

ВИСОКОСТАБІЛЬНИЙ КВАРЦОВИЙ ГЕНЕРАТОР З ЦИФРОВОЮ КОМПЕНСАЦІЄЮ ТЕМПЕРАТУРНОЇ НЕСТАБІЛЬНОСТІ ЧАСТОТИ

В роботі розглянуто особливості побудови високостабільних кварцових генераторів (КГ) з цифровою компенсацією температурної нестабільності частоти, як одного із основних дестабілізуючих факторів, що впливають на точнісні характеристики КГ. Підвищення стабільності частоти коливань КГ досягається за рахунок більш точної компенсації температурних впливів на основі ідентифікації теплового стану кварцового резонатора (КР) в багаточастотному (двочастотному) режимі збудження. Багаточастотне збудження КР забезпечує суміщення функції стабілізації частоти (основної функції КР) з вимірювальною (додатковою), дозволяє трактувати п'єзореzonансну коливальну систему як багатомірний об'єкт, в моделі якого явно фігурують контрольовані збурення.

Запропоновано структуру високостабільного КГ з цифровою компенсацією на основі двочастотного КР з двома парами електродів для збудження опорної та термочутливої мод коливань. Приведено типові температурно-частотні характеристики КР та побудована різницева функціональна залежність, яка носить практично лінійний характер в діапазоні температур від -40°C до $+80^{\circ}\text{C}$ та використовується для формування сигналу компенсації для цифрового синтезатора частоти прямого синтезу. На виході синтезатора сформовано термокомпенсоване коливання, яке може бути використано в якості високостабільного вихідного коливання КГ або, за потреби, за допомогою схеми на основі системи ФАПЧ перенесено у більш високочастотну область спектру. Використання схеми перенесення спектру за рахунок високих фільтруючих властивостей системи ФАПЧ дозволяє також покращити і спектральну частоту вихідного сигналу, який формується на виході цифрового синтезатора прямого синтезу.

Дане технічне рішення дозволяє суттєво зменшити похибки ідентифікації теплового стану КР за рахунок усунення температурних градієнтів між областю збудження коливань резонатора і датчиком температури, що притаманно для класичних функціональних методів та підвищити стабільність вихідних коливань на один – два порядки в залежності від типу КР. Представлений кварцовий генератор з цифровою компенсацією може бути використаний в якості джерела високостабільного опорного сигналу в схемах формування сітки опорних частот для телекомунікаційних та вимірювальних систем.

Ключові слова: кварцовий генератор; температурна стабільність частоти; цифровий синтезатор частоти прямого синтезу; цифрова компенсація.

Abstract – The research investigates the peculiarities of building high- stable quartz oscillator (QOS) with digital compensation of temperature frequency instability as one of the main destabilizing factors, which influence the accuracy characteristics of QOS. The rise of stability of frequency oscillations of QOS is reached with the help of more accurate compensation of temperature influences on the basis of identification of thermal state of quartz resonator (QR) in multi-frequent (dual- mode)excitation mode. Multi- frequent excitation of QR ensures the combination of function of frequency stabilization (the basic function of QR) with measuring (additional) allows to interpret piezoresonance oscillatory system as multivariate object, in the model of which the control disturbance appear obviously.

The research proposes the structure of high- stable QOS with digital compensation on the basis of dual- mode QR with two pairs of electrodes for excitation the supporting and thermo-active oscillation modes. It shows the typical temperature- frequent characteristics of QR and builds the variance functional subordination, which has practically linear character in the temperature range from -40°C to $+80^{\circ}\text{C}$ and is used for the formation of the signal of compensation for digital synthesizer of frequency of direct synthesis. On the exit of synthesizer the thermo- compensated oscillation is formed, which can be used as high- stable exit oscillation of QR or if needed with the help of scheme on basis of PLL is transferred into more high- frequency spectrum field. The use of the scheme of transferring the spectrum on account of high- filtered characteristics of PLL system also allows to improve the spectral frequency of exit signal, which is formed on the exit of digital synthesizer of direct signal.

Given technical solution allows to decrease essentially the errors of identification of thermal condition of QR on account of removal the temperature gradients between the field of excitation of resonator oscillation and temperature sensor, which is inherent for classical functional methods and increase the stability of exit oscillations by one- two degrees depending on the type of QR. The proposes quartz oscillator with digital compensation can be used as the source of high- stable supporting signal in the schemes of formation the net of supporting frequencies for telecommunication and measuring systems.

Вступ

У зв'язку із бурхливим розвитком систем цифрового радіозв'язку, радіомовлення та телебачення, радіолокації та радіонавігації все більш жорсткі вимоги пред'являються до генераторів стабільних часових інтервалів, які в переважній більшості визначають основні технічні характеристики даних систем. На теперішній час основним типом вторинних стандартів частоти є кварцові генератори (КГ), які широко застосовуються в переносній та мобільній апаратурі радіо- та відеозв'язку, пристроях цифрової передачі даних, в обчислювальній та мікропроцесорній техніці, в телекомунікаційному та навігаційному устаткуванні, вимірювальній техніці тощо.

Широке розповсюдження КГ обумовлене не тільки їх високими точностними характеристиками, а і рядом інших переваг, які виводять їх на перше місце у порівнянні з аналогічними пристроями. Так, високоточні КГ здатні забезпечити відносну нестабільність частоти на рівні $10^{-8} \dots 10^{-10}$ у широкому діапазоні температур при достатньо помірній їх вартості. В той же час цезієві, водневі та рубідієві стандарти частоти, які забезпечують більш високу точність ($10^{-11} \dots 10^{-13}$), широкого використання не набули із-за значно гірших масо-габаритних, енергетичних показників і більш високої вартості.

Роль опорних кварцових генераторів постійно збільшується по мірі зростання попиту та розширення сфер їх застосування. Це вимагає підвищення їх технічних характеристик, основними напрямками удосконалення яких є наступні: суттєве підвищення вимог до експлуатаційної стабільності частоти (до $1 \cdot 10^{-10}$ для довготривалої і $1 \cdot 10^{-12}$ для короткочасної), скорочення часу готовності та входження в режим синхронізації (вихід на номінальний режим стабілізації для опорних генераторів менше 1 хвилини); мікромініатюризація та зменшення енергоспоживання; підвищення надійності, удосконалення параметрів і експлуатаційних характеристик, а також забезпечення їх відтворюваності; зниження вартості [1-5,8,9].

Метою роботи є підвищення стабільності частоти коливань кварцових генераторів за рахунок більш точної компенсації температурних впливів на основі ідентифікації теплового стану кварцового резонатора в багаточастотному (двочастотному) режимі збудження.

1. Постановка задачі

Найбільш вагомим зовнішнім фактором, який впливає на стабільність частоти генератора, є зміна температури навколишнього середовища, тому покращенню температурної стабільності частоти коливань звичайно приділяється найбільша увага. Є декілька методів зменшення чутливості генераторів до дестабілізуючих температурних впливів. Конструктивно-технологічні методи базуються на пошуку нових типів зрізів та вдосконалення конструкції п'єзоелементів (ПЕ) та їх кварцоутримувачів, корпусів кварцових резонаторів (КР), що дозволяє значно покращити температурно - частотні характеристики (ТЧХ), але потребують великих матеріальних, часових затрат та значно ускладнюють боротьбу з виробничою багатопараметровою чутливістю, яка проявляється в чутливості характеристик генераторів до варіацій параметрів виробничих процесів [3].

Функціональні методи базуються на послабленні температурного впливу шляхом термокомпенсації, термостатування або їх комбінації, а також стабілізації потужності збудження за допомогою систем автоматичного регулювання амплітуди (АРА). Основним недоліком даних методів, який обмежує їх потенційні можливості, є просторове розподілення датчика температури з активною зоною КР, що призводить до появи похибок між вимірюваною та реально діючою величинами температурного впливу. Окрім цього суттєвим недоліком термостатованих генераторів є збільшення часу готовності, погіршення масо-габаритних показників, підвищена споживана потужність в режимі розігріву, що суперечить вище наведеним вимогам до кварцових опорних генераторів [3,6,7].

Дослідження вчених Харківської школи п'єзорезонансних пристроїв (ХАІ) Зеленського О. О., Колпакова Ф. Ф., Шмалія Ю. С., Солодовника В. Ф., Шевельова В. О. та інших, створеної під керівництвом професора Баржина В. Я. дозволили сформулювати та суттєво розвинути новий багаточастотно – алгоритмічний підхід до забезпечення інваріантності п'єзорезонансних пристроїв (ПРП), який базується на його представленні як динамічного об'єкта з природною надлишковістю в частотному базисі (багаточастотністю) та поточною ідентифікацією зворотно діючих дестабілізуючих факторів (ДФ). Теоретичною основою даного підходу є фундаментальні роботи Харкевича О. О. по теорії електроакустичних перетворювачів, Лузіна М. М., Кузнецова П. І., Петрова Б. М. по теорії інваріантності та її використання в області вимірювальної техніки і автоматики; матеріальною основою – бурний розвиток мікроелектронної та мікропроцесорної техніки, використання якої в комплексі з багаточастотним збудженням КР визначено провідними світовими вченими Rosati V., Filler R., Schodowski S. «революційним напрямком» в прецизійній п'єзоелектроніці [3].

Багаточастотне збудження КР забезпечує суміщення функції стабілізації частоти (основної функції КР) з вимірювальною (додатковою), дозволяє трактувати п'єзорезонансну коливальну систему як багатомірний об'єкт, в моделі якого явно фігурують контрольовані збурення:

$$y_i(p) = y_{z_i}(p) + \Delta y_{\kappa_i}(p) + \Delta y_{n\kappa_i}(p) = W_{ii}(p)x_{z_i}(p) + \sum_{j=1, j \neq i}^m W_{ij}(p)x_{z_j}(p) + \sum_{k=1}^n A_{ik}(p)x_{\kappa_k}(p) + \Delta y_{n\kappa_i}(p), \quad (1)$$

де $\mathbf{X}_z(p) = \{x_{z_i}\}_{i=1}^m$ – вектор заданого керування; $\mathbf{X}_\kappa(p) = \{x_{\kappa_k}\}_{k=1}^n$ – вектор контрольованого збурення; $\mathbf{W}(p)$, $\mathbf{A}(p)$ – передатні функції каналів керування і каналів збурення відповідно; $\Delta y_{n\kappa_i}(p)$ – додатковий рух за рахунок неконтрольованих збурень.

Це дозволяє суттєво зменшити похибки ідентифікації поточного теплового стану КР за рахунок усунення температурних градієнтів між областю збудження коливань резонатора і датчиком температури, що притаманно для класичних функціональних методів. При цьому найвища точність і стабільність відтворення компенсаючої функції може бути отримана тільки за рахунок використання сучасних цифрових

2. Особливості побудови кварцового генератора з цифровою компенсацією

Розглянемо запропоновану структуру кварцового генератора з цифровою компенсацією (КГ/ЦК) (рис. 1), яка містить двочастотний кварцовий резонатор (ДКР), перший кварцовий генератор (КГ1), другий кварцовий генератор (КГ2), змішувач (ЗМ), схему формування сигналу компенсації (СФСК), цифровий синтезатор прямого синтезу (ЦСЧПС) та схему перенесення спектру коливань на базі системи фазового автопідстроювання частоти (ФАПЧ), яка в свою чергу складається з фазового детектора (ФД), фільтра низької частоти (ФНЧ), дільника частоти (ДЧ) та генератора керованого напругою (ГКН).

Розташування двох пар електродів на одній п'єзопластині дозволяє мінімізувати градієнтні та динамічні похибки, що виникають в ДКР під впливом температурних дестабілізуючих факторів. Одна пара електродів (1-1') використовується для збудження коливань опорної моди f_{REF} , а друга пара електродів (2-2') – для збудження термочутливої моди f_T . Для виділення різницевої частоти опорної та термочутливої мод коливань Δf_T в схему введений змішувач ЗМ, на виході якого виділяється сигнал різницевої частоти $\Delta f_T = f_{REF} - f_T$.

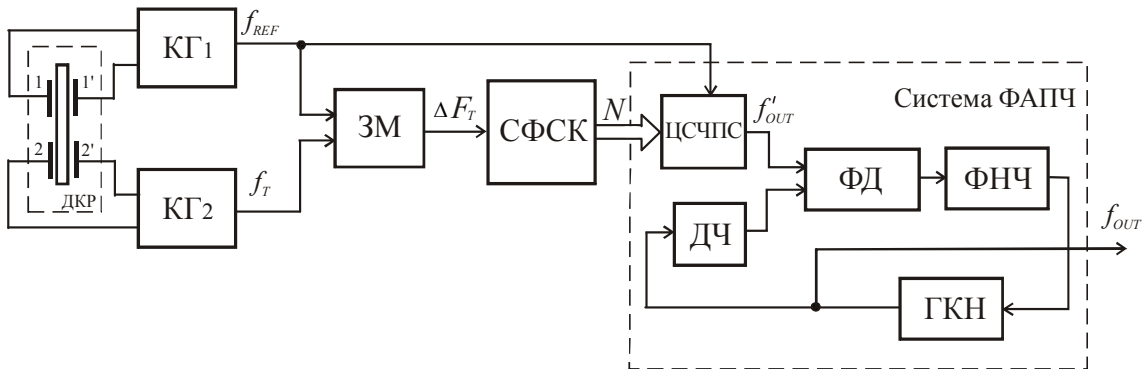


Рис. 1. Структура кварцового генератора з цифровою термокомпенсацією

Зміна теплового режиму кварцового резонатора може бути зумовлена як зовнішніми факторами впливу, так і внутрішніми (за рахунок саморозігріву п'єзопластини), але в будь-якому випадку призводить до зсувів власних частот КР. Загальний зсув власних частот ДКР з урахуванням термодинамічних процесів представляється як [6]:

$$\frac{\Delta f}{f_0} = \left(\frac{\Delta f(T)}{f_0} \right)_{\text{ТЧХ}} + \left(\frac{\Delta f(\Delta T_R(\psi))}{f_0} \right)_{\text{ТДХ}}, \quad (2)$$

де $\left(\frac{\Delta f(T)}{f_0} \right)_{\text{ТЧХ}} = \sum_{i=1}^3 a_i (T - T_n)^i \Big|_{T=T_{\text{ПЕсеп}}}$ – статична (псевдостатична) складова нестабільності

п'єзоелемента, яка визначається його температурно-частотною характеристикою (ТЧХ) відносно номінальної температури T_n та середньою температурою ПЕ $T_{\text{ПЕсеп}}$;

$\left(\frac{\Delta f(\Delta T_R(\psi))}{f_0} \right)_{\text{ТДХ}}$ – термодинамічна складова нестабільності, яка виникає за рахунок спотворення

температурного поля п'єзоелемента $\Delta T_R(\psi)$ в напрямку радіус-вектора \mathbf{r} за швидких змін потужності збудження або зовнішньої температури;

$a_i, i = \overline{1,3}$ – температурні коефіцієнти частоти першого, другого і третього порядку.

На рис. 2 приведені типові ТЧХ кварцових резонаторів АТ-зрізу для коливань опорної моди $\delta f_{REF} = \frac{\Delta f_{REF}}{f_{0_{REF}}}$ та термочутливої моди $\delta f_T = \frac{\Delta f_T}{f_{0_T}}$, де $f_{0_{REF}}$ та f_{0_T} – номінальні значення частот для температури T_n . Для ідентифікації температурних збурень використовується оцінююча функція різницевого коливання мод f_{REF} і f_T з різними температурно-частотними характеристиками (бажано за знаком):

$$\delta_{REF}(t) - \delta_T(t) = \frac{\Delta f_{REF}(t)}{f_{0_{REF}}} - \frac{\Delta f_T(t)}{f_{0_T}} = \xi_f(t). \quad (3)$$

Тоді, розглядаючи різницю (3) як лінійну поблизу температури k -того значення температури T_k (рис. 2) та здійснюючи перехід до скінченних різностей отримаємо:

$$\xi_f(t) = \xi_{f_k} (1 + \lambda_k \Delta T_k(t)), \quad k = \overline{1, m}, \quad (4)$$

де $\xi_{f_k} = \xi_f(t)|_{T(t)=T_k} = \sum_{j=1}^3 A_j \cdot (T_k - T_n)^j$ – відносне різницеве розладнання за температури T_k ;

$$\lambda_k = \frac{\partial \xi_f(t) / \partial T}{\xi_f(t)} \Big|_{T(t)=T_k} = \frac{1}{T_k} \cdot \frac{\sum_{j=1}^3 j A_j \cdot T_k^{j-1}}{\sum_{j=1}^3 A_j \cdot T_k^{j-1}} \text{ – нормована крутизна перетворення температура-частота;}$$

$A_j, j = \overline{1, 3}$ – коефіцієнти різницевої температурно-частотної характеристики.

У відповідності до (4) схемою СФСК формується керуюче слово $N(T)$, яке використовується для компенсації температурних відхилень частоти джерела опорного коливання схеми перенесення спектру (ФАПЧ) на базі цифрового синтезатора частоти прямого синтезу ЦСЧПС. Застосування сучасних технологій прямого цифрового синтезу при проектуванні КГ/ЦК дозволяє повною мірою використати наступні переваги ЦСЧПС [7-9]:

- дуже висока роздільна здатність за частотою та фазою, екстремально швидкий перехід на іншу частоту (або фазу), перелаштування за частотою без розриву фази, викидів та інших аномалій, які притаманні пристроям з аналоговим керуванням;
- архітектура ЦСЧПС забезпечує дуже малий крок перестроювання за частотою (менше 0,1 Гц), що дозволяє використовувати стандартні кварцові резонатори без спеціального підбору їх за частотою та суттєво підвищує ефективність параметричної температурної компенсації;
- можливість цифрового керування частотою і фазою вихідного сигналу, цифровий інтерфейс дозволяє легко реалізувати мікроконтролерне керування.

Різкі зміни теплового режиму кварцового резонатора (умов його збудження) призводять до суттєвого спотворення ТЧХ, що потребує врахування термодинамічної складової нестабільності (ТДХ), яка за швидких змін температури може перевищувати зсуви частот у псевдостатичних режимах КР. У даному випадку, відповідно до (2), загальна нестабільність для i -тої частоти ДКР представляється у вигляді:

$$\delta_i(t) = \sum_{j=1}^3 a_{ij} (T - T_n)^j + \tilde{a}_i \frac{dT}{dt}; \quad i = \overline{1, 2}, \quad (5)$$

де \tilde{a}_i – термодинамічний коефіцієнт, а коефіцієнти різницевої ТЧХ (4)

$$A_j = (a_{1j} - a_{2j}) + (\tilde{a}'_1 - \tilde{a}'_2), \quad A_j = (a_{1j} - a_{2j}), \quad j = \overline{2, 3}; \quad \tilde{a}'_i = \tilde{a}_i / \Delta t, \quad i = \overline{1, 2}. \quad (6)$$

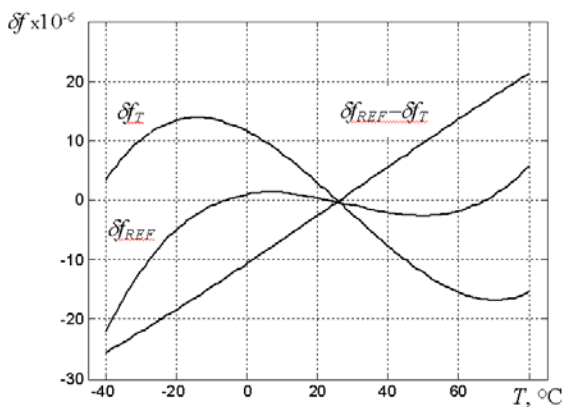


Рис. 2. Типові ТЧХ кварцових резонаторів АТ-зрізу

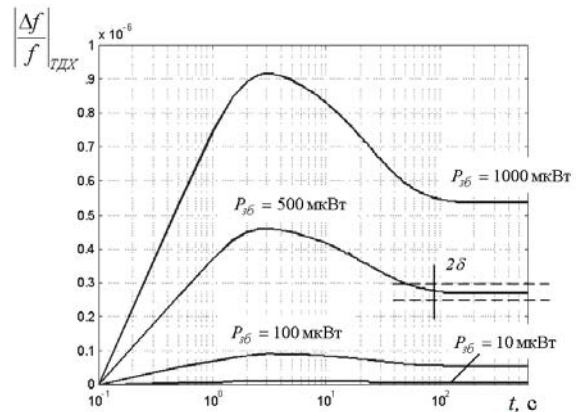


Рис. 3. Часові залежності термодинамічної складової нестабільності частоти $|\Delta f / f|_{TDX}$ для різних потужностей стрибкоподібного збудження резонаторів АТ-зрізів

На рис. 3 приведені типові часові залежності термодинамічної складової нестабільності частоти $|\Delta f / f|_{TDX}$ для різних потужностей стрибкоподібного збудження резонаторів АТ-зрізів. Аналіз отриманих даних (таблиця 1) показує, що зміни потужності збудження КР $\Delta P_{30} \geq 100$ мкВт є занадто великими для високостабільних генераторів. В той же час, обмеження варіацій потужності збудження на рівні до

$\Delta P_{зб} \leq 10$ мкВт дозволяє в межах $2\delta = 1 \cdot 10^{-7} \dots 1 \cdot 10^{-8}$ термодинамічною складовою нестабільності частоти знехтувати [6].

Таблиця 1

Термодинамічна складова нестабільності частоти $(\Delta f/f)_{тдх}$

$P_{зб}$, мкВт	Верхня межа нестабільності частоти 2δ		
	$1 \cdot 10^{-7}$	$1 \cdot 10^{-8}$	$1 \cdot 10^{-9}$
10	–	–	67 с
100	–	54 с	108,5 с
500	35 с	94,5 с	133 с
1000	52,5 с	109,5 с	141,5 с

Термокомпенсоване коливання з виходу синтезатора ЦСЧПС f'_{OUT} подається на вхід системи ФАПЧ (на перший вхід фазового детектора ФД), а на другий вхід фазового детектора – коливання f_{OUT} з генератора керованого напругою через дільник частоти ДЧ. На виході ФД формується сигнал помилки пропорційний різниці фаз сигналів на його входах, який після корекції за допомогою фільтра нижніх частот ФНЧ, що визначає динамічні властивості системи ФАПЧ, використовується для керування частотою генератора керованого напругою ГКН. Отже, частота вихідного сигналу пристрою генерування буде дорівнювати $f_{OUT} = n \cdot f'_{OUT}$, де n – коефіцієнт ділення дільника частоти.

3. Практична реалізація кварцового генератора з цифровою компенсацією

Для експериментальної перевірки характеристик кварцового генератора з цифровою компенсацією розроблений та практично реалізований макетний зразок КГ/ЦК (рис 4,5). В якості ЦСЧПС використаний сучасний інтегральний 4-канальний когерентний синтезатор прямого цифрового синтезу AD9959BCPZ, який забезпечує незалежне управління частотою, фазою і амплітудою для кожного каналу [9]. Кожний канал ЦСЧПС містить високошвидкісний 10-бітний ЦАП з великим динамічним діапазоном та забезпечує 32-розрядну настройку вихідної частоти, 14-розрядну настройку фази та 10-розрядне регулювання амплітуди. Синтезатор відрізняється низьким енергоспоживанням – менше 165 мВт на канал та забезпечує наступні робочі характеристики:

- частота вихідного сигналу для кожного каналу до 200 МГц;
- вибір коефіцієнта множення тактової частоти від 4 до 20;
- висока міжканальна ізоляція (> 65 дБ);
- незалежний контроль частоти, фази і амплітуди у кожному каналі;
- частотна, фазова і амплітудна модуляції (до 16 рівнів модуляції за частотою);
- режим лінійної розгортки за кожним із параметрів (частота, фаза, амплітуда);
- точність встановлення частоти 116 мГц;
- високошвидкісний 4-канальний SPI інтерфейс;
- можливість синхронізації декількох пристроїв (синтезаторів);
- програмне і апаратне керування енергоспоживанням.

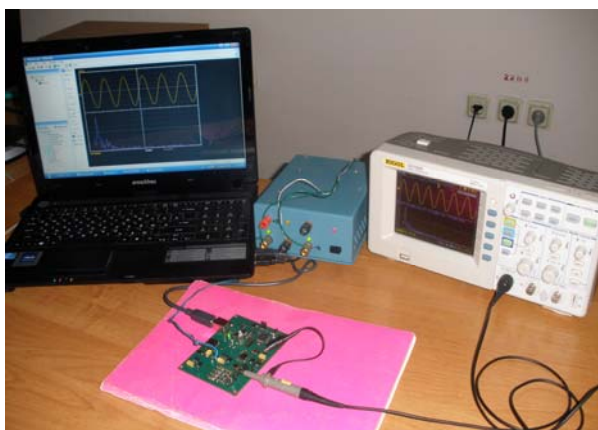


Рис. 4. Лабораторне дослідження характеристик КГ з цифровою компенсацією

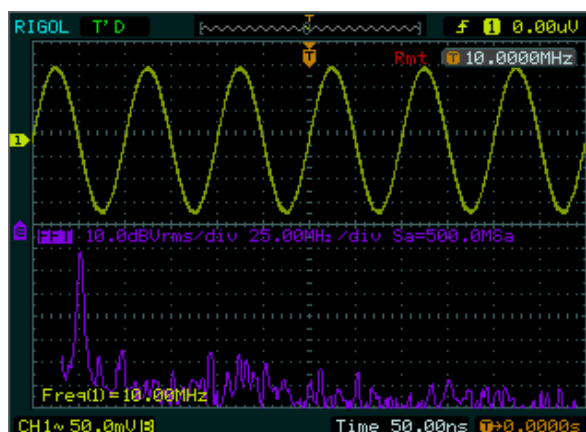


Рис. 5. Осцилограма (1) та спектрограма сигналу на виході ЦСЧПС

Схема формування сигналу компенсації СФСК реалізована на основі мікроконтролера ADUC841BS-3, який виконує функції початкової ініціалізації синтезатора ЦСЧПС та здійснює корекцію частоти його сигналу у відповідності до сигналу різницевої частоти $\Delta F_T = f_{REF} - f_T$. На рис. 4 представлений макетний зразок генератора КГ/ЦК, а на рис. 5 приведені типові осцилограма та

спектрограма термокомпенсованого коливання опорної частоти f'_{OUT} на виході ЦСЧПС. Для фіксації осцилограм та спектрального представлення сигналів на базі швидкого перетворення Фур'є використаний цифровий осцилограф RIGOL DS1052E.

Висновки

Побудована структура високостабільного КГ з цифровою компенсацією на основі двочастотного КР з двома парами електродів для збудження опорної та термочутливої мод коливаний. Приведено типові температурно-частотні характеристики КР та побудована різницева функціональна залежність, яка носить практично лінійний характер в діапазоні температур від -40°C до $+80^{\circ}\text{C}$ та використовується для формування сигналу компенсації для цифрового синтезатора частоти прямого синтезу. На виході синтезатора сформовано термокомпенсоване коливання, яке може бути використано в якості високостабільного вихідного коливання КГ або, за потреби, за допомогою схеми на основі системи ФАПЧ перенесено у більш високочастотну область спектру. Використання схеми перенесення спектру за рахунок високих фільтруючих властивостей системи ФАПЧ дозволяє також покращити і спектральну частоту вихідного сигналу, який формується на виході цифрового синтезатора прямого синтезу.

Дане технічне рішення дозволяє суттєво зменшити похибки ідентифікації теплового стану КР за рахунок усунення температурних градієнтів між областю збудження коливаний резонатора і датчиком температури, що притаманно для класичних функціональних методів та підвищити стабільність вихідних коливаний на один – два порядки в залежності від типу КР. Представлений кварцовий генератор з цифровою компенсацією може бути використаний в якості джерела високостабільного опорного сигналу в схемах формування сітки опорних частот для телекомунікаційних та вимірювальних систем.

Література

1. Вороховский Я. Л. Прецизионные кварцевые резонаторы и генераторы для современных радиоэлектронных комплексов // *Электроника: НТБ*, № 1. – 2010, – С. 34-38.
2. Белов Л. Опорные генераторы // *Электроника: Наука, Технология, Бизнес*. – 2004. – № 6. – С. 38–44.
3. Колпаков Ф.Ф. Теорія і реалізаційні основи інваріантних п'єзрезонансних коливальних систем [Текст] : [монографія] / Ф.Ф. Колпаков, С.К. Підченко. – Харків: Нац. аерокосм. ун-т ім. М. С. Жуковського "Харк. авіац. ін-т". – 2011. – 326 с.
4. Zelensky A.A. The principles of developing invariant piezoresonance units with controlled dynamics / A.A. Zelensky, S.K. Pidchenko, A.A. Taranchuk // *Eastern European journal of enterprise technologies // Scientific journal*. – Kharkov: Technological center, 2012. – Vol. 6/11 (60). – pp. 17-22.
5. Alexander A. Zelensky. Mathematical Model of Multi-Frequency Piezoresonance Oscillation System / A.A. Zelensky, S.K. Pidchenko, A.A. Taranchuk // *Communications*. – Science Publishing Group: NEW YORK, U.S.A., 2013. – Vol. 1, No. 1. – pp. 1-8.
6. Підченко С.К. Ідентифікація теплового стану кварцового резонатора на етапі встановлення коливаний / С.К. Підченко, А.А. Таранчук // *Радіоелектронні і комп'ютерні системи*. – Харків: Нац. аерокосм. ун-т «Харьк. авіац. ін-т», 2004. – № 3(7). – С. 36-42.
7. Stofanik V. An improvement in the temperature-compensated DDS / V. Stofanik, I. Balaz, M. Minarik // *Proc. of the 2001 IEEE/EIA International Frequency Control Symposium*. – P. 662 – 664.
8. Kosykh A. Theoretical and experimental investigation of specific components in output signal of digitally compensated crystal oscillators / A. Kosykh, A. Lepetaev, A. Roy // *Proceedings of 14-th European Frequency and Time Forum*. Torino, Italy. 2000, pp. 280-284.
9. Analog Devices, Inc. All rights reserved. U.S.A. DATA SHEET: AD9959 [Електронний ресурс] Rev. B. – 07/08. – Режим доступу до матеріалу: www.analog.com.

References

1. Vorohovsky J. L. Precision quartz resonators and oscillators for modern electronic systems. *Electronics: NTB*, № 1. - 2010, - pp. 34-38.
2. Belov L. Reference generators. *Electronics: Science, Technology, Business*. - 2004. - № 6. - pp. 38-44.
3. Kolpakov F., Pidchenko S. (2011). *Theory and fundamentals implementation of invariant piezoresonance systems*, National Aerospace University (KhAI), ISBN 978-966-662-222-1, Kharkov, Ukraine.
4. Zelensky A.A. , S.K. Pidchenko, A.A. Taranchuk The principles of developing invariant piezoresonance units with controlled dynamics. *Eastern European journal of enterprise technologies*. Kharkov. Technological center, 2012. Vol. 6/11 (60). – pp. 17-22.
5. Alexander A. Zelensky , S.K. Pidchenko, A.A. Taranchuk. Mathematical Model of Multi-Frequency Piezoresonance Oscillation System. *Communications*. Science Publishing Group: NEW YORK, U.S.A., 2013. – Vol. 1, No. 1. – pp. 1-8.
6. Pidchenko S., Taranchuk A. (2004). Identification of the thermal state of the crystal at the stage of oscillation, *Radioelectronic and computer system*, Vol. 3, National Aerospace University (KhAI), ISSN 1814-4225, Kharkov, Ukraine, pp. 36-42.
7. Stofanik V., Balaz I., Minarik M. An improvement in the temperature-compensated DDS. *Proc. of the 2001 IEEE/EIA International Frequency Control Symposium*. P. 662 – 664.
8. Kosykh A., Lepetaev, A. Roy Theoretical and experimental investigation of specific components in output signal of digitally compensated crystal oscillators. *Proceedings of 14-th European Frequency and Time Forum*. Torino, Italy. 2000, pp. 280-284.
9. Analog Devices, Inc. All rights reserved. U.S.A. DATA SHEET: AD9959 [E-resource] Rev. B. - 07/08. - Mode of access to the material: www.analog.com.

Надійшла до редакції
15.6.2013 р.