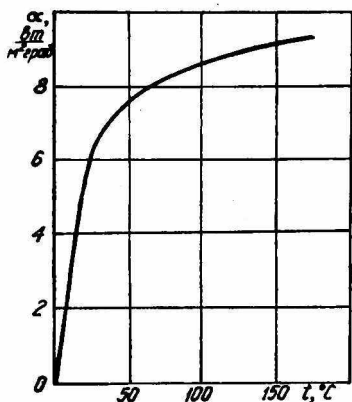


Рис. 1. Зависимость коэффициента теплоотдачи конвекцией от температуры.

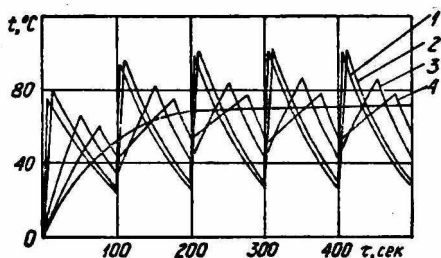


Рис. 2. Процесс установления импульсной температуры в волноводной нагрузке ($7,2 \times 3,4$ см) для различных Q : сплошные кривые 1, 2, 3, 4 соответствуют $Q=20; 10; 2; 1,33$; пунктирные кривые 1, 2, 3, 4 определяют $(\bar{t}_2)_{уст}$ для $Q=20; 10; 2; 1,33$. ($P_{вх}=60$ Вт).

но, в такой нагрузке при ее калибровке непрерывной мощностью не будет существовать дополнительной погрешности измерения импульсной мощности. Однако в некоторых случаях потери тепла учитываются калибровкой измерителя мощности в непрерывном режиме. Измерение с помощью такой нагрузки импульсной СВЧ мощности может привести к дополнительной погрешности ее измерения.

Заметим, что расчет тепловой прочности нагрузки, проводимой для $Q=1$, может привести к ошибке в прогнозировании надежности ее работы в импульсном режиме. Как видно из соотношений (1) — (5), дополнительная погрешность измерения импульсной мощности зависит не только от величины поглощаемой пленкой мощности и параметров СВЧ импульса, но и теплофизических свойств нагрузки и режима теплообмена на ее внешней поверхности. Дополнительная погрешность при измерении импульсной мощности может также возникнуть вследствие перепада температуры калориметрической жидкости вдоль нагрузки, если ее нагрев осуществляется за счет тепло-

передачи через стенку нагрузки. Исследование отклонений $t_{уст}$ от $(\bar{t}_\Omega)_{уст}$, определяющих дополнительную погрешность измерения импульсной мощности с помощью соотношений (1) — (5), можно провести для волноводных нагрузок при слабых режимах теплообмена (естественная конвекция).

На рис. 2 приведены расчетные кривые, позволяющие оценить влияние величины параметров импульсного режима на величину отклонения $(\bar{t}_\Omega)_{уст}$ от $t_{уст}$. Сравнивая этот рисунок с рис. 2 работы [1], можно заметить, что деформация теплового импульса при h (τ) приводит к $(\bar{t}_\Omega)_{уст} h = \text{const} \geq \geq (\bar{t}_\Omega)_{уст} h(t)$. Здесь $t_{уст}(h = \text{const}) = t_{уст}(h(t))$. Таким образом, погрешность измерения импульсной мощности появляется вследствие уменьшения $(\bar{t}_\Omega)_{уст}$ по сравнению с $t_{уст}$. Данное положение необходимо учитывать и при прогнозировании надежности работы волноводных нагрузок.

Как видно из соотношений (1) — (5), на величину дополнительной погрешности влияют более десяти параметров, поэтому расчет ее абсолютной величины может быть проведен лишь для конкретного типа нагрузки и режима теплообмена на ее внешней поверхности. Заметим, что величина дополнительной погрешности измерения импульсной мощности зависит от теплофизических свойств поглощающего покрытия, как это показано в работе [1]. Наличие пленки на внутренней поверхности волновода может резко ухудшить эквивалентную теплопроводность стенок нагрузки.

Итак, проведенные исследования позволили оценить влияние параметров импульсного режима на дополнительную погрешность измерения импульсной мощности калориметрическим методом. Полученные соотношения позволяют рассчитать величину дополнительной погрешности любой волноводной калориметрической нагрузки с пленочным поглотителем на внутренней поверхности.

ЛИТЕРАТУРА

1. Ю. С. Архангельский, В. А. Коломейцев. Расчет тепловых полей нагрузок волноводного типа с тонкой поглощающей пленкой на внутренней поверхности. Доклад на межведомственной конференции «Состояние и пути совершенствования методов и приборов для измерения мощности на СВЧ». Харьков, 1971.

2. Г. Н. Дульнев, Э. М. Семьянин. Теплообмен в радиоэлектронных аппаратах. Изд-во «Энергия», Л., 1968.

3. Андре Анго. Математика для электро- и радиоинженеров. Изд-во «Наука», М., 1965.