

Тепловой расчет пассивных устройств СВЧ в квазистационарном режиме

Даны теоретические рекомендации и приведены практические данные анализа тепловых полей устройств СВЧ, позволяющие находить наиболее перегретые точки различных элементов, работающих как в стационарном, так и в нестационарном режиме. Данные режимы возникают при воздействии непрерывного и импульсного СВЧ сигналов.

Ключевые слова: тепловые режимы электронных устройств, уравнение теплопроводности Фурье, стационарный нагрев, нестационарный нагрев, СВЧ источник тепловыделения.

Введение. В радиосистемах используются преимущественно два типа сигналов непрерывный и импульсный, создающие соответственно стационарный и нестационарный нагрев. Параметрами импульсного режима является длительность радиоимпульса t_u , период повторения T_u и их отношение, называемое скважностью и обозначаемое как q_u .

Как известно, тепловые поля, создаваемые внутренними источниками^(*), описываются дифференциальным уравнением теплопроводности [1]:

$$\Delta T - \frac{c\rho}{\lambda} \frac{\partial T}{\partial t} = -\frac{1}{\lambda} q(x, y, z) \quad (1)$$

где ΔT - лапласиан температуры T в точке (x, y, z) ; c – теплоемкость; λ – теплопроводность; ρ – плотность материала; $q(x, y, z)$ – тепловыделение внутренних источников; t - время;

и законом теплопроводности Фурье:

$$\vec{q} = -\lambda \text{grad } T \quad (2)$$

Вышеприведенные уравнения теплопроводности написаны для общего случая нестационарного нагрева. Уравнение (1) является параболическим и описывает, как случай непрерывного, так и импульсного воздействия высокочастотного сигнала на произвольное устройство СВЧ, то есть описывает нестационарную во времени пространственную трехмерную задачу.

Этот математический аппарат применим для всех типов устройств:

(*) Примечание. Внешние источники, такие солнечный разогрев или зимний холодный воздух - не рассматриваются: предметом доклада являются только внутренние источники, создаваемые прохождением СВЧ сигнала.

1. Пассивных, таких, как делители антенных решеток и сумматоры передатчиков.
2. Активных, например, транзисторы, диоды или интегральные схемы (ММІС) в бескорпусном исполнении.

В пассивных устройствах источником тепла являются омические и диэлектрические потери СВЧ энергии, причем эти источники распределенные, их тепловое поле находится из решения электродинамической задачи, а для активных полупроводниковых элементов источником тепла является полупроводниковый переход, размер которого существенно меньше длины волны, так что источник следует рассматривать как сосредоточенный.

В связи с тем, что толщина полосковых линий в мощных распределительных системах в большинстве конструкций составляет от десяти до тысячи микрон, постоянная времени переходного процесса составляет от нескольких секунд до нескольких минут. Это время значительно больше длительности импульса радиосигнала, которого составляет от нескольких микросекунд до десятков миллисекунд. Следовательно, в случае пассивных устройств достаточно исследовать стационарное тепловое поле в установившемся режиме.

В этом случае уравнение (1) лишается члена, зависящего от времени и тепловое поле в стационарном (установившемся) режиме подчиняется уравнению Пуассона:

$$\Delta T = -\frac{1}{\lambda} q(x, y, z) \quad (3)$$

Таким образом, задача анализа теплового режима для непрерывного СВЧ сигнала сводится к решению уравнения Пуассона относительно $T(x, y, z)$ при известных источниках тепловыделения $q(x, y, z)$.

Как мы показали, первый случай стационарной задачи сводится к уравнению Пуассона (3) для непрерывного СВЧ сигнала. Анализ конструкции таких устройств, а также большинство работ выполненные по этому вопросу показывают, что наиболее теплонагруженными элементами являются входные линии питания, через которые проходит полная мощность передатчика. Все многообразие пассивных распределительных систем, в конечном счете, сводится к коаксиальным и полосковым линиям различных типов. Эти стационарные задачи с различными тепловыми граничными условиями рассмотрены во многих работах, например, [2]. Кроме аналитического подхода в таких работах как [2], можно воспользоваться и некоторыми калькуляторами СВЧ линий передачи, но следует принимать во внимание, что все известные калькуляторы устройств СВЧ считают тепловую задачу *только для непрерывного режима*.

Поэтому вопрос, требующий специального рассмотрения, это нестационарный режим, так как в большинстве радиосистем используются импульсные сигналы, приводящие к нестационарному режиму нагрева. Полученное уравнение (3) относится к устройствам, работающим в стационарном тепловом режиме. Следует заметить, что такое устройство находится при наиболее тяжелом тепловом воздействии.

Для нестационарного теплового режима решение уравнения (1) для $T(t)$ неизвестно, однако влияние нестационарности на величину T можно оценить, исходя из тепловой инерции τ . Это соображение позволяет воспользоваться известными решениями уравнения теплопроводности типа (3) и распространить результаты, полученными для стационарных решений на нестационарный режим работы.

Неустановившийся характер $T(t)$ наиболее заметно сказывается при периодической подаче СВЧ энергии, когда продолжительность импульсов передатчика t_u соизмерима с тепловой инерцией элемента τ .

Поскольку общий вид решения уравнения теплопроводности при $\frac{\partial T}{\partial t} = 0$ следующий [2]:

$$T(t) = R_{i(j)}P \text{ для случая } t \gg \tau,$$

где $R_{i(j)}$ – тепловое сопротивление, возникающее вследствие омических или диэлектрических потерь, P – пиковая (непрерывная) мощность, то для неустановившегося режима решение удобно представить в аналогичном виде:

$$T(t) = R_{i(j)}P_{\text{нр}} \text{ для случая } t \sim \tau,$$

где $P_{\text{нр}}$ - эквивалентная средняя мощность для неустановившегося режима.

Значение $P_{\text{нр}}$ можно получить, пользуясь соотношением [3]:

$$P_{\text{нр}} = P \frac{1 - e^{-\frac{t_{\text{и}}}{\tau}}}{1 - e^{-\frac{T_{\text{и}}}{t_{\text{и}}}}} \quad (4)$$

В пассивных устройствах СВЧ мы имеем дело с металлическими конструкциями с характерными размерами в десятки и сотни миллиметров. Постоянная времени переходного процесса такой конструкции τ составляет от нескольких секунд до нескольких минут. Это время значительно больше длительности импульса радиосигнала $t_{\text{и}}$. Анализ уравнения (4) показывает, что нестационарный режим можно разделить на три временные области:

1. Если $\tau \gg T_{\text{и}}$, то можно рассчитывать значение $T(t)$, как установившееся при соответствующей мощности $P_{\text{нр}} = \frac{P}{q_{\text{и}}}$ как это представлено на рисунке 1. Этот режим называют квазистационарным.

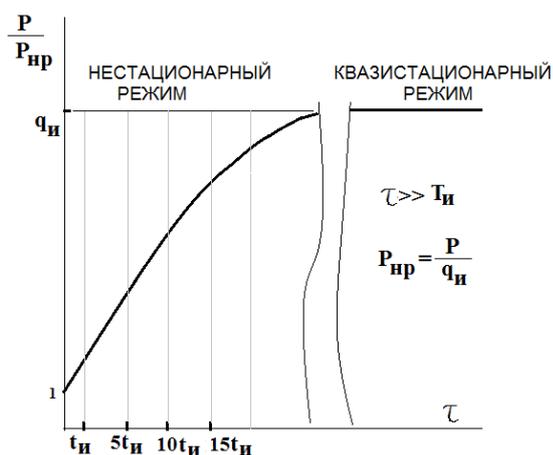


Рис.1

2. Если $\tau \ll t_{\text{и}}$, то тепловые поля определяются для стационарного решения уравнения (3), как для установившееся процесса, при соответствующей импульсной пиковой мощности $P_{\text{нр}} = P$ (представлено на рисунке 2).

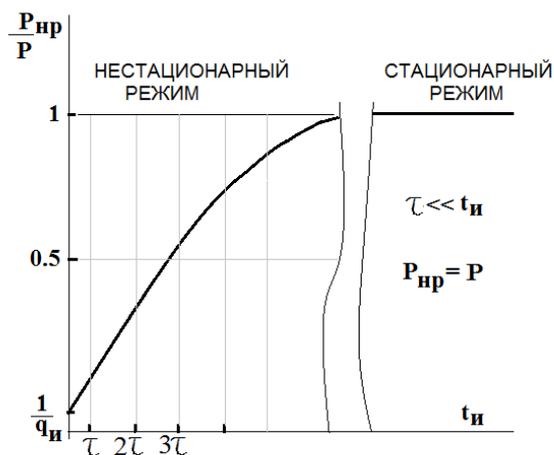


Рис.2

3. В случае если искомое решение находится в зоне переходного временного процесса $t \sim \tau$, то требуется строгое решение во временной области и используются специализированные программные продукты – тепловые симуляторы.

Библиографический список

1. Дульнев Г.Н., Семяшкин Э.М., Теплообмен в радиоэлектронных аппаратах, «Энергия», Л.,1968,360с.
2. Parnes, M. The correlation between thermal resistance and characteristic impedance of microwave transmission lines [Текст] (Корреляция между тепловым сопротивлением и характеристическим импедансом СВЧ-линий передачи) / M. Parnes // Microwave Journal. – 2000. – P. 84–92.
3. Тепло- и массообмен. Теплотехнический эксперимент: Справочник. Под ред. В.А.Григорьева и В.М.Зорина,- Москва, Энергоиздат,1982,512с.