

k	0,2	0,5	0,8	1	2	3	4	5
M	16	10	9,16	8,9	8,44	8,28	8,2	8,17
ΔM	-7,1	-1,1	-0,26	0	0,46	0,62	0,7	0,73
m , дБ	24,1	20	19,2	19	18,5	18,4	18,3	18,2
Δm , дБ	+5,1	+1,0	+0,2	0	-0,5	-0,6	-0,7	-0,8

ЛИТЕРАТУРА

1. А. Г. Розин. Настройка и проверка приборов автоматического контроля неравномерности частотных характеристик телефонов.— Измерительная техника, 1969, № 12.
2. А. Г. Розин. Устройство для настройки приборов автоматического контроля неравномерности частотных характеристик ЭАП. Авторское свидетельство № 266947.— ОИПОТЗ, 1970, № 12.

*Поступило в редакцию
2 февраля 1971 г.,
окончательный вариант —
2 июня 1971 г.*

УДК 536.51

**Я. В. БОРИС, Б. В. КРИШТАЛЬ, О. А. КЮЗДЕНИ,
С. А. ПАНЧУК, С. И. ЯКОВЕНКО**
(Львов)

МЕТРОЛОГИЧЕСКИЕ ОСОБЕННОСТИ КВАРЦЕВЫХ ТЕРМОМЕТРОВ С РАЗБРОСОМ ПО ТКЧ

Применение кварцевых резонаторов с большим температурным коэффициентом частоты в качестве датчиков температуры позволяет повысить на порядок точность измерения температуры (до $\pm 0,01^\circ\text{C}$ в диапазоне от -200 до $+400^\circ\text{C}$) и разрешающую способность (до 10^{-6}°C).

Однако применение таких термометров ограничено технологическими возможностями при их изготовлении. В настоящей статье рассматриваются вопросы упрощения изготовления кварцевых термометров с сохранением их высоких метрологических показателей.

Как известно [1, 2], зависимость частоты кварцевого термометра от измеряемой температуры выражается соотношением

$$F_p(T_{\text{пр}}) = F_p(0) [1 + AT_{\text{пр}} + BT_{\text{пр}}^2 + CT_{\text{пр}}^3], \quad (1)$$

A, B, C — коэффициенты, соответствующие трем видам колебаний кварцевого датчика температуры по толщине.

Свойства кварца зависят от ориентации элемента относительно его кристаллографических осей, и линейная зависимость частоты от температуры обеспечивается при срезе LC с углами $\psi\omega l/\Phi/\Theta$, где $\Phi=11,166^\circ$, $\Theta=9,393^\circ$ и (1) можно заменить тождественным уравнением:

$$F_p(T_{\text{пр}}) = F_p(0) + \text{ТКЧ}(T_{\text{пр}} - T_0). \quad (2)$$

Здесь $F_p(0)$ — частота выходного сигнала кварцевого термометра при температуре, принятой за начальную, Гц; $F_p - T$ частота кварцевого термометра, Гц; ТКЧ — температурный коэффициент частоты, 1°C ; T_p — температура преобразования $^\circ\text{C}$; T_0 — начальная температура, $^\circ\text{C}$. Произведение

$$\text{ТКЧ } F_p = S \quad (3)$$

представляет собой крутизну преобразования в Гц/ $^\circ\text{C}$ и является одним из главных и определяющих параметров кварцевого термометра.

Однако одним из самых сложных вопросов технологии изготовления кварцевых термометров является обеспечение точности угла среза кристалла. Так, например, для обеспечения точности измерения температуры до $\pm 0,01^\circ\text{C}$ при крутизне преобразования $S = 1000$ Гц/ $^\circ\text{C}$ допустимое отклонение S не должно выходить за пределы ± 10 Гц/ $^\circ\text{C}$ от номинала, а допустимое отклонение ТКЧ при этом $\pm 0,1 \cdot 10^{-5} 1/^\circ\text{C}$.

Для обеспечения повторяемости ТКЧ с таким отклонением для измерения температуры с упомянутой выше точностью необходимо производить срез кристалла кварца с погрешностью, не превышающей секунд угла.

Современное оборудование позволяет ориентировать угол среза с погрешностью $\pm 30''$; в связи с этим неизбежен брак из-за разброса ТКЧ, обусловленного неточностью угла среза кварцевого резонатора.

Предлагается вместо обеспечения повторяемости датчиков по ТКЧ, обусловленных высокой точностью ориентации среза кристалла, добиться постоянства крутизны преобразования S .

После распилки кварцевых элементов экспериментально определяют значение ТКЧ. Для получения заданной крутизны преобразования производят подгонку собственной частоты кварцевого термометра до значения, определяемого из выражения (3),

$$F_p = \frac{S}{\text{ТКЧ}}$$

Подгонка частоты кварцевого термометра легко осуществима и может проводиться любым известным методом, применяемым при изготовлении кварцевых резонаторов.

Применение «плавающего» значения величины частоты кварцевого термометра приемлемо в случае выделения разностной частоты при биениях опорного генератора с генератором, содержащим кварцевый резонатор-датчик температуры. В настоящее время в основном и применяется метод двух генераторов, позволяющий получить на выходе частоту, пропорциональную температуре, которая легко измеряется серийными частотомерами. Подгонка частоты кварцевого термометра до значения, при котором обеспечивается постоянство крутизны преобразования, позволяет уменьшить требование к точности угловой ориентации среза кристаллов, использовать обычную технологию изготовления кварцевых резонаторов, что позволяет повысить точность измерения температуры и дает значительный экономический эффект в серийном производстве кварцевых термометров, уменьшая брак из-за разброса ТКЧ.

Этот способ применим при отклонении угловой ориентации кристалла до $50''$ в узком диапазоне температур, где крутизну преобразования можно обеспечивать постоянной без ухудшения метрологических характеристик кварцевых термометров.

Авторами исследовались кварцевые термометры, изготовленные по описанной выше методике, для диапазона температур от -80 до $+100^\circ\text{C}$. При этом получили точность измерения разности температур до $\pm 0,03^\circ\text{C}$. С целью уменьшения инерционности кварцевых термометров баллон был наполнен гелием, обладающим хорошей теплопроводностью. Инерционность таких датчиков на порядок меньше, чем у вакуумированных. В изготовленных кварцевых термометрах частотой 5 МГц тепловая инерционность составляла 3—5 с. Кварцевые термометры могут применяться в диапазоне температур от -260 до $+400^\circ\text{C}$.

ЛИТЕРАТУРА

1. D. Hammond, G. Adams, P. Schmidt. A Linear, Quartz-Crystal, Temperature-Sensing Element.— ISA Transactions, 1965, October.
2. А. Г. Смагин, Б. Г. Мильштейн, К. В. Сорокин, Л. Н. Чувилькина. Кварцевые резонаторы как высокоточные температурные датчики.— Электронная техника серия IX Радиокomпоненты, 1968, вып. 5.

Поступило в редакцию
24 марта 1971 г.