

Вестник МОСКОВСКОГО УНИВЕРСИТЕТА

№ 5 — 1972

УДК 621.372.412.072.6—52

И. В. ИВАНОВ, Т. Г. СЕМЕНОВА

К ТЕОРИИ ЭФФЕКТА РЕЗОНАНСНОЙ АВТОТЕРМОСТАБИЛИЗАЦИИ В СЕГНЕТОЭЛЕКТРИЧЕСКИХ КОЛЕБАТЕЛЬНЫХ СИСТЕМАХ

Рассмотрено влияние медленных уходов мощности и частоты генератора, а также изменений условий теплообмена на стабилизируемую температуру сегнетоэлектрика. Показано, что за счет резонансных свойств рассмотренных сегнетоэлектрических систем изменения мощности генератора и условий теплообмена мало влияют на стабилизируемую температуру.

В работах [1, 2, 3] показано, что благодаря резонансному характеру автотермостабилизации в сегнетоэлектрических автотермостабилизирующихся колебательных системах может быть достигнута весьма высокая степень стабильности температуры. В данной статье рассмотрено влияние медленных флуктуаций мощности и частоты задающего генератора, а также влияния изменений условий теплообмена на стабилизируемую температуру.

В стационарных условиях температура сегнетоэлектрического элемента (сегнетоэлектрического конденсатора, сегнетоэлектрического резонатора СВЧ и др.), включенного в состав колебательной системы и подогреваемого до заданного уровня теплом диэлектрических потерь, определяется очевидным соотношением:

$$P_{\text{дп}} = k(T_e - T_0), \quad (1)$$

где T_e — эффективная температура сегнетоэлектрического элемента, T_0 — температура окружающей среды, k_0 — коэффициент теплоотдачи сегнетоэлектрического элемента, а $P_{\text{дп}}$ — мощность диэлектрических потерь в элементе. Как показано в [1], мощность диэлектрических потерь определяется мощностью генератора P_0 , коэффициентом связи колебательной системы с генератором β и расстройкой системы относительно генератора ξ :

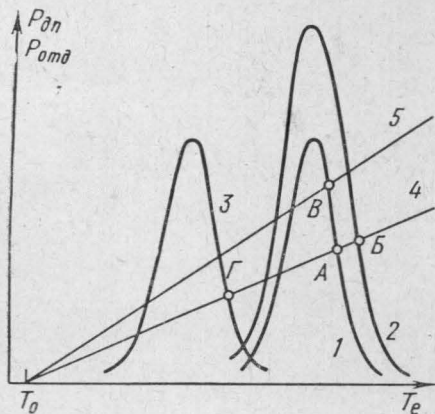
$$P_{\text{дп}} = \frac{4\beta P_0}{(1 + \beta)^2 + \xi^2}, \quad (2)$$

где

$$\xi \approx 2Q_0 \frac{p - \omega}{\omega},$$

Q_0 — собственная добротность колебательной системы, p — частота генератора, а ω — собственная частота системы.

Как следует из (1) и (2), стабилизируемая температура сегнетоэлектрического элемента изменяется, если меняется мощность, частота генератора, а также коэффициент теплоотдачи системы. При постоянстве всех этих величин температура элемента стабилизируется и, как показано в [1, 2, 3], меняется на два-три порядка величины меньше, чем температура окружающей среды T_0 .



Искомые уходы стабилизируемой температуры при медленных флуктуациях мощности, частоты генератора, а также условий теплообмена иллюстрируются рисунком. На этом рисунке изображены три кривые температурной зависимости мощности диэлектрических потерь $P_{дп}$ и две прямые температурной зависимости мощности теплоотдачи $P_{отд} = k(T_e - T_0)$. Пусть в исходном состоянии мощность диэлектрических потерь изображается

кривой 1, а мощность теплоотдачи — прямой 4. Точка А их пересечения — это стабильная рабочая точка системы, соответствующая устойчивому тепловому равновесию. При изменении (увеличении) мощности генератора мощность диэлектрических потерь будет изображаться кривой 2 и стационарная температура сегнетоэлектрического элемента будет соответствовать точке Б. Изменение эффективной стационарной температуры элемента произошло как за счет непосредственной пропорциональности мощности генератора P_0 , так и за счет зависимости расстройки ξ от мощности генератора:

$$\xi(T_e) = \xi[P_e(P_0)].$$

При изменении условий теплообмена (коэффициента теплоотдачи сегнетоэлектрического элемента) эффективная температура элемента будет соответствовать точке В на рисунке. Наконец, при изменении частоты генератора, питающего систему, мощность диэлектрических потерь будет определяться кривой 3 и стационарная температура элемента будет соответствовать точке Г.

Рассчитаем в первом приближении изменение эффективной температуры сегнетоэлектрического элемента при уходе мощности генератора P_0 на величину ΔP_0 . В новых условиях:

$$P_{дп}(P_0 + \Delta P_0) = P_{дп}(P_0) + \Delta P_{дп} = \frac{4\beta(P_0 + \Delta P_0)}{(1 + \beta)^2 + (\xi + \Delta\xi)^2}. \quad (3)$$

Будем считать, что исходное состояние соответствовало оптимальной расстройке (максимальной крутизне) на правом склоне резонансной кривой. При этом

$$\xi < 0 \text{ и } |\xi| = \frac{1 + \beta}{\sqrt{3}}. \quad (4)$$

Считая $\Delta P_0/P_0$ и $\Delta\xi/\xi$ существенно меньшими единицы, получаем после очевидных преобразований:

$$\Delta P_{\text{дп}} = P_{\text{дп}} \cdot \left(\frac{\Delta P_0}{P_0} - \frac{\Delta \xi}{\xi} \right). \quad (5)$$

Далее, с учетом (4) получаем:

$$\frac{\Delta \xi}{\xi} \sim \frac{2\sqrt{3}Q_0}{1+\beta} \cdot \frac{\Delta \omega}{\omega}.$$

Собственные частоты всех сегнетоэлектрических колебательных систем подчиняются соотношению $\omega = \frac{a}{\sqrt{\varepsilon}}$, где коэффициент a зависит от вида колебательной системы.

Будем считать, что сегнетоэлектрик находится в параэлектрической фазе (при температуре выше точки Кюри). Тогда диэлектрическая проницаемость подчиняется закону Кюри — Вейсса:

$$\varepsilon = \frac{C}{T_e - T_k}, \quad (6)$$

где C — константа Кюри, T_k — температура Кюри — Вейсса, а относительная расстройка равна

$$\frac{\Delta \xi}{\xi} = \frac{\sqrt{3} \cdot Q_0}{1+\beta} \cdot \frac{\Delta T_e}{T_e - T_k}. \quad (7)$$

Окончательно, с учетом (1), (5), (6) и (7) получаем

$$\Delta T_e = (T_e - T_k) \frac{1+\beta}{\sqrt{3}Q_0} \cdot \frac{\Delta P_0}{P_0} = \frac{1+\beta}{\sqrt{3}Q_0} \cdot \frac{1}{\left| \frac{1}{\varepsilon} \frac{d\varepsilon}{dT} \right|} \cdot \frac{\Delta P_0}{P}. \quad (8)$$

Аналогичные выкладки приводят к следующим соотношениям, дающим изменения стационарной стабилизируемой температуры сегнетоэлектрического элемента, связанные с уходом частоты генератора и изменением условий теплообмена элемента с окружающей средой:

$$\Delta T_e = 2(T_e - T_k) \frac{\Delta p}{p} = \frac{2}{\left| \frac{1}{\varepsilon} \frac{d\varepsilon}{dT} \right|} \cdot \frac{\Delta p}{p} \quad (9)$$

и

$$\Delta T_e = -(T_e - T_k) \frac{1+\beta}{2\sqrt{3}Q_0} \cdot \frac{\Delta k_0}{k_0} = -\frac{1+\beta}{\sqrt{3}Q_0} \cdot \frac{1}{\left| \frac{1}{\varepsilon} \frac{d\varepsilon}{dT} \right|} \cdot \frac{\Delta k_0}{k_0}. \quad (10)$$

Представляет интерес сравнить чувствительность к изменению рассмотренных параметров систем с резонансной автотермостабилизацией и нерезонансных автотермостабилизирующихся систем (ТАНДЭЛ [4], позисторы [5]). Мощность потерь, нагревающая ТАНДЭЛ и позистор, определяется следующими соотношениями:

$$P_{\text{п}} = A\varepsilon''(T_e)\omega E^2;$$

$$P_{\text{п}} = \frac{U^2}{R(T_e)},$$

где A — коэффициент, пропорциональный объему ТАНДЭЛа, E — напряженность электрического поля в его объеме, $\varepsilon'' = \varepsilon \tan \delta$; U — напряжение на позисторе, $R(T_e)$ — его зависящее от температуры со-

противление. Очевидные выкладки приводят к следующему соотношению, определяющему чувствительность ТАНДЭЛа и позистора к изменению мощности генератора и к изменению условий теплообмена:

$$\Delta T_e = \frac{1}{|\alpha|} \cdot \frac{\Delta x}{x}; \quad (11)$$

$$\alpha = \frac{1}{\varepsilon''} \frac{d\varepsilon''}{dT} \text{ для ТАНДЭЛа; } \alpha = \frac{1}{R} \cdot \frac{dR}{dT} \text{ для позистора, а } x = \frac{\Delta E^2}{E^2}, \text{ или } \frac{\Delta U^2}{U^2}, \text{ или } x = - \frac{\Delta k_0}{k_0}.$$

Сравнение (11) с (8) и (10) показывает существенное преимущество систем с резонансной автотермостабилизацией. При одинаковых значениях температурных коэффициентов термочувствительных параметров, чувствительность к изменению мощности генератора и к изменению коэффициента теплоотдачи сегнетоэлектрических систем с резонансной автотермостабилизацией уменьшена в Q_0 раз (отношение $\frac{1+\beta}{\sqrt{3}} \simeq 1$).

Что касается чувствительности стабилизируемой температуры к изменению частоты генератора, то она практически отсутствует у ТАНДЭЛов и позисторов, а у сегнетоэлектрических резонансных систем относительно велика. Это, с одной стороны, требует достаточно высокой долговременной стабильности частоты генераторов, но, с другой стороны, может считаться положительным качеством систем с резонансной автотермостабилизацией. Высокая чувствительность к изменению частоты генератора позволяет менять стабилизируемую температуру простой перестройкой генератора. Паразитные же уходы частоты генератора за длительное время его работы должны быть тем меньше, чем более высокая стабильность температуры требуется в том или ином случае. Так, при работе выше точки Кюри на 25°C долговременной стабильности обычных генераторов (10^{-4}) соответствует абсолютная стабильность температуры сегнетоэлектрического элемента порядка $5 \cdot 10^{-3}^\circ\text{C}$. При необходимости получить более высокую стабильность температуры следует применять специальные меры по долговременной стабилизации частоты генератора.

ЛИТЕРАТУРА

1. Иванов И. В. «Радиотехника и электроника», 13, 1291, 1968.
2. Иванов И. В., Семенова Т. Г. «Радиотехника и электроника», 15, 2618, 1970.
3. Иванов И. В., Карягин С. Н., Саленова Т. Г. «Вестн. Моск. ун-та, физ., астрон.», 8, 1971.
4. Málek Z., Mastner J., Hrdleka J., Janta J. Sol st. El., 7, 655, 1964.
5. Шишков А. Д., Стречень В. Н., Шефтель И. Т. «Приборы и системы управления», 10, 25, 1970.

Поступила в редакцию
8.5.1971 г.

Кафедра
радиотехники