

УДК 536.51.083

С. В. Леньков, доктор технических наук, Физико-технический институт УрО РАН, Ижевск  
 А. Н. Зверев, аспирант, Физико-технический институт УрО РАН, Ижевск

## ОПТИМИЗАЦИЯ ПАРАМЕТРОВ ПЕРВИЧНОГО ЧАСТОТНОГО ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЯ ДЛЯ ПРЕЦИЗИОННОГО ИЗМЕРЕНИЯ ТЕМПЕРАТУРЫ

*Работа посвящена изучению влияния изменения параметров первичного частотного преобразователя на выходной сигнал в условиях воздействия на него температурного поля с целью оптимизации условий его использования.*

**Ключевые слова:** оптимизация, частотный преобразователь, измерение температуры.

В работе исследуются частотные датчики температуры, построенные на пьезорезонаторах камертонного типа, возбуждающиеся автогенераторами на частоте последовательного резонанса с ограничением мощности возбуждения. Этот выбор обусловлен тем, что последовательный резонанс слабо зависит от емкости подводящих проводов. Данное свойство позволяет нам уменьшить влияние промышленных помех, наводимых на подводящих к преобразователю проводах, что, в свою очередь, позволяет вынести преобразователь относительно генератора на значительное расстояние.

Рассмотрим чувствительный элемент прецизионного преобразователя. В качестве чувствительного элемента преобразователя использован камертонный кварцевый термочувствительный высокотемпературный резонатор типа РКТВ206, работающий в диапазоне частот 32–36 кГц. Для исследования и компьютерного моделирования устойчивой работы преобразователя использована эквивалентная электрическая схема замещения кварцевого резонатора (рис. 1), где  $C$  – проходная емкость;  $C_{ш}$  – шунтирующая емкость (определяется электродами резонатора и емкостью подводящих проводов);  $R$  – активная составляющая импеданса;  $L$  – эквивалентная индуктивность. Для определения пределов его устойчивой работы (устойчивого возбуждения), проведена вариация номиналов компонентов схемы замещения датчика в их поле допуска.

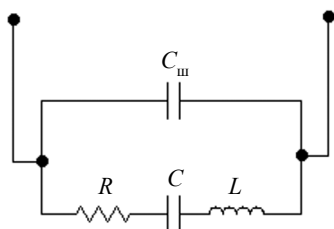


Рис. 1. Эквивалентная электрическая схема замещения кварцевого пьезорезонатора РКТВ-206

Сначала были исследованы частотные характеристики схемы замещения пьезорезонансного преобразователя путем компьютерного моделирования. При подстановке в модель паспортных номиналов элементов схемы получаем частотную характеристику, которая адекватно соответствует представленным в паспорте значениям с точностью попадания в диапазон резонансных частот 32–36 кГц [1].

Рассмотрим термочувствительный резонатор в условиях приложенного к нему температурного поля, его внутренние элементы находятся при одной температуре и с ее изменением меняют значения номиналов по определенному закону. Зависимость изменения внутренних параметров  $L$  и  $C$  резонатора от температуры заранее не известна, поэтому предположим закон изменения их номиналов от температуры линейным:

$$L(T) = L_0 + k_L T; \quad C(T) = C_0 + k_C T, \quad (1)$$

где  $L(T)$ ,  $C(T)$  – зависимости индуктивности и емкости резонатора от температуры;  $L_0 = 2,4$  Гн,  $C_0 = 9,8$  пФ – значения индуктивности и емкости при опорном значении температуры  $T = 0$  °С;  $T$  – температура;  $k_L = 0,00103$ ,  $k_C = -0,00001 \cdot 10^{-12}$  – коэффициенты, полученные методом наименьших квадратов.

Зависимость резонансной частоты от температуры для последовательного резонанса согласно схеме замещения (рис. 1) имеет вид

$$f_R(T) = \frac{1}{2\pi\sqrt{C(T)L(T)}}. \quad (2)$$

За идеальную характеристику возьмем полином, предоставленный заводом-изготовителем, который описывает зависимость частоты преобразователя от температуры в диапазоне от –50 до 270 °С

$$f_Z(T) = f_0 + A_1(T - T_0) + A_2(T - T_0)^2, \quad (3)$$

где  $f_z(T)$  – частота резонатора при текущем значении температуры  $T$ , °C;  $f_0$  – частота резонатора при опорном значении температуры  $T$ , °C;  $T_0$  – опорное значение температуры;  $A_1 = -1,76$ ;  $A_2 = -0,0031$ .

Разложим (2) в ряд Тейлора в окрестностях нуля, так как опорное значение температуры составляет 0 °C, и построим зависимости  $f_R(T)$  и  $f_Z(T)$ :

$$F_R(T) = \frac{f_0\sqrt{2}}{2} - \frac{f_0\sqrt{2}}{8} \frac{C_0k_L + L_0k_C}{L_0C_0} T + \frac{f_0 \cdot 3\sqrt{2}}{64} \frac{(C_0k_L + L_0k_C)^2}{L_0^2C_0^2} T^2. \quad (4)$$

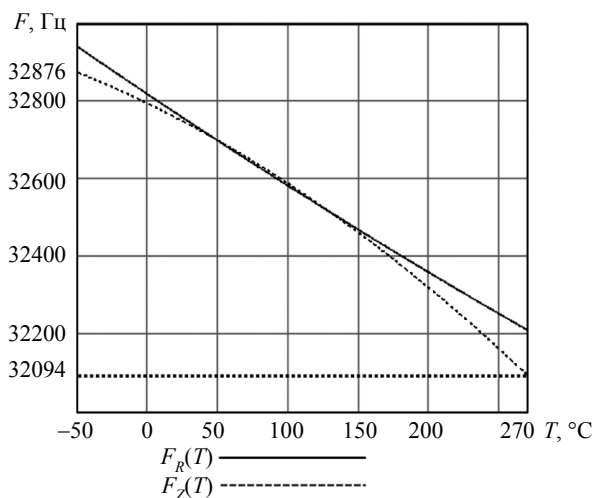


Рис. 2. Характер изменения частоты резонатора от температуры (функции  $L(T)$ ,  $C(T)$  – линейные)

Из рис. 2 видим, что выбранный нами закон недостаточно точно описывает функцию, полученную по заводскому полиному, но характер изменения с точностью до знака ей соответствует. Дальнейшее увеличение степени полиномов, описывающих зависимость, лишь подтверждает характер взаимодействия элементов эквивалентной схемы (рис. 3).

Предположим закон изменения номинала индуктивности от температуры для  $L(T)$  в виде квадратичной функции

$$L(T) = L_0 + k_L T + k_{L1} T^2. \quad (5)$$

Раскладывая (2) в ряд Тейлора с учетом изменения степени функции  $L(T)$ , получим:

$$F_R(T) = f_0 - \frac{f_0}{2} \frac{C_0k_L + L_0k_C}{L_0C_0} T + f_0 \left[ \frac{-1(C_0k_{L1} + k_Ck_L)}{2L_0C_0} + \frac{3(C_0k_L + L_0k_C)^2}{8L_0^2C_0^2} \right] T^2, \quad (6)$$

коэффициенты равны, соответственно,  $k_L = 0,0005$ ,  $k_{L1} = 0,526 \cdot 10^{-6}$ ,  $k_C = -0,00101 \cdot 10^{-12}$ .

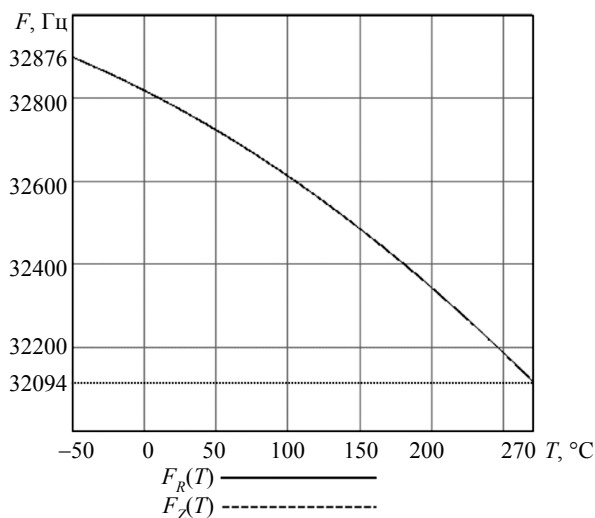


Рис. 3. Характер изменения частоты резонатора от температуры (функция  $C(T)$  – линейная,  $L(T)$  – квадратичная)

Также необходимо отметить, что коэффициент  $k_C$  для  $C$  схемы замещения принимает отрицательное значение. Исходя из этого можно сделать вывод, что при увеличении температуры емкость  $C$  схемы замещения уменьшается, а индуктивность  $L$  увеличивается.

Подставив крайние значения рабочих температур резонатора, мы получили диапазон значений  $L$  и  $C$ . После их подстановки в эквивалентную модель схемы резонатора (рис. 4) мы видим зависимость изменения частоты резонанса от температуры резонатора с учетом степени их индивидуального влияния.

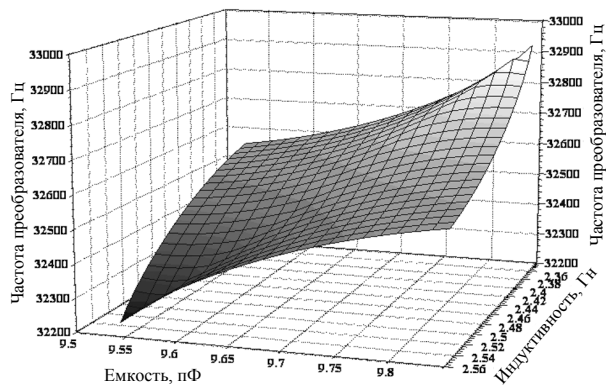


Рис. 4. Изменение частоты при вариации значений номиналов элементов схемы замещения

Для компьютерного моделирования влияния внешних элементов схемы на устойчивость работы необходимо эквивалентную схему кварцевого резонатора включить в электрическую цепь преобразователя (генератора) и добиться устойчивого захвата частоты генератора резонатором.

Для моделирования работы автогенератора использована схема замещения реального ОУ [2] (МСР601) и принципиальная электрическая схема генератора (рис. 5).

Резисторы R3 и R4 схемы делят напряжение питания пополам и задают начальное смещение и уровень напряжения срабатывания компаратора AD1 (MCP601). Резистор R5 и конденсатор C2 определяют постоянную времени цепи R5C2, в цепи отрицательной обратной связи компаратора AD1, которая должна быть установлена несколько больше времени периода колебаний кварцевого резонатора. Это значит, что 50 % времени на выходе компаратора будет поддерживаться высокий уровень напряжения, и столько же – низкий уровень. Резистор R6 и делитель на резисторах R7, R8 задают управляемую ве-

личину мощности возбуждения, рассеиваемую на преобразователе. Для стабильного возбуждения кварцевого резонатора на частоте нулевой моды колебаний (последовательной резонанс) компаратор AD1 имеет ограниченную скорость нарастания выходного напряжения, что ограничивает спектр частот возбуждения резонатора нулевой модой колебаний. В результате кварцевый резонатор возбуждается практически синусоидальным сигналом. С выхода OUT1 генератора сигнал поступает на триггер Шмита, который формирует крутые фронты выходных прямоугольных импульсов.

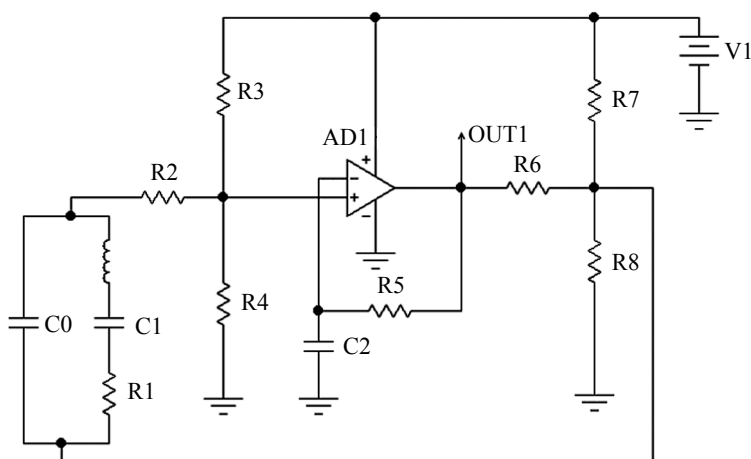


Рис. 5. Электрическая схема преобразователя с включенной в него эквивалентной схемой кварцевого пьезорезонатора

Для согласования линии связи с термочувствительным датчиком и исключения влияния тепловой мощности каждый пьезорезонатор соединяют с автогенератором посредством витой пары или коаксиальной линии [3].

В процессе моделирования отклонение значений номиналов элементов схемы датчика изменялись в диапазонах от  $\pm 20$  до  $\pm 2$  %. При моделировании максимально допустимое значение отклонения рассогласования делителей составило  $\pm 2$  % на элемент. Отклонение номинала резистора R6, задающего ограничение по мощности, также не должно превышать  $\pm 2$  %. Резистор R5 может иметь допуск  $\pm 5$  %. Емкость C2 должна иметь максимальное отклонение, не превышающее  $\pm 1$  %. В итоге устойчивый захват частоты генератора резонатором наблюдался лишь при указанных выше отклонениях.

По результатам исследований была оптимизирована схема преобразователя при минимальной мощности возбуждения подаваемого на пьезорезонатор.

Определены условия устойчивого возбуждения и захвата частоты генератора во всем рабочем диапазоне температур. Определены максимальные допуски отклонений номиналов схемы генератора, в которую включен первичный преобразователь. Установлены условия правильного применения частотного преобразователя для обеспечения условий прецизионного измерения температуры.

#### Список литературы

1. Резонатор кварцевый термочувствительный высокотемпературный РКТВ206 (ТУ307-182.003-96). – URL: [www.sktbelpa.yaroslavl.ru](http://www.sktbelpa.yaroslavl.ru)
2. Рутковски Дж. Интегральные операционные усилители : справочное руководство ; пер. с англ. – М. : Мир, 1978.
3. Способ прецизионного измерения температуры, распределенная система для его реализации и устройство согласования измерительных датчиков : Заявка на выдачу патента : рег. № 2008133786/28(042555) от 15.08.2008 / А. В. Донской, А. Л. Данилов, К. Н. Леонов, А. В. Кадров, Н. Н. Зверев. – 15 с.

S. V. Lenkov, Doctor of Technical Sciences, Physicotechnical Institute of Udmurt Center of UB RAS, Izhevsk  
A. N. Zverev, Postgraduate Student, Physicotechnical, Izhevsk

#### Parameter Optimization of Primary Frequency Converter for Precision Temperature Measurement

The aim of this work is to study the influence of an external temperature field on the output signal of a converter in order to optimize its conditions of use.

**Key words:** optimization, frequency converter, temperature measurement.