

С. В. ГОНТОВОЙ

Украина, г. Алчевск

Дата поступления в редакцию
08.10 1997 г.

Оппонент Н. И. НИКИФОРОВ

МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССА ИНДУКЦИОННОГО НАГРЕВА СОСТАВНЫХ ПЬЕЗОКЕРАМИЧЕСКИХ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЕЙ

Разработана методика для определения температурного поля по сечению составного пьезокерамического преобразователя при индукционной пайке.

The procedure for determination of temperature field by cross-section of component piezoelectric ceramics transducer at induction soldering has been developed.

Составной пьезокерамический преобразователь (СПП) для электромеханических фильтров представляет собой металлический резонатор с установ-

ленными на нем пьезоэлементами и служит для преобразования энергии электрических колебаний в механические и наоборот. При изготовлении СПП существует необходимость соединения керамических пьезоэлементов с металлическим резонатором. Для выполнения этой операции чаще всего применяется пайка; наиболее перспективным способом является индукционная пайка. При проектировании технологического оборудования для индукционной пайки возникает ряд задач, определяемых спецификой объекта. Важной представляется задача минимизации удельной мощности, затрачиваемой на нагревание загрузки (металлического резонатора с пьезоэлементами) до температуры плавления припоя. Индукционный нагрев позволяет достичь этого путем увеличения плотности поверхностных токов в металле и повышения динамики нагрева.

Практическому решению указанной проблемы поможет предлагаемое численное моделирование нагрева загрузки в электромагнитном поле индуктора, которое можно разделить на два этапа: на первом определяются удельная мощность, выделяемая в системе «индуктор — загрузка», и ее связь с параметрами индуктора и генератора высокочастотных колебаний; на втором находится распределение температуры по сечению металлического резонатора (МР), при этом исходными принимаются данные, полученные на первом этапе. На **рис. 1** показаны внешний вид СПП и его сечение плоскостью, параллельной XOZ , для которого определяется температурное поле в процессе пайки.

Определение удельной мощности в системе «индуктор — загрузка»

Для решения первой задачи можно предложить следующий путь. Рассмотрим наиболее распространенный в автоматизированных индукционных установках канал регулирования температуры загрузки с помощью тока индуктора [1, с. 221]. Как известно, зависимость температуры i -той точки загрузки Θ_i от тока индуктора носит нелинейный характер, и ее можно представить последовательным включением двух фиктивных звеньев (см. **рис. 2**).

Входом первого звена является ток индуктора $I_{\text{и}}$, выходом — удельная мощность на поверхности загрузки p_0 . Для второго звена вход — p_0 , выход — температура Θ_i .

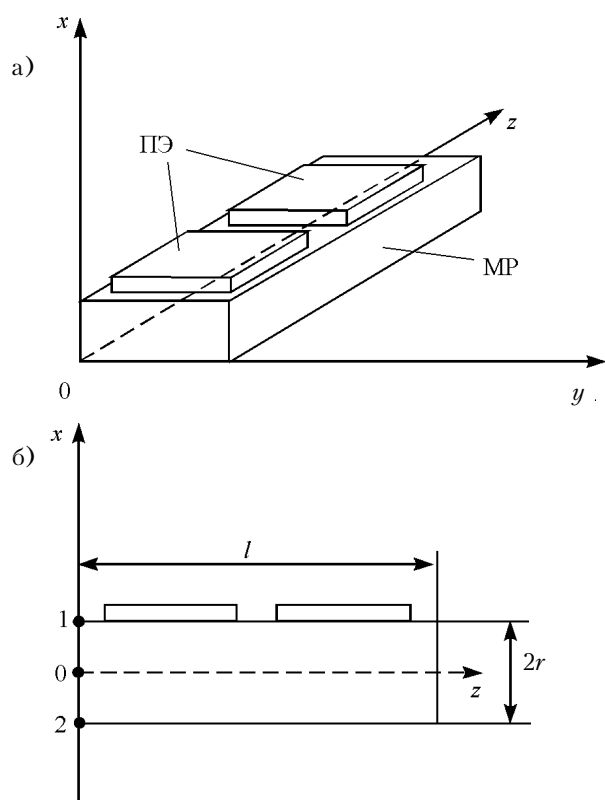


Рис. 1.

a — СПП в декартовой системе координат;
ПЭ — пьезоэлементы; МР — металлический резонатор;
 $б$ — сечение СПП плоскостью, параллельной плоскости XOZ ;
 l — длина СПП; $2r$ — толщина МР

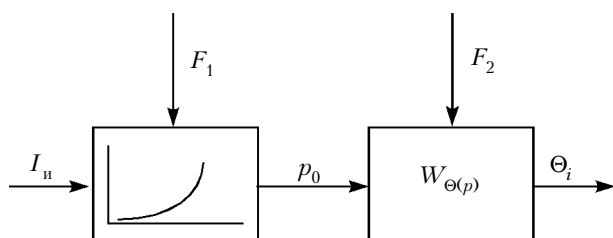


Рис. 2. Эквивалентная схема замещения индуктора с нагрузкой (F — возмущение)

Первое звено является нелинейным и практически безынерционным, связь между его входом и выходом (передаточная функция) описывается выражением

$$p_0 = k I_n^2, \quad (1)$$

где k — коэффициент, определяемый из электрического расчета индуктора.

Второе звено с передаточной функцией $W_{\Theta(p)}$ в схеме замещения «индуктор — нагрузка» является линейным при постоянстве теплофизических свойств нагрузки. Функция $W_{\Theta(p)}$ в общем случае зависит от выбора координат точки i в объеме нагрузки, по температуре которой ведется регулирование ее теплового режима. Эта точка должна быть доступна для наблюдения, а ее температура достаточно адекватно отражать температурное поле всей заготовки. Этим требованиям отвечает точка, выбранная на поверхности МР.

Основными факторами, действующими на схему, являются частота тока индуктора f и наличие зажимного приспособления, поглощающего электромагнитную энергию в поле индуктора, причем изменение частоты существенно сказывается на значении коэффициента k . Влияние частоты тока на передаточную функцию $W_{\Theta(p)}$ выражено не настолько явно.

Для определения коэффициента k представим удельную поверхностную мощность p_0 как отношение мощности P_2 , выделяющейся в нагрузке, к площади ее поверхности S_2 :

$$p_0 = P_2 / S_2. \quad (2)$$

Активную мощность в нагрузке (P_2) можно определить, используя теорему Умова — Пойтинга для мгновенных значений [2, с. 346—350; 3, с. 135]:

$$-\oint_S \vec{\Pi} dS = \int_V \gamma E^2 dV + \frac{d}{dt} \int_V \left(\frac{\epsilon E^2}{2} + \frac{\mu H^2}{2} \right) dV, \quad (3)$$

где μ , ϵ и γ — магнитная проницаемость, диэлектрическая проницаемость и удельная проводимость материала резонатора, соответственно;

E и H — напряженность электрического и магнитного поля, соответственно.

Левая часть выражения представляет собой поток вектора Пойтинга сквозь замкнутую поверхность

S , ограничивающую объем V . В соответствии с законом Джоуля — Ленца в дифференциальной форме γE^2 — энергия, выделяющаяся в виде теплоты в единице объема в единицу времени:

$$-\operatorname{div} \vec{\Pi} dV = \gamma E^2. \quad (4)$$

Если поле не изменяется во времени, то справедливо выражение

$$\frac{d}{dt} \left(\frac{\epsilon E^2}{2} + \frac{\mu H^2}{2} \right) = 0. \quad (5)$$

Таким образом, для мощности P_2 получим:

$$P_2 = \int_V \gamma E^2 dV = \gamma E^2 V, \quad (6)$$

где V — объем нагрузки.

Напряженность электрического поля E можно определить исходя из параметров индуктора и генератора ВЧ-колебаний. Опустив промежуточные преобразования, запишем окончательное выражение:

$$E = \frac{p^2 r}{\mu_a} \cdot \frac{LI}{w S_n} \cdot \frac{\operatorname{sh}(px)}{\operatorname{sh}(pr)}, \quad (7)$$

где $p = \sqrt{\omega \mu_a \gamma}$ — глубина проникновения электромагнитного поля в материал резонатора;

r — половина толщины резонатора;

L , w , S_n — соответственно индуктивность, число витков и площадь поперечного сечения индуктора;

ω — круговая частота электромагнитного поля;

μ_a — абсолютная магнитная проницаемость материала резонатора;

x — координата.

Выражения (6) и (7) устанавливают связь параметров индуктора и генератора ВЧ-колебаний с мощностью, выделяющейся в металлической подложке. Из выражений (2) и (7) определим коэффициент k :

$$k = \frac{V}{S_2 \gamma} \left(\frac{p^2 r}{\mu_a} \cdot \frac{L}{w S_n} \cdot \frac{\operatorname{sh}(px)}{\operatorname{sh}(pr)} \right)^2. \quad (8)$$

Исследование динамики нагрева СПП в индукторе

Математическая модель индукционного нагрева СПП создается с целью выяснения физической картины процесса нагрева и исследования влияния режимов генератора высокочастотных колебаний на динамику нагрева составного пьезопреобразователя. В модели учтены влияние внутренних источников тепла и неоднородность нагрузки.

Математическая модель процесса построена на основе уравнения теплопроводности, которое относится к дифференциальным уравнениям в частных производных и в прямоугольной системе координат записывается следующим образом: