

УДК 621.372.412.072.6—52

И. В. ИВАНОВ, С. Н. КАРЯГИН, Т. Г. СЕМЕНОВА

**ЭФФЕКТ АВТОМАТИЧЕСКОЙ СТАБИЛИЗАЦИИ
ТЕМПЕРАТУРЫ В РЕЗОНАТОРЕ СВЧ
С СЕГНЕТОЭЛЕКТРИЧЕСКИМ НЕЛИНЕЙНЫМ ЭЛЕМЕНТОМ**

Автоматическая стабилизация температуры сегнетоэлектрического нелинейного элемента сосредоточенного типа осуществлена в коаксиальном резонаторе СВЧ. Экспериментально получена степень стабильности температуры, более высокая, чем это возможно при использовании температурной зависимости диэлектрических потерь в сегнетоэлектрике в окрестности точки фазового перехода.

В работе [1] была предложена теория эффекта автоматической стабилизации температуры в резонансной системе с сегнетоэлектриком. Было показано, что за счет резонансной зависимости энергии диэлектрических потерь может быть достигнута автоматическая стабилизация температуры, более высокая, чем это возможно при использовании температурной зависимости диэлектрических потерь в окрестности точки фазового перехода в сегнетоэлектрике (так называемый тандемный эффект [2]). Резонансная автотермостабилизация может быть осуществлена в любой колебательной системе, содержащей сегнетоэлектрик. Это может быть диэлектрический резонатор СВЧ, выполненный из сегнетоэлектрика; возможна также автотермостабилизация нелинейного сегнетоэлектрического конденсатора сосредоточенного типа, входящего в состав объемного резонатора. Принцип резонансной автотермостабилизации поясняет рис. 1. Резонансная кривая — это температурная зависимость мощности диэлектрических потерь $P_{ди}$ в колебательной системе, собственная частота которой зависит от температуры в силу температурной зависимости диэлектрической проницаемости сегнетоэлектрика. Нагретый за счет диэлектрических потерь в поле СВЧ сегнетоэлектрик отдает во внешнюю среду энергию; температурная зависимость энергии теплоотдачи изображена на рис. 1 прямыми линиями, исходящими из точек, соответствующих данной температуре окружающей среды. Пересечения прямых с кривой диэлектрических потерь дают точки теплового равновесия: две крайние точки пересечения каждой прямой с резонансной кривой соответствуют устойчивому тепловому равновесию, средние точки — неустойчивы. Как следует из рис. 1, изменение температуры окружающей среды на величину ΔT_c приводит к автоматической тепловой автоподстройке резонансной системы, в результате чего внутренняя

температура сегнетоэлектрического элемента меняется на величину ΔT_e , существенно меньшую, чем ΔT_0 .

Системы типа рассмотренной в данной работе находят все более широкое применение в нелинейной радиотехнике СВЧ на нелинейных твердых диэлектриках (сегнетоэлектриках), причем проблема стабилизации температуры сегнетоэлектрических элементов является одной из основных. Объемный резонатор с сегнетоэлектрическим элементом может также рассматриваться как модель резонансной системы, в которой осуществляется резонансная автотермостабилизация. Модель эта более проста, чем, например, сегнетоэлектрический резонатор с его сложным распределением электрического поля и распределением внутренней стационарной температуры. Это обстоятельство делает доступными для исследования многие детали эффекта автотермостабилизации.

Коаксиальный резонатор с сосредоточенным сегнетоэлектрическим конденсатором

Соотношение для фактора автотермостабилизации S , выведенное в [1] и справедливое для любой резонансной системы с сегнетоэлектриком, имеет вид

$$S = \frac{\Delta T_e}{\Delta T_0} = \frac{k}{P_0} \cdot \frac{[(1 + \beta)^2 + \xi^2]^2}{24\beta_1} \cdot \frac{1}{M_T} \quad (1)$$

Здесь ΔT_e — приращение внутренней температуры сегнетоэлектрика, которое вызвано изменением температуры окружающей среды на величину ΔT_0 ; k — коэффициент теплоотдачи с поверхности сегнетоэлектрического элемента во внешнюю среду, $\beta = \beta_1 + \beta_2$ — коэффициент связи резонансной системы с выходной (β_2) и входной (β_1) цепями; ξ — расстройка относительно резонанса,

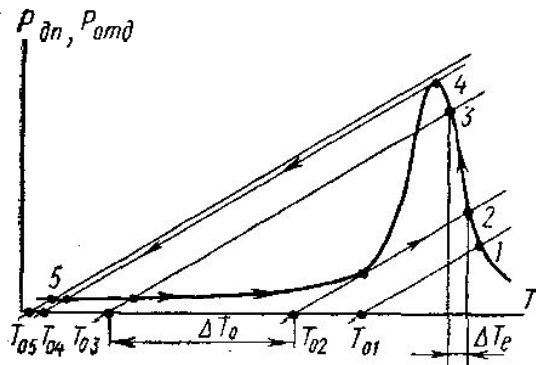


Рис. 1. Примерная схема резонансной автотермостабилизации

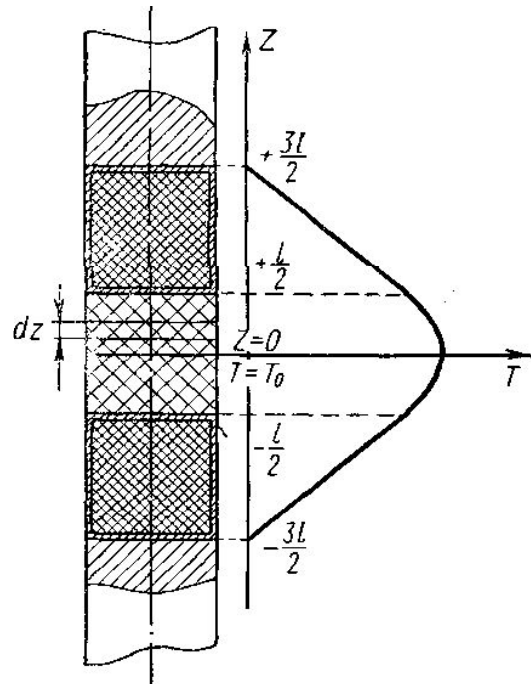


Рис. 2. Распределение стационарной температуры в сегнетоэлектрическом нелинейном элементе

P_0 — мощность электромагнитной волны, падающей на систему, а M_T — так называемый температурный фактор качества системы. В случае сегнетоэлектрического (диэлектрического) резонатора запишем

$$M_T = \frac{1}{\epsilon} \frac{d\epsilon}{d\Delta T} \cdot \frac{1}{\text{tg } \delta} \quad (2)$$

где ε — диэлектрическая проницаемость, а $\operatorname{tg} \delta$ — тангенс угла диэлектрических потерь. В том случае, когда диэлектрические потери не являются единственными внутренними потерями резонансной системы, температурный фактор качества системы имеет вид

$$M_T = \frac{1}{\varepsilon} \frac{d\varepsilon}{dT} Q_0, \quad (3)$$

где Q_0 — внутренняя добротность системы. При этом величина фактора автотермостабилизации (1) должна быть увеличена в α раз, где α — коэффициент включения, равный отношению общей энергии внутренних потерь в системе к диэлектрическим потерям в сегнетоэлектрическом конденсаторе. Обычно величина α незначительно отличается от единицы.

В соотношении (1) фигурирует величина внутренней температуры сегнетоэлектрического элемента. Строго говоря, это понятие требует уточнения, так как в любом конденсаторе с потерями внутренняя температура непостоянна по объему, а характеризуется более или менее сложным пространственным распределением. Наиболее простое распределение стационарной температуры имеет место в случае сосредоточенного конденсатора с однородным внутренним электрическим полем. В этом квазистатическом случае изотермические поверхности — это плоскости, параллельные электродам конденсатора, а распределение стационарной температуры в направлении, перпендикулярном изотермическим плоскостям, имеет квадратичный характер. Если диэлектрик обладает значительным температурным коэффициентом диэлектрической проницаемости, то при нагревании в переменном электрическом поле он утрачивает электрическую однородность (по ε). Вообще говоря, это приводит к перераспределению электрического поля по объему диэлектрика и может вызвать перераспределение плотности энергии диэлектрических потерь. Однако, в частном случае сегнетоэлектрика, находящегося выше точки Кюри, указанного перераспределения плотности потерь не происходит. Действительно, мощность диэлектрических потерь в слое диэлектрика толщиной dz , параллельном плоскости электродов конденсатора (рис. 2), имеет вид

$$dP_{\text{дп}} = P_{\text{уд}} A dz = \frac{f \varepsilon \operatorname{tg} \delta}{1,8 \cdot 10^{12}} \left(\frac{du}{dz} \right)^2 A dz \text{ (вт)}, \quad (4)$$

где A — площадь слоя, f — частота переменного электрического поля E , а $du = Edz$ — падение напряжения на слое. При нагревании диэлектрика за счет диэлектрических потерь происходит перераспределение электрического поля, так что падение напряжения на слое, подобно тому, как это имеет место в емкостном делителе напряжения, оказывается обратно пропорциональным диэлектрической проницаемости слоя: $du = \frac{a}{\varepsilon(z)} dz$,

где a — коэффициент пропорциональности. Для сегнетоэлектрика, находящегося выше точки Кюри (а именно в таком температурном режиме используются сегнетоэлектрики в системах сверхвысоких частот), диэлектрическая проницаемость и тангенс угла потерь меняются с температурой по закону Кюри — Вейсса:

$$\varepsilon = \frac{C}{T - T_k}; \quad \operatorname{tg} \delta = \frac{D}{T - T_k}, \quad (5)$$

T_k — температура Кюри — Вейсса, а C и D — константы.

Подстановка этих соотношений в (4) компенсирует зависимость от температуры величины:

$$\left(\frac{du}{dz}\right)^2 \sim \frac{1}{\varepsilon^2} = \left(\frac{T - T_k}{C}\right)^2, \quad (6)$$

так что плотность энергии диэлектрических потерь оказывается не зависящей от температуры и не меняется в процессе нагревания сегнетоэлектрического конденсатора за счет диэлектрических потерь. В результате распределение стационарной температуры в объеме плоского слоя сегнетоэлектрика сохраняется квадратичным вне зависимости от степени СВЧ нагрева конденсатора. Как уже указывалось, эффект автотермостабилизации проявляется тем резче, чем меньше коэффициент теплоотдачи с поверхности сегнетоэлектрического элемента. Если сегнетоэлектрический конденсатор выполнен в виде цилиндра малых размеров, а его теплоизоляция достигается за счет «тепловых пробок» — (диэлектрических цилиндров из того же материала и тех же размеров, что и конденсатор, но целиком металлизированных для осуществления электрического контакта с конденсатором (рис. 2)), то распределение стационарной температуры в системе конденсатор — «пробки» имеет вид:

$$\begin{aligned} T &= T_0 + B \left(lz + \frac{3l^2}{2} \right) \quad \text{при} \quad -\frac{3l}{2} \leq z \leq -\frac{l}{2}; \\ T &= T_0 + B \left(\frac{5}{4} l^2 - z^2 \right) \quad \text{при} \quad -\frac{l}{2} \leq z \leq \frac{l}{2}; \\ T &= T_0 - B \left(lz - \frac{3l^2}{2} \right) \quad \text{при} \quad +\frac{l}{2} \leq z \leq \frac{3l}{2}; \\ T &= T_0 \quad \text{при} \quad |z| \geq \frac{3l}{2}; \end{aligned} \quad (7)$$

где l — толщина конденсатора и «пробок». Величина перепада температуры между поверхностью металлических электродов конденсатора и внутренним средним слоем ($z=0$), имеющим наибольшую температуру, равна

$$\delta T = \left(\frac{l}{2}\right)^2 B; \quad B = \frac{f \varepsilon \operatorname{tg} \delta E^2}{1,8 \cdot 10^{12} \kappa} \quad (\text{зр/см}^2), \quad (8)$$

где κ — коэффициент теплопроводности сегнетоэлектрика. Стационарное распределение температуры в сегнетоэлектрическом конденсаторе можно характеризовать эффективной температурой, понимая под такой постоянной по объему температурой, при которой конденсатор имеет емкость, равную емкости при данном распределении стационарной температуры. Так как данному распределению температуры $T = \hat{T}(z)$ соответствует распределение $\varepsilon = \varepsilon(z)$, то емкость конденсатора $C_0(T_{\text{эфф}})$ будет иметь вид

$$\frac{1}{C_0(T_{\text{эфф}})} = \frac{4\pi l}{A \varepsilon(T_{\text{эфф}})} = \int_{-l/2}^{+l/2} \frac{4\pi dz}{A \varepsilon(z)} = \frac{4\pi}{A} \int_{-l/2}^{+l/2} \frac{[T(z) - T_k] dz}{C}. \quad (9)$$

Так как

$$\varepsilon(T_{\text{эфф}}) = \frac{C}{T_{\text{эфф}} - T_k},$$

то эффективная температура оказывается равной

$$T_{\text{эфф}} = \frac{1}{l} \int_{-l/2}^{+l/2} T(z) dz. \quad (10)$$

Вычисление $T_{эфф}$ для системы, изображенной на рис. 2, дает

$$T_{эфф} = T_0 + \frac{7}{6} Bl^2. \quad (11)$$

Поскольку температура электродов конденсатора (при $z = -\frac{l}{2}$ и $z = +\frac{l}{2}$), определяющая мощность теплоотдачи, равна

$$T\left(\pm \frac{l}{2}\right) = T_0 + Bl^2 = T_{эфф} - \frac{1}{6} Bl^2 = T_{эфф} - \frac{2}{3} \delta T \quad (12)$$

и оказывается просто связанной с эффективной температурой, то появляется возможность выразить через одну и ту же эффективную температуру как энергию диэлектрических потерь в объеме сегнетоэлектрического элемента, так и энергию теплоотдачи с его поверхности. В дальнейшем под температурой сегнетоэлектрического элемента везде будет подразумеваться эффективная температура.

Экспериментальная часть

Для экспериментального определения степени автоматической термостабилизации был изготовлен коаксиальный резонатор с сегнетоэлектрическим конденсатором СВЧ сосредоточенного типа. Конденсатор был выполнен в виде сегнетокерамического цилиндрика из материала ВК-7 ($BaSrTiO_3$); диаметр цилиндра — 1,1 мм, высота — 2,6 мм. Теплоизоляция сегнетоэлектрического элемента достигалась за счет «тепловых пробок». С одного торца элемента «пробка» выполнялась в виде цилиндра из той же керамики и тех же размеров, что и сам элемент, с другого конца элемент имел контакт с керамической пластинкой. Поверхность тепловых «пробок» металлизировалась путем вжигания тонкого слоя серебра, что обеспечивало электрический контакт с конденсатором, но не увеличивало сколько-нибудь заметно коэффициент теплоотдачи с торцов элемента. Теплоотдача с боковой поверхности керамического цилиндра (конденсатора) при данной теплопроводности «пробок» была пренебрежимо мала и в расчет не принималась.

Как известно, спектр собственных частот коаксиального резонатора с сосредоточенной емкостью на одном конце представляет собой набор неэквидистантных линий, причем неэквидистантность особенно существенна на низших частотах. Резонатор, на котором был осуществлен эксперимент, имел наименьшую частоту порядка 300 Мгц; вторая частота была порядка 1500 Мгц. Для автотермостабилизации был использован резонанс на основной частоте резонатора f_1 , вторая частота f_2 использовалась для измерения температуры сегнетоэлектрического элемента. Выбор основного резонанса в качестве рабочего связан с тем обстоятельством, что, как показал расчет, степень автотермостабилизации получается наибольшей на основном резонансе. Физически это связано с большей чувствительностью наименьшей собственной частоты к изменению емкости сегнетоэлектрического элемента. Зависимость частоты второго резонанса от температуры, снятая на малом уровне СВЧ мощности, при котором нагрев сегнетоэлектрического элемента за счет диэлектрических потерь пренебрежимо мал и температура элемента в точности равна температуре окружающей среды, использовалась в качестве термометрической

кривой для определения эффективной температуры сегнетоэлектрического элемента. Для индикации резонанса на второй частоте в резонатор была введена дополнительная петля связи с детектором и измерительным усилителем. Степень связи этих цепей с резонатором была сделана пренебрежимо малой, так что коэффициент β_2 в выражении (1) может быть положен равным нулю. Связь с входной цепью (β_1) была выбрана оптимальной. Из соотношения (1) следует, что оптимум по коэффициенту β_1 достигается при $\beta_1 = 0,4$.

При экспериментальном определении степени автотермостабилизации резонатор был помещен в термостат, который задавал изменяю-

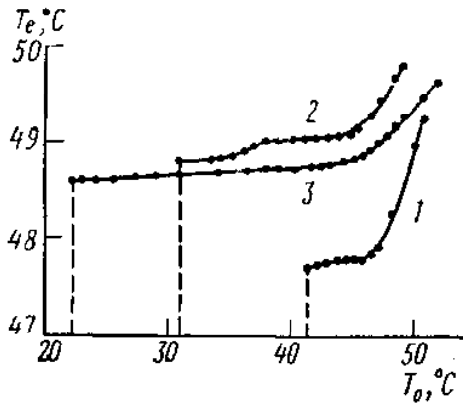


Рис. 3. Зависимость эффективной температуры сегнетоэлектрического нелинейного элемента от окружающей температуры при разных уровнях мощности генератора 300 МГц: 1— $P_0=0,25$; 2— $P_0=0,6$; 3— $P_0=0,85$ вт

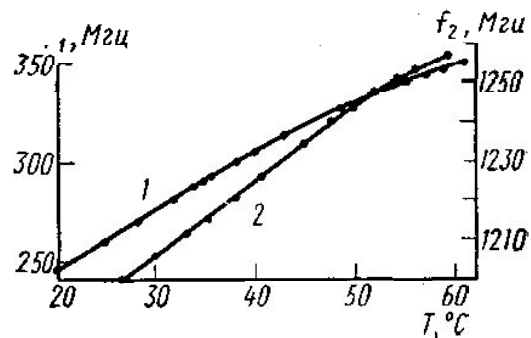


Рис. 4. Зависимость стабилизируемой температуры сегнетоэлектрического нелинейного элемента от частоты генератора СВЧ (1), 2 — термометрическая кривая $T_{эфф} = T_{эфф}(f_2)$

щуюся температуру T_0 . Внешняя температура менялась в широких пределах, и по резонансу на второй частоте, колебания на которой подавались в резонатор одновременно с мощностью на основной частоте, определялась эффективная температура сегнетоэлектрического конденсатора. Зависимость эффективной температуры от внешней температуры T_0 , снятая при разных уровнях мощности генератора основной частоты, изображена на рис. 3. Как следует из рис. 3 и из соотношения (1), степень автотермостабилизации повышается с увеличением мощности на основной частоте P_0 . При мощности $P_0=0,25$ вт степень стабильности температуры сегнетоэлектрического конденсатора составляет $4,7 \cdot 10^{-2}$ от стабильности внешней температуры. При мощности 0,6 вт фактор автотермостабилизации равен $2 \cdot 10^{-2}$, наконец при мощности 0,85 вт достигается величина степени автотермостабилизации, равная $1,1 \cdot 10^{-2}$ от степени стабильности наружной температуры. По формуле (1) при $P_0=0,5$ вт степень автотермостабилизации $S=0,04$.

Поскольку опорной величиной для автотермостабилизации является частота генератора, то при изменении этой частоты меняется и стабилизируемая температура сегнетоэлектрического элемента. Для изученной системы связь между частотой основного типа колебаний и стабилизируемой температурой изображена графически на рис. 4. На этом же рисунке изображена и термометрическая кривая $f_2=f_2(T)$. Диапазон внешней температуры, в пределах которого реализуется эффект автотермостабилизации, зависит от мощности генератора основной частоты и расширяется при увеличении этой мощности. Как следует из рис. 3, при мощности 0,85 вт диапазон внешней температуры составляет 23°C . При

уменьшении внешней температуры от T_{01} (при котором точка стабильного теплового баланса начинает подниматься по правому склону резонансной кривой, точка 1 рис. 1) до T_{04} в системе происходит автотермостабилизация. При дальнейшем уменьшении внешней температуры единственное устойчивое тепловое состояние соответствует большой расстройке относительно резонанса (точка 5), и система скачком выходит из режима автотермостабилизации. Если повышать наружную температуру, то вхождение системы в режим автотермостабилизации произойдет скачком при температуре T_{02} . Скачки и гистерезис, описанные выше, наблюдались экспериментально. Скачкообразное вхождение и выход из режима автотермостабилизации возможны не только при изменении наружной температуры, но и при изменении уровня мощности генератора основной частоты, а также при перестройке этой частоты. И тот и другой методы установления стабильной температуры наблюдались экспериментально.

Авторы выражают благодарность В. П. Гуськову за помощь в эксперименте.

ЛИТЕРАТУРА

1. Иванов И. В. «Радиотехника и электроника», 13, 7, 1291, 1968.
2. Malek Z., Mastner J., Hrdlickh J. J. Janta: Solid State Electronics, 7, 655, 1964.

Поступила в редакцию
19.6 1970 г.

Кафедра
физики колебаний