

УДК 621.316.726

АВТОМАТИЗОВАНЕ КАЛІБРУВАННЯ УНІВЕРСАЛЬНОГО ПРЕЦИЗІЙНОГО ПЕРЕТВОРЮВАЧА ЧАСТОТА–КОД

© Юрши Сергій, 2006

Національний університет “Львівська політехніка”,
кафедра інформаційних систем та мереж,
вул. С. Бандери, 12, 79013, Львів, Україна

Описана автоматизована методика калібрjвання універсального прецизійного перетворювача частота-код, яка призначена для коригування неточності припасування частоти кварцового генератора, чи так званого калібраційного допуску. Показано, що запропоноване калібрjвання дає також змогу зменшити складові похибки взірцевого кварцового генератора, що виникають через старіння кристала і зміни температури довкілля. Описано також результати експериментальних досліджень похибки перетворення перетворювача у всьому робочому діапазоні температур $-40^{\circ}\text{C} \dots +85^{\circ}\text{C}$ з метою визначення границь температурного діапазону, у разі виходу за які необхідно коригувати температурний дрейф.

Описана автоматизированная методика калибровки универсального прецизионного преобразователя частота-код, которая предназначена для коррекции неточности настройки кварцевого генератора, или так называемого калибрационного допуска. Показано, что предложенная калибровка позволяет уменьшить составляющие погрешности образцового кварцевого генератора, которые возникают из-за старения кристалла и изменения температуры окружающей среды. Описаны также результаты экспериментальных исследований погрешности преобразователя во всем рабочем диапазоне температур $-40^{\circ}\text{C} \dots +85^{\circ}\text{C}$ с целью определения границ температурного диапазона, при выходе за которые необходимо корректировать температурный дрейф.

The automated calibration technique for a trimming inaccuracy or so called calibration tolerance of quartz resonator using in the universal precision frequency-to-digital converter is described in the paper. It was shown that such technique can be used also for reducing a drift due to a quartz crystal aging and temperature changes. The experimental technique and results for converter's error research in the temperature range $-40^{\circ}\text{C} \dots +85^{\circ}\text{C}$ is also described in the paper. The aim of these experiments was to determine the limits of temperature range outside of which it is necessary to use the correction of frequency instability due to temperature changes.

1. Вступ. Як міру взірцевої частоти універсального перетворювача частота-код (УПЧК) [1-2], розробленого раніше для широкого застосування, зокрема для використання в цифрових сенсорах різних фізичних і хімічних, електричних і неелектричних величин, використовують кварцовий генератор. Однак з огляду на високі метрологічні характеристики розробленого перетворювача, а саме програмовану похибку квантування (до 0.001 %), до кварцових генераторів ставлять підвищені вимоги. Так, стабільність його частоти повинна бути на порядок вищою за мінімально можливу похибку квантування, тобто $\leq 0,0001$ %. Таку похибку міри забезпечують або термокомпенсовані (ТСХО), або термостабілізовані кварцові генератори. Однак вони є

порівняно дорогими пристроями, і їхня ціна перевищує ціну самого однокристалльного УПЧК. Крім того, термостабілізовані кварцові генератори, які успішно застосовують у звичайних частотомірах, не можуть бути використані в цифрових мікроелектронних сенсорах.

2. Мета досліджень. Щоб забезпечити можливість роботи УПЧК з недорогими стандартними кварцовими генераторами, доцільно передбачити можливість калібрjвання для компенсації неточності припасування частоти кварцового генератора чи так званого калібраційного допуску. Крім того, доцільно визначити межі робочого температурного діапазону УПЧК, при виході за які необхідно коригувати температурний дрейф. Тому метою

досліджень, описаних у статті, є експериментальне встановлення температурних меж коригування частоти кварцового генератора через температурний дрейф, а також розроблення процедури калібрування.

3. Аналіз досліджень і публікацій. Резонансна частота кварцового генератора визначається кутом зрізу, розмірами кварцової пластини, її масою, формою резонатора тощо. Для виготовлення кварцових генераторів з частотами в діапазоні 0,5 ÷ 350 МГц частіше використовують зріз під кутом 35° 15' відносно осі Z (так званий АТ-зріз) [3].

Точність, з якою контролюють товщину кварцової пластини під час виготовлення резонаторів, визначає варіації номінальної частоти від кварцу до кварцу [4]. Відносна зміна частоти визначається за таким виразом:

$$\frac{\Delta f}{f} = A_i \Delta T + C_i \Delta T^3, \quad (1)$$

де $\Delta T = T - T_i$ і T_i – температура в точці перегину температурно-частотної характеристики кварцового кристала АТ-зрізу; A_i – коефіцієнт, що залежить від конструктивних особливостей кварцового резонатора й зумовлений переважно кутом зрізу; C_i – константа, а T_i варіюється в діапазоні від +25 до +35°C для резонаторів АТ-зрізу залежно від розмірів кристала [5].

Неточність припасування частоти недорогих, стандартних кварцових генераторів (RTXO) може перевищувати 30 ppm (або 0.003 %) і має систематичний характер. Наприклад, 16 МГц кварцовий резонатор компанії *Seward*, із зазначеним калібраційним допуском у 30 ppm має реальну частоту 16 001 400 Гц, яка відповідає неточності встановлення частоти в 90 ppm (0.009 %).

Якщо для того чи іншого застосування перетворювача потрібна похибка перетворення 0.01 % або гірше, то калібрування непотрібне. Якщо відносна похибка перетворення повинна бути 0.01 % або краще, перетворювач повинен бути відкалібрований з урахуванням систематичної похибки калібраційного допуску кварцового генератора.

4. Виклад основного матеріалу дослідження

4.1 Процедура калібрування УПЧК. Процедуру калібрування УПЧК бажано здійснювати в реальних умовах експлуатації з використанням кварцового генератора з частотою $f_{osc} = 16$ МГц, яка є рекомендованою [6]. Під час калібрування перетворювач повинен бути

підключений до персонального комп'ютера через послідовний інтерфейс RS-232. Будь-яке програмне забезпечення “термінального” типу (наприклад, Terminal V1.9b), що працює під управлінням операційної системи Windows, може бути використане для обміну даними між УПЧК і комп'ютером [7].

Послідовність процедури калібрування така:

1) Тестова команда “T” переводить УПЧК в режим калібрування. На виході “TEST” перетворювача з'являється послідовність прямокутних імпульсів з частотою слідування $f_{osc}/2$.

2) Частота цієї імпульсної послідовності вимірюється частотоміром з точністю не гірше ніж 0,0001 % або, принаймні, 0,0002 %.

3) Дробова частина результату вимірювання відкидається, і число 8 000 000 віднімають з цілої частини результату вимірювання.

4) Отриманий коригувальний коефіцієнт Δ перетворюється в шістнадцятиричний формат.

5) Використовуючи команду “F” ± Δ , □ коригувальний коефіцієнт з урахуванням знака вводять в УПЧК. Команда “F” без параметрів виводить поточне значення коригувального коефіцієнта і може бути використана для перевірки правильності його введення.

Таке калібрування виконується тільки один раз. Коригувальний коефіцієнт зберігається в енергонезалежній пам'яті перетворювача після відмикання живлення УПЧК.

Приклад:

Перевести УПЧК в режим калібрування за допомогою команди “T”:

>T

Нехай частота на тестовому виході “TEST” перетворювача дорівнює 8 000 694,257865 Гц. Відкидаючи дробову частину, одержимо 8 000 694 Гц. Потім розрахуємо коригувальний коефіцієнт: 8 000 694 - 8 000 000 = 694 Гц і переведемо результат у шістнадцятиричний формат: $(697)_{10} = (2B9)_{16}$. Потім введемо коригувальний коефіцієнт у перетворювач з урахуванням його знака:

>F+2B9

Після цього перевіримо правильність коригувального коефіцієнта, ввівши команду “F” без параметрів:

>F

Якщо коригувальний коефіцієнт був введений правильно, то перетворювач поверне його розраховане значення:

2B9

Перетворювач готовий до виконання вимірювань з програмованою точністю від 1 до 0,001 %.

Якщо частота кварцового генератора дорівнювала, наприклад, $f_{osc\ nom} = 16\ 000\ 937,5$ Гц, і вимірювалася б частота $f_x = 25\ 000$ Гц, то отриманий результат при некаліброваному перетворювачі ($\Delta=0$) і заданій похибці квантування $\delta_{q\ setup} = 0,001$ % дорівнював би $f_{xi} = 24998,0002$ Гц, що відповідає похибці вимірювання $\delta_q = 0,008$ % $> \delta_{q\ setup}$. Після калібрування значення частоти, що вимірюється, дорівнює $f_{xi} = 25000,1781$ Гц, що вже відповідає відносній похибці $\delta_q = 0,0007$ % $< \delta_{q\ setup}$.

Крім неточності припасування частоти резонатора, номінальна частота кварцового генератора змінюється також за рахунок дрейфів різної природи: через зміни температури довкілля; старіння кристала, відхилення напруги живлення генератора, а також інші зміни [3].

Періодична подібна процедура калібрування корисна також для усунення складової похибки кварцового генератора через старіння, а також під час роботи УПЧК за межами температурного діапазону, регламентованого нормальними умовами експлуатації.

З огляду на те, що граничний діапазон температур розробленого УПЧК становить $-40^{\circ}\text{C} \dots +85^{\circ}\text{C}$, доцільно дослідити також похибку перетворення в зазначеному температурному діапазоні і з'ясувати можливість компенсації температурного дрейфу, а також межі температурного діапазону, для яких доцільно вводити таке коригування.

4.2. Дослідження температурної залежності похибки перетворення УПЧК

4.2.1. Мета експерименту, експериментальне обладнання і методика експериментальних досліджень. Метою експериментальних досліджень було дослідження похибки перетворення УПЧК у всьому робочому діапазоні температур $-40^{\circ}\text{C} \dots +85^{\circ}\text{C}$, а також визначення меж температурного діапазону, у разі виходу за які необхідно коригувати температурний дрейф.

Експериментальні дослідження здійснювали в кліматичній камері Технічного університету Каталонії (Барселона, Іспанія). Схема увімкнення перетворювача наведена на рис. 1 і відповідає описаній схемі в посібнику користувача мікросхеми УПЧК [6].

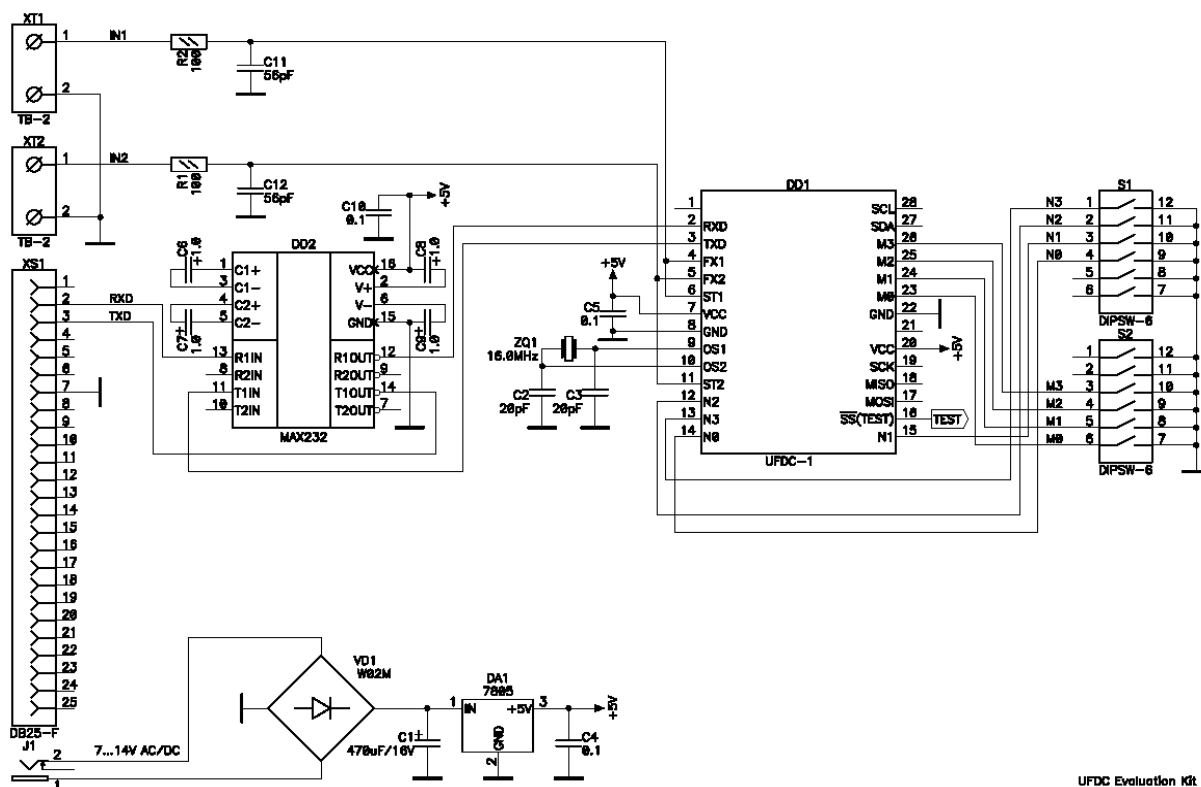


Рис. 1. Схема увімкнення УПЧК

Для експериментальних досліджень у принципівій схемі були зроблені деякі зміни, а саме: заміна мікросхеми MAX232 на MAX233, що дало змогу не використовувати чотири зовнішні конденсатори; використання стабільнішого джерела живлення +5 В порівняно з передбачуваним 7...14 В джерелом живлення, що дало змогу не використовувати мікросхему регулятора напруги L7805CV; також не застосовувалися зовнішні перемикачі S_1 , S_2 , оскільки режими вимірювання і необхідна точність перетворення задавалися комп'ютером. У кліматичній камері безпосередньо розміщалися УПЧК, кварцовий генератор і вхідні RC-фільтри.

Щоб автоматизувати експеримент, збирання даних, обмін сигналами між УПЧК і комп'ютером, а також відображення результатів вимірювання здійснювалися за допомогою віртуального приладу, створеного в середовищі графічного програмування LabView 7.1 [8]. Зовнішній вигляд віртуального приладу наведений на рис. 2.

Віртуальний прилад складається із таких основних модулів: модуля конфігурації послідовного порту вводу/виводу; модуля вибору режимів вимірювання і задання необхідної похибки перетворення УПЧК; модуля калібрування і модуля відображення результатів вимірювань і статистичних характеристик.

Модуль конфігурації послідовного порту вводу/виводу дає змогу задавати такі параметри передавання: номер COM-порту, швидкість передавання інформації, кількість інформаційних бітів, кількість бітів захисту за паритетом, стоп-біти, підтвердження зв'язку, а також затримку "Timeout".

Модуль вибору режимів вимірювання і задання необхідної похибки перетворення УПЧК дає змогу вибирати вимірюваний частотно-часовий параметр; похибку перетворення з десяти можливих значень з діапазону $1 \div 0,001$ %, швидкість передавання інформації з послідовного порту і кількість градацій модульовального ротора, (кількість імпульсів за один оберт) для режиму вимірювання швидкості обертання.

Модуль калібрування УПЧК дає змогу вводити коригувальний коефіцієнт з урахуванням його знака.

Модуль відображення результатів вимірювань і статистичних характеристик слугує для індикації результату вимірювання, середнього значення, девіації, номера поточного вимірювання, а також для задання кількості необхідних вимірювань, та інтервалу часу між вимірюваннями.

Схема експериментальної установки для дослідження температурної залежності похибки перетворення УПЧК наведена на рис. 3.

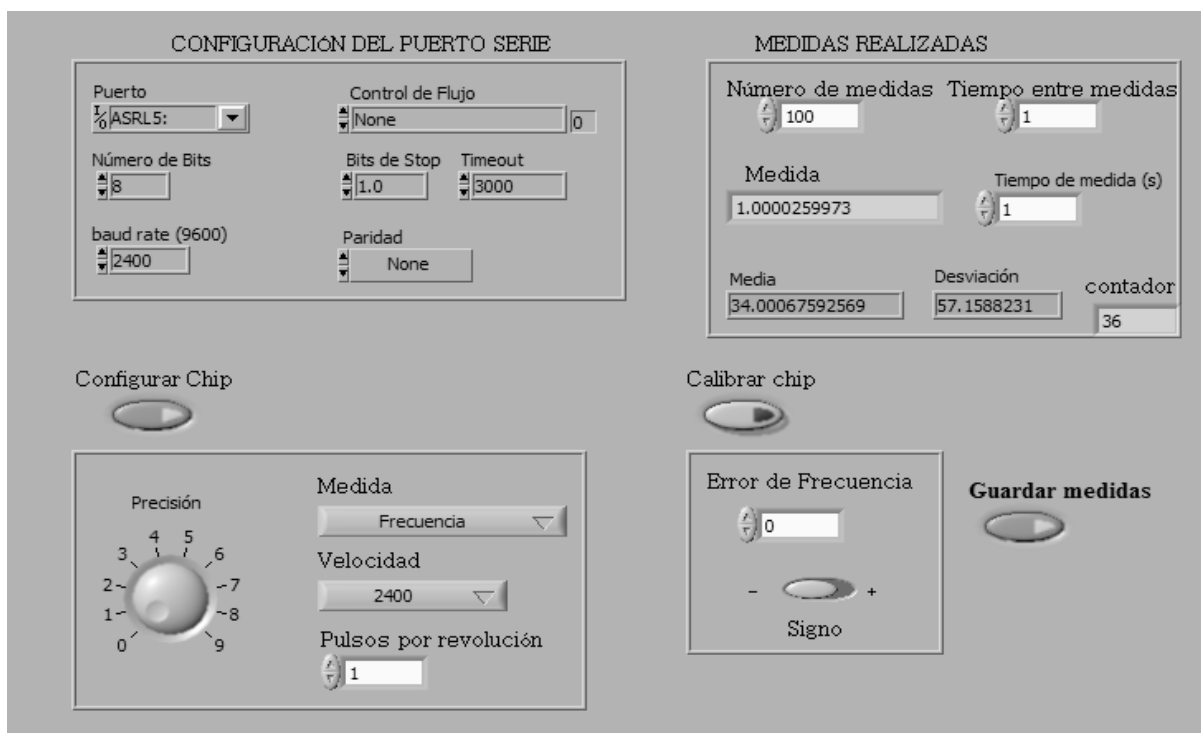


Рис. 2. Зовнішній вигляд віртуального приладу, створеного для автоматизації експериментальних досліджень УПЧК

Після 45-хвилинної температурної стабілізації кліматичної камери, УПЧК калібрувався при температурі довкілля + 21°C, задавалася похибка перетворення 0,001 % і вимірювалися частоти 1 Гц, 1 кГц і 1 МГц сто разів кожна через інтервал часу в 2 с у діапазоні робочих температур УПЧК –40 °С ... +80 °С з кроком 10 °С при заданій відносній вологості 50 %. Розраховувалися середнє значення і девіація вимірюваної частоти. Як джерело вхідних сигналів використовувався функціональний генератор Agilent 33120A, а для вимірювання частоти на тестовому виході “TEST” перетворювача використовувався частотомір Agilent 53132A.

4.2.2 Результати експериментальних досліджень. Результати експериментальних досліджень частотно-температурної залежності похибки перетворень УПЧК при вимірюванні частот 1 Гц, 1 кГц і 1 МГц наведені в таблиці, а графіки залежності результатів вимірювань від температури для тих самих частот – на рис. 4 а, б і в відповідно.

При вимірюванні частоти 1 Гц похибка перетворення може збільшуватися до 0,003 % (або 30 ppm) через зміни температури довкілля. Це проявляється в діапазонах температур [–30...0[°С і]+50...+80]°С. В іншій частині температурного діапазону похибка перетворення не перевищує наперед заданого значення 0,001 % (або 10 ppm).

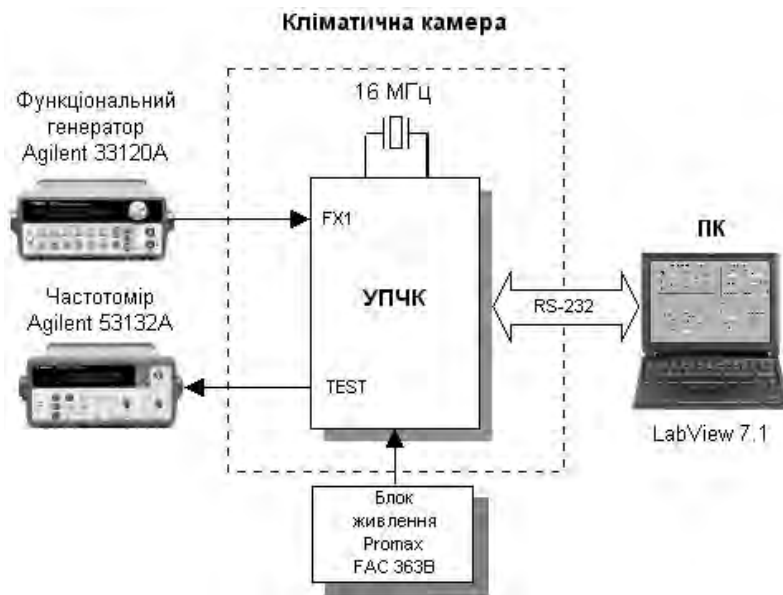
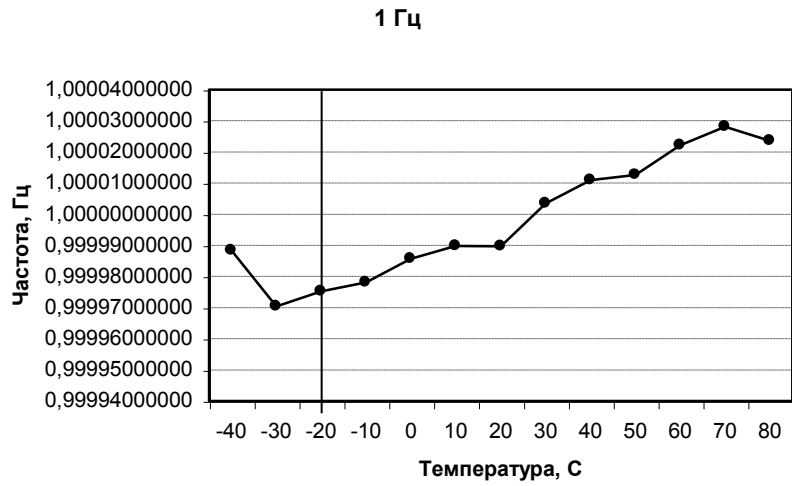


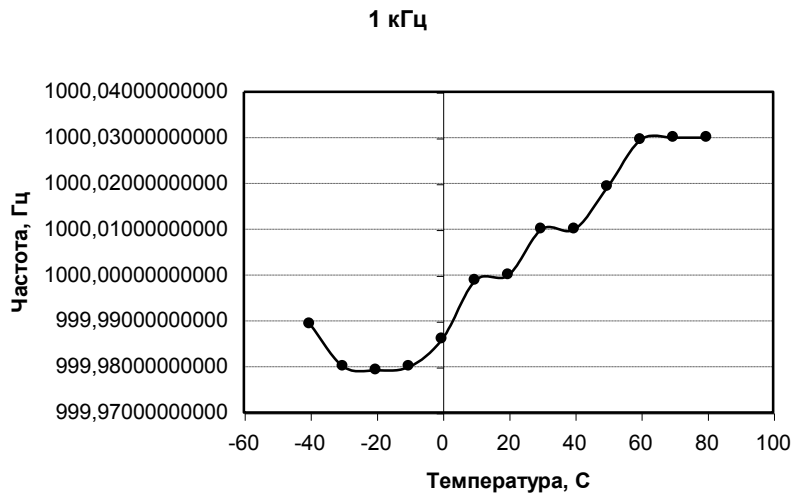
Рис. 3. Схема експериментальної установки для дослідження температурної залежності похибки перетворення УПЧК

**Результати експериментальних досліджень
частотно-температурної залежності похибки перетворень**

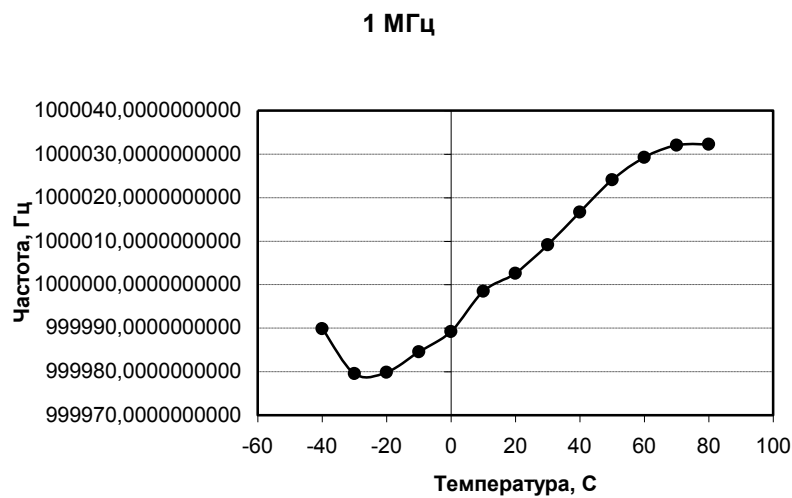
t, °C	1 Гц		1 кГц		1 МГц	
	$f_{x \text{ ср.}}, \text{ Гц}$	$ \Delta f , \text{ Гц}$	$f_{x \text{ ср.}}, \text{ Гц}$	$ \Delta f , \text{ Гц}$	$f_{x \text{ ср.}}, \text{ Гц}$	$ \Delta f , \text{ Гц}$
-40	0,99998840381	0,00001159619	999,989301511	0,010698488	999989,883188	10,1168118
-30	0,99997040622	0,00002959378	999,980002999	0,019997000	999979,581952	20,4180470
-20	0,99997516445	0,00002483555	999,979203143	0,020796856	999979,881988	20,1180110
-10	0,99997804490	0,0000219551	999,980002999	0,019997000	999984,582552	15,4174478
0	0,99998572280	0,0000142772	999,986014637	0,013985362	999989,183104	10,8168958
+10	0,99998984286	0,00001015714	999,998800167	0,001199832	999998,484220	1,5157798
+20	0,99998966262	0,00001033738	1000,000000000	0,000000000	1000002,634718	2,6347180
+30	1,00000342059	0,00000342059	1000,009998800	0,009998800	1000009,185504	9,1855041
+40	1,00001093949	0,00001093949	1000,009998800	0,009998800	1000016,636398	16,63639813
+50	1,00001253972	0,00001253972	1000,019197880	0,019197880	1000024,087292	24,08729212
+60	1,00002213831	0,00002213831	1000,029497040	0,029497040	1000029,287916	29,28791612
+70	1,00002811700	0,00002811700	1000,029997000	0,029997000	1000032,038246	32,03824611
+80	1,00002355818	0,00002355818	1000,029997000	0,029997000	1000032,288276	32,28827611



a



б



в

Рис. 4. Залежність вимірюваної частоти від температури:
при вимірюванні а) 1 Гц, б) 1 кГц, в) 1 МГц

У разі вимірювання частоти 1 кГц, похибка перетворення також може досягати максимального значення 30 ppm. Значення цієї похибки перевищує наперед задану похибку у температурних діапазонах $[-30...0[^\circ\text{C} \text{ i }]+40...+80]^\circ\text{C}$.

Аналогічно, при вимірюванні частоти 1 МГц, максимальна похибка перетворення через температурні зміни може досягати 32 ppm. Ця похибка перевищує наперед задану в температурних діапазонах $[-30...+10[^\circ\text{C} \text{ i }]+30...+80]^\circ\text{C}$. На рис. 5 показано інтервали температури для досліджених частот, за яких необхідно калібрувати УПЧК.

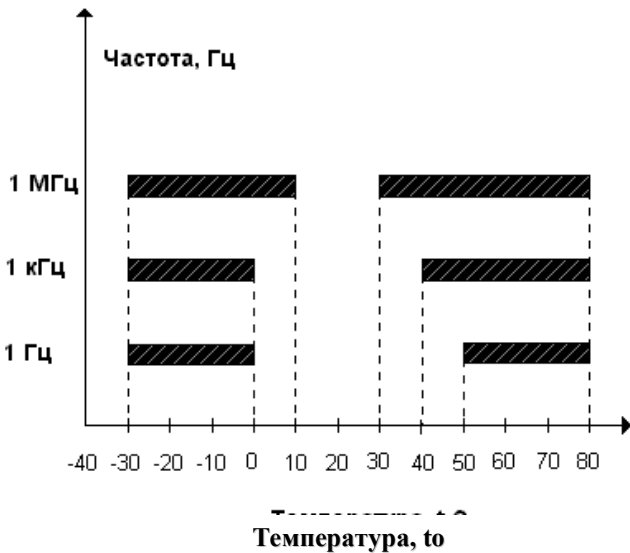


Рис. 5. Інтервали температури, для яких необхідно калібрувати УПЧК

Отримані результати експериментальних досліджень збігаються з температурно-частотною характеристикою стандартних кварцових резонаторів RTXО-типу з АТ-зрізом, які описуються параболою третього порядку [3]. Такі кварцові резонатори мають найменшу зміну частоти в температурному діапазоні $0...+50^\circ\text{C}$ [4]. Зі збільшенням вимірюваної частоти спостерігається деяке звуження цього температурного діапазону, можливо, через сильніший вплив короткочасної температурної нестабільності при вимірюванні високих частот. Під час роботи в температурному діапазоні близько -40°C при вимірюванні кожної із зазначених вище частот коригування

не потрібне. Це пояснюється температурно-частотною характеристикою кварцових генераторів цього типу.

Під час роботи УПЧК за межами визначених експериментальних температурних діапазонів необхідно використовувати описану процедуру коригування, якщо наперед задана похибка повинна бути меншою, ніж 0.01 %. Якщо передбачене коригування за якимись причинами неможливе, то доцільно використовувати кварцовий резонатор типу ТСХО з відхиленням частоти не більше ніж 5 ppm у діапазоні робочих температур $-20...+70^\circ\text{C}$. Крім того, УПЧК може працювати не тільки з вбудованим кварцовим генератором, але і зовнішнім взірцевим прецизійним кварцовим генератором [6].

5. Висновок. Основний внесок у загальну похибку стандартних кварцових генераторів зумовлений неточністю припасування частоти (або так званим калібраційним допуском), що має систематичний характер. Для роботи з такими недорогими кварцовими резонаторами в УПЧК передбачений режим коригування, якщо задана похибка перетворення повинна бути краще ніж 0,01 %.

Крім того, розроблена процедура коригування може зменшити складові загальної похибки кварцового генератора, спричинені процесом старіння, а також частотною нестабільністю при роботі перетворювача в широкому діапазоні температур. Так, для робочого діапазону температур УПЧК $-40 \dots +85^\circ\text{C}$ були експериментально визначені границі діапазону, у межах яких доцільно виконувати описане калібрування.

Результати експериментальних досліджень збігаються з температурно-частотною характеристикою стандартних кварцових резонаторів RTXО-типу з АТ-зрізом, які описуються параболою третього порядку.

Подальші дослідження в галузі калібрування УПЧК полягають у розробленні автоматичної процедури коригування неточності припасування частоти й врахуванню дробової частини реального значення частоти використовуваного кварцового резонатора. Це дасть змогу збільшити точність перетворення до 0,0001 % і вище.

1. Sergey Y. Yurish, Nikolay V. Kirianaki and Ramon Pallas-Areny, Low-Cost Precision Universal Programmable Frequency-to-Digital Converter, in Proceedings of IFAC Workshop on Programmable Devices and Systems (PDS'2004), Poland, Cracow,

- 18-19 November 2004, pp.70–75. 2. Sergey Y. Yurish, Nikolay V. Kirianaki and Ramon Pallas-Areny, *Universal Frequency-to-Digital Converter for Quasi-Digital and Smart Sensors: Specifications and Applications* // *Sensor Review* – 2005. – No.2, Vol. 25. – PP.92–99.
3. J. v.d. Windt, *Crystal Oscillators* // *T&M Report from the Test and Measuring Department, Philips*, № 53. 4. *Fundamentals of Quartz Oscillators* // *Application Note, Hewlett Packard* – 200-2. 5. Dr.N. Gufflet, *Quartz Crystal Resonators: Brief Overview, KVG Quartz Crystal Technology*. 6. *Universal Frequency-to-Digital Converter (UFDC-1): Specification and Application Notes, IFSA, 2004*. 7. [Http://bray.velenje.cx/avr/terminal](http://bray.velenje.cx/avr/terminal) 8. Тревис Д. *LabView для всех*. – М.: ДМП Пресс; ПриборКомплект, 2004. – 544 с.