

При измерениях коэффициента преобразования ППТН-02 на одном из диапазонов преобразователя определялась погрешность встроенного вольтметра. Для этого при помощи внешнего вольтметра (В7-34А) измерялось напряжение на выходе ППТН-02 ( $U_1$ ) и сравнивалось с напряжением на табло ППТН-02 ( $U_B$ ). Погрешность вольтметра ППТН-02 ( $\delta_U$ ) определялась по формуле

$$\delta_U = \left(1 - \frac{U_1}{U_B}\right) \times 100\%. \quad (5)$$

Основная относительная погрешность измерений  $\delta_k$  определялась по формуле [3, с. 89—91; 4]

$$\delta_k = 1,1 \cdot \sqrt{\delta^2 + \delta_t^2 + \delta_n^2 + \delta_U^2}. \quad (6)$$

\*\*\*

По результатам, приведенным в таблице, можно сделать вывод, что преобразователь ППТН-02 имеет на порядок меньше минимальный входной ток, он меньше, легче и потребляет меньшую мощность.

#### ИСПОЛЬЗОВАННЫЕ ИСТОЧНИКИ

1. ГОСТ 17772—88. Методы измерения фотоэлектрических параметров и определения характеристик.
2. Бутенко В. К., Годованюк В. М., Докторович И. В. Прецизионный перетворювач струм—напруга // Науковий вісник ЧНУ.— Чернівці: 2001.— Вип. 102: Фізика. Електроніка.— С. 84—85.
3. Кассандрова О. Н., Лебедев В. В. Обработка результатов наблюдения.— М.: Наука, 1970.
4. ГОСТ 8.207—76. Прямые измерения с многократными наблюдениями. Методы обработки результатов наблюдений. Основные положения.

Д. ф.-м. н. О. О. ДРОБАХИН, П. И. ЗАБОЛОТНЫЙ

Украина, г. Днепропетровск, Институт технической механики  
E-mail: drobakhino@mail.ru, mwave@ukr.net

Дата поступления в редакцию  
08.07 2007 г.

Оппонент к. т. н. Н. Ф. КАРУШКИН (НИИ  
«Орион», г. Киев)

## КОМПЕНСАЦИЯ ТЕМПЕРАТУРНОГО УХОДА ЧАСТОТЫ В РЕЗОНАТОРНЫХ СВЧ-ИЗМЕРИТЕЛЯХ НА ОСНОВЕ ГУН

*Влияние температурных колебаний на погрешность измерений параметров при применении резонаторных СВЧ-измерителей на основе ГУН может быть минимизировано программным образом.*

СВЧ-резонаторы находят применение при построении измерительных схем в составе систем контроля и автоматического управления технологическими процессами производства [1]. Для датчиков, построенных на основе СВЧ-резонаторов, параметрами, несущими информацию об изменении контролируемых величин, являются резонансная частота и добротность СВЧ-резонаторов. Изменение любого из этих параметров под влиянием возмущающего воздействия внешнего контролируемого фактора может быть использовано при построении первичных преобразователей (ПП). Для определения изменения резонансной частоты целесообразно использование генераторов, частота которых управляется напряжением специальной формы (ГУН). Периодическое повторение изменения во времени частоты генератора позволяет получить зависимость изменения резонансной частоты и добротности ПП во времени и тем самым отследить изменение интересующего параметра.

В [2] предложена методика контроля параметров, которая базируется на измерении временных интервалов между резонансными откликами —  $\gamma_n$  (рис. 1), появляющимися при перестройке частоты СВЧ-генератора управляющим напряжением  $V_{\text{уп}}^{\text{треугольн}}$  треугольной формы, причем один резонанс наблюдается на восходящей ветви (1), а второй — на нисходящей

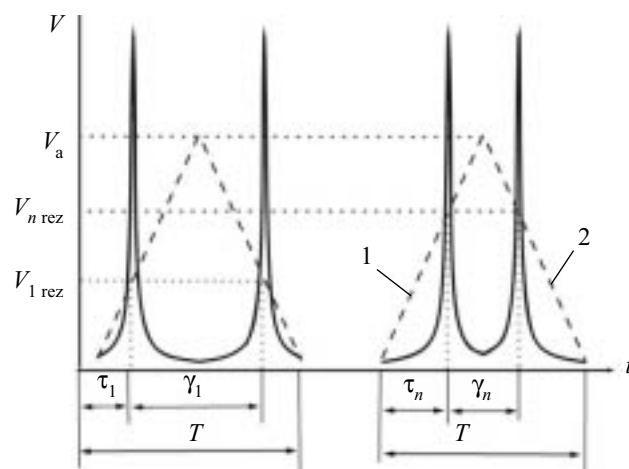


Рис. 1. Сигнал на выходе детекторной секции СВЧ-преобразователя

ветви (2) управляющего напряжения. Поскольку резонансная частота является функцией контролируемых параметров, то и длительность временного интервала между моментами появления резонансных откликов  $\gamma_n$  одного периода перестройки частоты также функционально зависит от контролируемых параметров.

При неизменности контролируемых параметров для всех периодов изменения управляющего напряжения величина временного интервала  $\gamma_n$  остается также неизменной (рис. 1):  $\gamma_1 = \gamma_2 = \dots = \gamma_n = \dots$ . В случае изменения контролируемых параметров происходит изменение собственных резонансных частот объемного резонатора, что, в свою очередь, вызывает соответствующее изменение значения  $\gamma_n$ .

Следует отметить, что в качестве возмущающего воздействия могут выступать не только контролируемые технологические параметры, но и изменяющиеся условия окружающей среды. Особенно это относится к измерительным устройствам, находящимся в непосредственном контакте с объектом контроля. Одним из основных источников погрешности в системах такого класса является изменение температуры.

Температурная стабильность таких измерительных систем определяется температурной стабильностью рабочей частоты генератора (или полосы рабочих частот) и колебательной системы, включающей резонатор, детекторную систему и другие устройства. Обеспечение температурной стабильности каждого из элементов измерительной системы требует различных технических подходов и представляет собой достаточно сложную техническую задачу [3]. В частности, активное термостатирование СВЧ-генератора [4] реализуется достаточно сложными и громоздкими схемами. Вместе с тем рациональная организация процесса измерений позволяет (именно в случае использования ГУН) программно-управляемым способом вносить в результаты измерений поправки к закону изменения частоты (включая выбор знака поправки) с целью обеспечения компенсации влияния температуры на все элементы измерительной схемы. Современная элементная база позволяет осуществить необходимый процесс программно-управляемым способом при наличии даже одного дополнительного канала измерения температуры ПП.

Целью данной работы является исследование влияния температурных изменений на характер перестройки частоты ГУН и исследование возможностей программного метода интегральной термокомпенсации результатов измерений резонаторного СВЧ-измерителя на этапе окончательной обработки данных.

Данная цель может быть достигнута, если будет построена модель, описывающая интегральную температурную чувствительность ПП, а на этапе калибровки и настройки прибора будут определены значения параметров (коэффициентов) модели для каждого конкретного экземпляра изделия. Полученные значения могут быть введены в программный алгоритм, обеспечивающий температурную компенсацию прибора в процессе его эксплуатации.

**П**олучение соответствия между эталонными величинами контролируемых параметров на входе и значением  $\gamma_n$  на выходе ПП (с учетом оговоренной точности) осуществляется его калибровкой. Калибровка выполняется при условии обеспечения стабильного значения температуры ПП. Отклонение температуры ПП от среднего значения  $t_m$ , зафиксированного при калибровке, вызывает дополнительное взаимное смещение резонансных откликов. При этом  $\gamma_1 \neq \gamma_2 \neq \dots \neq \gamma_n \neq \dots$

Величина дополнительного температурного смещения  $\Delta\gamma_n = \gamma_n - \gamma_{n-1}$  является результатом интегрального воздействия температуры на все элементы первичного СВЧ-преобразователя.

Из рис. 1 видно, что длительность временного интервала от момента появления резонанса на восходящей части треугольного напряжения  $V_{n \text{ rez}}$  до момента достижения модулирующим напряжением максимального значения  $V_a$  будет определяться как  $\gamma_n/2 = T/2 - \tau_n$ . Из этого следует, что

$$V_{n \text{ rez}} = V_a(T - \gamma_n)/T, \quad (1)$$

где  $V_{n \text{ rez}}$  — напряжение управления ГУН в точке резонанса;  
 $V_a$  — амплитуда треугольного напряжения.

Используя последнее выражение и учитывая факт, что смещенной (вследствие ухода температуры) точке резонанса соответствует измененное напряжение управления ГУН, можно получить зависимость между величиной изменения напряжения управления и изменением температуры для любого произвольного периода модуляции:

$$V_{\text{rez}}^{\text{calibr}} - V_{\text{rez}}^t = V_a \left( \frac{T - \gamma_{\text{calibr}}}{T} \right) - V_a \left( \frac{T - \gamma_t}{T} \right); \quad (2)$$

$$\Delta\gamma = \gamma_t - \gamma_{\text{calibr}} = \Delta V_{\text{rez}} T / V_a, \quad (3)$$

где  $V_{\text{rez}}^{\text{calibr}}$  — напряжение управления ГУН в точке резонанса при калибровке прибора при эталонной температуре;  
 $V_{\text{rez}}^t$  — напряжение управления ГУН в точке резонанса при температуре  $t$ , отличной от эталонной температуры калибровки;

$\gamma_{\text{calibr}}$  — длительность временного интервала между точками резонанса на одном периоде  $T$  управляющего напряжения, полученная при калибровке;

$\gamma_t$  — длительность временного интервала между точками резонанса на одном периоде  $T$ , соответствующая текущей температуре  $t$ .

Последнее выражение не содержит параметров, зависящих от температуры, и соответственно не позволяет установить связь между  $\Delta\gamma$  и изменением температуры ПП.

Используя метод размерностей физических величин, вводим коэффициенты —  $k_\nu$ ,  $k_t$ , характеризующие чувствительность частоты ПП к перестройке управляющего напряжения  $V_{\text{tune}}$  и изменению температуры  $t$ , соответственно. Коэффициенты имеют размерность  $[k_\nu] = [\text{МГц/В}]$ ,  $[k_t] = [\text{МГц/}^\circ\text{С}]$ , и их можно определить при исследовании рабочих характеристик первичного СВЧ-преобразователя.

Для получения значений данных коэффициентов достаточно исследовать частотные характеристики ПП в пределах области возможного изменения температуры и частоты (соответственно и напряжения управления  $V_{\text{tune}}$ ) в процессе эксплуатации.

**И**сследования рабочих характеристик первичного СВЧ-преобразователя проводились на испытательном стенде. Блок-схема стенда представлена на рис. 2.

Первичный СВЧ-преобразователь, включающий резонатор 4, ГУН 1, ферритовый вентиль 3 и детекторную секцию 6, был помещен в термокамеру 8 с блоком управления и контроля температуры. Управление напряжением питания и модулирующим напряжением для ГУН осуществлялось с помощью источника напряжения 2. Для контроля температуры ПП использовался термодатчик 5. Определение

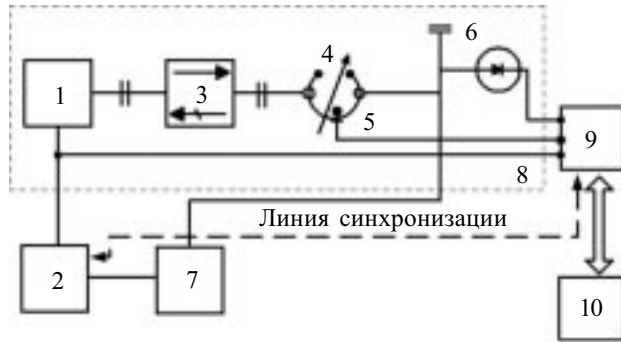


Рис. 2. Блок-схема испытательного стенда:  
1 — ГУН; 2 — источник напряжения; 3 — ферритовый вентиль; 4 — измерительный объемный СВЧ-резонатор; 5 — термодатчик; 6 — детекторная секция; 7 — электронно-счетный СВЧ-частотомер; 8 — термокамера с блоком управления и контроля температуры; 9 — АЦП; 10 — микропроцессорный вычислительный блок

текущих абсолютных значений частоты ГУН при фиксированных значениях  $V_{\text{tune}}$  и температуры выполнялось с помощью электронно-счетного СВЧ-частотомера 7. Вычисление длительности временных интервалов и взаимная синхронизация всех контролируемых сигналов осуществлялась с помощью микропроцессорного вычислительного блока 10 через аналого-цифровой преобразователь (АЦП) 9.

Исследования рабочих характеристик проводились на первичных преобразователях измерителей параметров виброперемещения, изготовленных с применением генераторных блоков на основе микросхем производства WJ Communications, Inc. На рис. 3 представлены зависимости коэффициента частотной чувствительности  $k_V$  от напряжения  $V_{\text{tune}}$  для ПП с полосой перестройки частоты ГУН 680—1200 МГц при различных значениях температуры.

Из представленных графиков видно, что для ПП существует область 2 изменения  $V_{\text{tune}}$ , внутри которой кривые, отражающие зависимость  $k_V(V_{\text{tune}})$  для различных температур, совпадают. Максимальное отклонение  $k_V$  от среднего значения при одинаковых значениях  $V_{\text{tune}}$  и различных температурах внутри этой области не превышает 0,1413 МГц/В (0,66%). Данное отклонение  $k_V$  при контроле виброперемещений соответствует 0,01 мм абсолютной погрешности измерений.

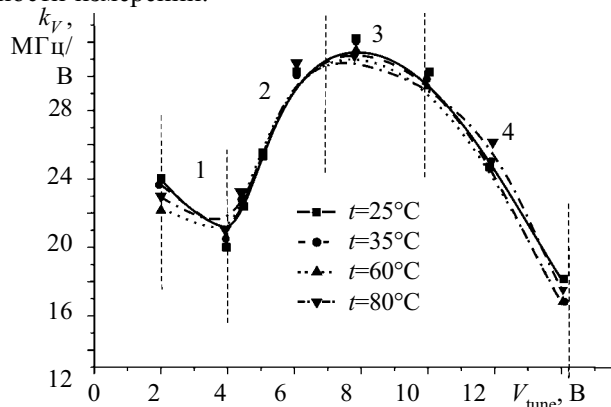


Рис. 3. Зависимость коэффициента  $k_V$  от напряжения управления ГУН при различных значениях температуры

Максимальное отклонение  $k_V$  от средних значений в других диапазонах изменения  $V_{\text{tune}}$  составляло более 3,5%. Данный факт подтверждает и представленная на рис. 4 зависимость коэффициента  $k_V$  от температуры для различных диапазонов изменения  $V_{\text{tune}}$ . В частности, для области 2, соответствующей диапазону изменения  $V_{\text{tune}}=4...6$  В, наблюдается минимальное изменение  $k_V$  при изменении температуры (прямая 2).

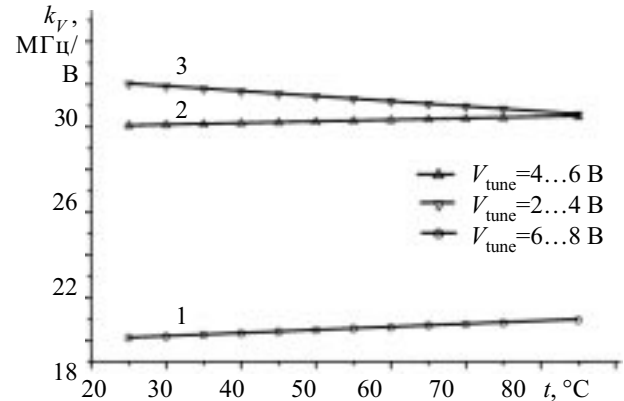


Рис. 4. Зависимость коэффициента  $k_V$  от температуры для различных диапазонов изменения  $V_{\text{tune}}$

Кроме того, из рис. 3 видно, что в пределах области 2 есть участок ( $V_{\text{tune}}=4,2...6,6$  В), на котором зависимость  $k_V(V_{\text{tune}})$  можно аппроксимировать линейной зависимостью вида

$$k_V = a + bV_{\text{tune}}, \quad (4)$$

где  $a, b$  — коэффициенты линейной аппроксимации.

Изменяя геометрические размеры объемного резонатора, можно совместить рабочую область изменения резонансных частот с областью линейного поведения зависимости  $k_V(V_{\text{tune}})$ .

Проведенные нами аналогичные исследования свойств ПП с другими типами ГУН (работающих в других частотных диапазонах) позволяют сделать вывод, что практически всегда путем изменения геометрических размеров резонатора можно найти такие диапазоны изменения  $V_{\text{tune}}$ , внутри которых зависимость  $k_V$  хорошо аппроксимируется прямой линией. В этих случаях для  $\Delta F$  — величины смещения резонансной частоты ПП от изменения напряжения управления  $\Delta V_{\text{tune}}$  — можно записать:

$$\Delta F_V = k_V \cdot \Delta V_{\text{tune}}, \quad (5)$$

где  $\Delta V_{\text{tune}}$  — изменение напряжения управления ГУН внутри области с линейным характером зависимости  $k_V(V_{\text{tune}})$ .

Значения коэффициента частотной чувствительности  $k_V$  были получены в результате исследования уходов частоты ПП при неизменяемых значениях  $V_{\text{tune}}$ . Было установлено, что существует несколько диапазонов изменения  $V_{\text{tune}}$ , внутри которых величина  $k_V$  изменяется незначительно. В частности, среднеквадратичное отклонение значений от среднего значения  $k_V$ , полученных при  $V_{\text{tune}}=2,2$  В и  $V_{\text{tune}}=3,6$  В, не превышало 0,01 МГц/°C (0,17%).

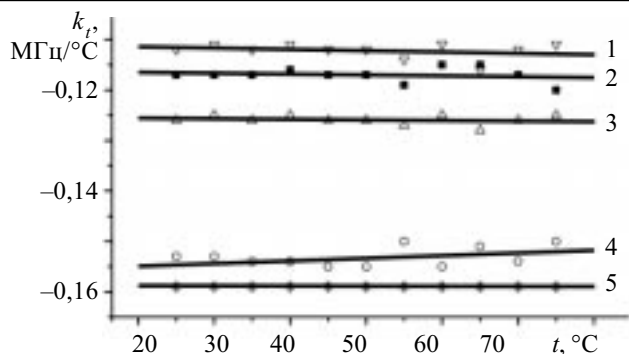


Рис. 5. Зависимость коэффициента температурной чувствительности преобразователя от напряжения управления частотой:

1 —  $V_{\text{tune}}=6,7...8,2$  В; 2 —  $1,8...2$  В; 3 —  $2,4...3,4$  В; 4 —  $4,0...6$  В; 5 —  $V_{\text{tune}}=8,7...10$  В

Полученные результаты представлены на рис. 5. Из графика видно, что зависимость  $k_t$  от температуры внутри определенных диапазонов изменения  $V_{\text{tune}}$  также хорошо аппроксимируется линейной зависимостью. При этом величина наибольшего отклонения от аппроксимирующей прямой, полученной методом наименьших квадратов для различных диапазонов изменения  $V_{\text{tune}}$ , не превышает  $0,011$  МГц/°С ( $0,05\%$ ).

Представленная на рис. 5 зависимость позволяет сделать вывод о том, что и для  $k_t$  путем подбора геометрических размеров резонатора ПП можно найти такие диапазоны изменения  $V_{\text{tune}}$ , внутри которых  $k_t$

будет иметь минимальную чувствительность к изменениям температуры (тангенс угла наклона аппроксимирующих прямых не превышал  $0,00023$ ).

Исходя из этого, смещение частоты резонатора ПП от температуры можно представить в виде следующей зависимости:

$$\Delta F_t = k_t(t - t_m), \quad (6)$$

где  $t$  — текущая температура ПП;

$t_m$  — средняя температура, определяемая при калибровке.

Предполагая неизменность параметров резонатора и свойств контролируемой среды, считаем, что смещение частоты резонанса происходит вследствие изменения температуры, что соответственно позволяет принять эквивалентность  $\Delta V_{\text{rez}}$  и  $\Delta V$ .

Приравнявая выражения (5) и (6), получаем:

$$k_V \cdot \Delta V_{\text{rez}} = k_t(t - t_m); \quad (7)$$

$$\Delta V_{\text{rez}} = k_t(t - t_m) / k_V. \quad (8)$$

Подставляя полученное выражение для  $\Delta V_{\text{rez}}$  в выражение (3), получим значение  $\Delta \gamma$  — величины изменения длительности временного интервала между точками резонанса при отклонении температуры генератора от значения  $t_m$ :

$$\Delta \gamma = (k_t / k_V)(T / V_a)(t - t_m). \quad (9)$$

С использованием выражения (9) были получены значения поправки к длительности временных интервалов между резонансными пиками на восходящей и нисходящей части модулирующего на-

Абсолютные значения продольных перемещений при различных температурах ПП измерителя вибропереме-

| Время, с           | Калиб-<br>ровка | С компенсирующей поправкой    |                      |                               |                      | Без поправки                  |                      |                               |                      |
|--------------------|-----------------|-------------------------------|----------------------|-------------------------------|----------------------|-------------------------------|----------------------|-------------------------------|----------------------|
|                    | $x$ ,<br>мм     | $x(35^\circ\text{C})$ ,<br>мм | $ \Delta x $ ,<br>мм | $x(50^\circ\text{C})$ ,<br>мм | $ \Delta x $ ,<br>мм | $x(35^\circ\text{C})$ ,<br>мм | $ \Delta x $ ,<br>мм | $x(50^\circ\text{C})$ ,<br>мм | $ \Delta x $ ,<br>мм |
| 0                  | -5,50           | -5,53                         | 0,03                 | -5,47                         | 0,03                 | -6,13                         | 0,63                 | -7,68                         | 2,18                 |
| 0,04               | -4,50           | -4,52                         | 0,02                 | -4,49                         | 0,01                 | -4,93                         | 0,43                 | -6,35                         | 1,85                 |
| 0,08               | -3,50           | -3,52                         | 0,02                 | -3,44                         | 0,06                 | -3,86                         | 0,36                 | -5,17                         | 1,67                 |
| 0,1                | -3,00           | -3,02                         | 0,02                 | -3,00                         | 0,00                 | -3,33                         | 0,33                 | -4,58                         | 1,58                 |
| 0,14               | -2,00           | -2,02                         | 0,02                 | -2,00                         | 0,00                 | -2,28                         | 0,28                 | -3,43                         | 1,43                 |
| 0,16               | -1,50           | -1,51                         | 0,01                 | -1,49                         | 0,01                 | -1,80                         | 0,30                 | -2,90                         | 1,40                 |
| 0,2                | -0,50           | -0,51                         | 0,01                 | -0,49                         | 0,01                 | -0,88                         | 0,38                 | -1,90                         | 1,40                 |
| 0,24               | 0,50            | 0,51                          | 0,01                 | 0,50                          | 0,00                 | 0,16                          | 0,34                 | -0,76                         | 1,26                 |
| 0,28               | 1,50            | 1,52                          | 0,02                 | 1,49                          | 0,01                 | 1,17                          | 0,33                 | 0,32                          | 1,18                 |
| 0,3                | 2,00            | 2,02                          | 0,02                 | 2,04                          | 0,04                 | 1,63                          | 0,37                 | 0,81                          | 1,19                 |
| 0,36               | 3,50            | 3,54                          | 0,04                 | 3,51                          | 0,01                 | 3,04                          | 0,46                 | 2,28                          | 1,22                 |
| 0,38               | 4,00            | 4,04                          | 0,04                 | 4,05                          | 0,05                 | 3,52                          | 0,48                 | 2,77                          | 1,23                 |
| 0,4                | 4,50            | 4,52                          | 0,02                 | 4,59                          | 0,09                 | 3,97                          | 0,53                 | 3,22                          | 1,28                 |
| 0,44               | 5,50            | 5,53                          | 0,03                 | 5,56                          | 0,06                 | 4,97                          | 0,53                 | 4,2                           | 1,3                  |
| 0,48               | 6,50            | 6,53                          | 0,03                 | 6,48                          | 0,02                 | 5,98                          | 0,52                 | 5,18                          | 1,32                 |
| 0,5                | 7,00            | 7,04                          | 0,04                 | 6,94                          | 0,06                 | 6,44                          | 0,56                 | 5,62                          | 1,38                 |
| 0,52               | 7,50            | 7,54                          | 0,04                 | 7,44                          | 0,06                 | 6,75                          | 0,75                 | 5,91                          | 1,59                 |
| 0,54               | 8,00            | 8,04                          | 0,04                 | 8,05                          | 0,05                 | 7,13                          | 0,87                 | 6,26                          | 1,74                 |
| 0,56               | 8,50            | 8,54                          | 0,04                 | 8,48                          | 0,02                 | 7,48                          | 1,02                 | 6,59                          | 1,91                 |
| 0,58               | 9,00            | 9,05                          | 0,05                 | 9,05                          | 0,05                 | 7,87                          | 1,13                 | 6,95                          | 2,05                 |
| Среднее отклонение |                 |                               | 0,028                |                               | 0,032                |                               | 0,530                |                               | 1,508                |

пряжения в процессе работы ПП измерителя виброперемещений в условиях с нестабильной температурой. В таблице представлены результаты измерений абсолютных значений продольных перемещений при различных температурах ПП, полученные с учетом температурной компенсирующей поправки и без нее.

Из таблицы видно, что среднее отклонение величины перемещения контролируемого объекта от значения перемещения, полученного при калибровке, для ПП с учетом температурной компенсации не превышает 0,032 мм (0,152%). Для случая без температурной компенсации это отклонение существенно зависит от температуры, и значение его тем больше, чем больше величина отклонения температуры от температуры при калибровке  $t_m$ .

\*\*\*

Таким образом, как показано в работе, влияние температурных колебаний на погрешность измерений параметров первичными преобразователями на

основе объемных резонаторов может быть минимизировано программным образом за счет предложенного специального алгоритма коррекции смещения значения интервала частоты генерации генератора, управляемого напряжением.

#### ИСПОЛЬЗОВАННЫЕ ИСТОЧНИКИ

1. Виктор В. А., Лункин Б. В., Совлуков А. С. Радиоволновые измерения параметров технологических процессов. — М.: Энергоатомиздат, 1989.
2. Пилипенко О. В., Заболотний П. І, Запольский Л. Г. НВЧ-щуп для локальних вимірювачів параметрів вібрацій з низькою частотою // Автоматизація виробничих процесів у машинобудуванні та приладобудуванні. (НУ «Львівська політехніка»). — 2006. — Вип. 40. — С. 177—183.
3. Кривоносов Л. И. Температурная компенсация электронных схем. — М.: Связь, 1977.
4. Кравченко А. В., Плаксин С. В., Соколовский И. И. Активное термостатирование полупроводниковых СВЧ-генераторов // Технология и конструирование в электронной аппаратуре (ТКЭА). — 2005. — № 3. — С. 63—64.

#### НОВЫЕ КНИГИ

##### **Радиоэлектронные системы: основы построения и теория / Под ред. Я. Д. Ширмана. — М.: Радиотехника, 2007. — 512 с.**

Рассмотрены основы построения, общие вопросы оптимизации и теория радиоэлектронных систем локации, навигации, передачи информации, управления, радиоэлектронной борьбы, а также вопросы распространения волн и элементы общей системотехники. По сравнению с первым изданием материал существенно переработан и дополнен с учетом последних мировых достижений и научных результатов авторов. Для специалистов, преподавателей и студентов вузов, специализирующихся в области локационной и навигационной системотехники, общей радиотехники и радиофизики.

##### **Кёниг Анна. Полное руководство по PIC-микроконтроллерам. — М.: МК-Пресс, 2007. — 256 с.**

На основании своего многолетнего опыта разработки проектов с использованием микроконтроллеров PIC авторы рассматривают данную тему с точки зрения конструкторов-практиков. Затрагиваются все вопросы, связанные с периферийными устройствами, для взаимодействия с которыми, собственно, и предназначены микроконтроллеры. В частности, описаны аналоговые периферийные модули, инструментальная среда MPLAB, а также отладчик и демонстрационные платы. Книга рассчитана на тех, кто уже имеет опыт работы с микроконтроллерами PIC. Основной акцент в ней сделан на разработках последних лет, к которым, в первую очередь, относится серия микроконтроллеров PIC18. Кроме того, в книге рассказано о многих нововведениях в микроконтроллерах PIC с 14- и 12-рядным ядром. В комплект входит CD.

##### **Ушаков В. Н. Акустооптические процессоры корреляционного типа. — М.: Радиотехника, 2007. — 184 с.**

Рассмотрены акустооптические сигнальные процессоры корреляционного типа, являющиеся перспективным классом устройств функциональной электроники, существенно расширяющим возможности современных средств обработки сигналов. Предложены оригинальные структуры видео- и радиочастотных акустооптических корреляторов с временным и пространственным интегрированием, теоретически и экспериментально обоснована их работоспособность и установлены предельно достижимые значения основных параметров данного класса устройств.

