

**ВІБРОКОМПЕНСАЦІЯ НЕСТАБІЛЬНОСТІ ЧАСТОТИ
КВАРЦОВИХ ГЕНЕРАТОРІВ В РЕЖИМІ БАГАТОЧАСТОТНОГО
ЗБУДЖЕННЯ П'ЄЗОРЕЗОНАТОРА**

*Підченко С. К.¹, к.т.н., доцент; Таранчук А. А.¹, к.т.н., доцент;
Стецюк В. І.¹, к.т.н., Хоптинський Р. П.², аспірант*

¹*Хмельницький національний університет, Хмельницький, Україна,*

²*Національна академія Державної прикордонної служби України,
allatr@ukr.net*

**VIBRATIONAL COMPENSATION CRYSTAL OSCILLATOR FREQUENCY
INSTABILITY IN MULTIFREQUENCY EXCITATION MODE PIEZOELECTRIC
RESONATOR**

*S. Pidchenko¹, PhD, Associate Professor; A. Taranchuk¹, PhD, Associate Professor;
V. Stetsyuk¹, PhD; R. Khoptinskiy², Postgraduate Student*

¹*Khmelnytsky National University, Khmelnytsky, Ukraine,*

²*National academy of the State Border Guard Service of Ukraine*

Вступ

Невід'ємною особливістю сучасного розвитку радіоелектронних пристроїв і телекомунікаційних систем є широке використання п'єзореzonансних пристроїв (ПРП): кварцових резонаторів (КР) і кварцових генераторів (КГ); кварцових фільтрів; п'єзореzonансних перетворювачів фізичних величин. Сучасні ПРП працюють у складних експлуатаційних умовах впливу не тільки істотних нестационарних теплових, але і вібраційних дестабілізуючих факторів, що призводить до погіршення короткочасної стабільності ПРП через паразитну частотну модуляцію їх вихідних сигналів [1]. Підвищення стабільності п'єзореzonансних пристроїв, що працюють в умовах зовнішніх механічних дестабілізуючих впливів на теперішній час є актуальною задачею та предметом багатьох теоретичних і експериментальних досліджень [2–11].

Метою роботи є підвищення стабільності п'єзореzonансних автогенераторних пристроїв в умовах зовнішніх дестабілізуючих впливів вібраційних прискорень за рахунок розширення інформаційного об'єму вихідного сигналу ПРП в режимі багаточастотного збудження кварцового резонатора.

Вібраційна нестабільність коливань кварцових генераторів

Відомо, що при прикладенні синусоїдального прискорення до кварцового генератора його вихідний сигнал набуває зміни частоти у відповідності до прикладеного модулюючого навантаження, при цьому нелінійність характеристик проявляється тільки при великих рівнях прискорення (вище 50 g) і для типових КР пов'язана з властивостями міцності

п'єзоелемента [1].

Представимо напругу частотно-модульованого сигналу на виході кварцового генератора (КГ) у вигляді нескінченного ряду функцій Бесселя [1–3]:

$$V(t) = V_0 \left[J_0(\beta) \cos(2\pi f_0 t) + J_1(\beta) \cos(2\pi(f_0 + f_G) t) + J_1(\beta) \cos(2\pi(f_0 - f_G) t) + J_2(\beta) \cos(2\pi(f_0 + 2f_G) t) + J_2(\beta) \cos(2\pi(f_0 - 2f_G) t) + \dots \right] \quad (1)$$

де $\beta = \Delta f_G / f_0 = (\mathbf{G} \cdot \mathbf{A}) f_0 / f_G$ — індекс модуляції;

\mathbf{G} — вектор чутливості до вібраційного прискорення, модуль якого $|\mathbf{G}| = \sqrt{G_x^2 + G_y^2 + G_z^2}$ виражається через коефіцієнти чутливості G_x, G_y, G_z вздовж кристалографічних осей п'єзоелемента x, y, z ;

\mathbf{A} — вектор прискорення, складові якого a_x, a_y, a_z дорівнюють проекціям на осі x, y, z ;

Δf_G — сумарний зсув частоти КР (з урахуванням принципу суперпозиції) під дією вібраційного прискорення:

$$\Delta f_G = \Delta f_x + \Delta f_y + \Delta f_z = (G_x a_x + G_y a_y + G_z a_z) f_0 = (\mathbf{G} \cdot \mathbf{A}) f_0. \quad (2)$$

Перший доданок в (2) — коливання з центральною частотою f_0 та амплітудою V_0 , яка співставляється з нульовим коефіцієнтом Бесселя $J_0(\beta)$. Коливання бічних частот за умови вібраційного впливу $f_0 + n f_G, f_0 - n f_G$ співставляються з відповідними коефіцієнтами $J_n(\beta)$, де $n = 1, 2, 3, \dots$. Тоді загальний фазовий шум можна записати через співвідношення амплітуд індукованих бічних частот та центральної частоти:

$$e_G^n = (J_n(\beta) / J_0(\beta))^2 \quad (3)$$

або у децибелах (дБн) по відношенню до амплітуди коливання центральної частоти

$$\ell_G^n (\text{дБн}) = 20 \log(J_n(\beta) / J_0(\beta)). \quad (4)$$

Для опорних генераторів з малим індексом модуляції $\beta < 0,1$ і які піддані впливу вібрації з прискоренням до $10 g$, за умови варіацій частот до декілька герц значення коефіцієнтів $J_n(\beta)$ наближено визначаються як:

$$J_0(\beta) = 1; J_1(\beta) = \beta / 2; J_n(\beta) = 0, n > 2 \quad \forall \beta < 0,1, \quad (5)$$

тобто для невеликих індексів модуляції вкладом вищих $n > 2$ бічних складових можна знехтувати. Таким чином, з урахуванням (1), (2) та (3) отримуємо:

$$\ell_G^1(\beta) \approx 20 \cdot \log((\mathbf{G} \cdot \mathbf{A}) f_0 / (2 f_G)), \quad (6)$$

Типовий спектр сигналу на виході КГ з номінальною частотою 5 МГц та вібраційною чутливістю $2 \cdot 10^{-9}/g$ [1], підданого впливу синусоїдальної вібрації з частотами 5 Гц, 25 Гц і 50 Гц, представлений на рис. 1. Слід відзначити, що внаслідок лінійності КР за низького рівня вібрацій, реакції на синусоїдальні прискорення є незалежними.

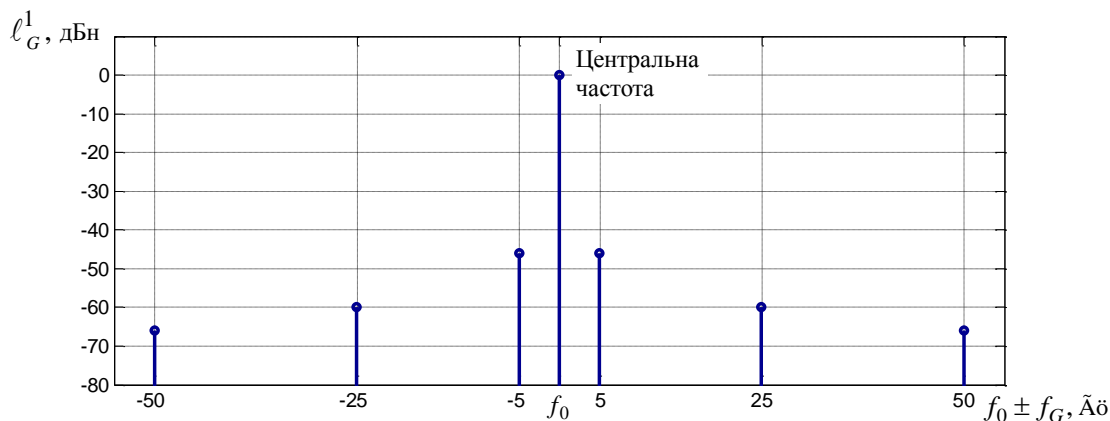


Рис. 1. Типовий спектр сигналу КГ, підданого синусоїдальній вібрації з частотами 5 Гц, 25 Гц і 50 Гц

Для кварцових генераторів з перенесення спектру шляхом множення частоти вихідного сигналу вібраційний зсув частоти (2) можна представити як

$$\Delta f_G = (\mathbf{G} \cdot \mathbf{A}) N f_0, \quad (7)$$

де N — коефіцієнт множення.

Як слідує з (7) для КГ з перенесенням спектру індекс модуляції β збільшується в N разів, а фазовий шум після множення у відповідності до (6) збільшується на $20 \log N$. При цьому, якщо індекс модуляції β більше, ніж 0,1 зроблені наближення (6) не є дійсними [2-3].

На рис. 2 представлений типовий спектр сигналу на виході КГ з номінальною частотою 1575 МГц ($N=315$) та вібраційною чутливістю $2 \cdot 10^{-9}/g$.

Видно, що в даному випадку, для вихідної частоти 1575 МГц величина ℓ_G^1 набагато більше в порівнянні з першим випадком (рис. 1) для тих же рівня та частот вібраційних впливів. При цьому, амплітуда бічних складових спектру навіть більше, ніж центральної частоти (рис. 2), що є наслідком суттєвого збільшення індексу модуляції β в результаті множення початкової частоти 5 МГц.

У більшості випадків опорні КГ піддаються прискоренню у вигляді вібраційних впливів, випадковим чином розподілених за діапазонами частоти, фази і амплітуди [1-3,8,9].

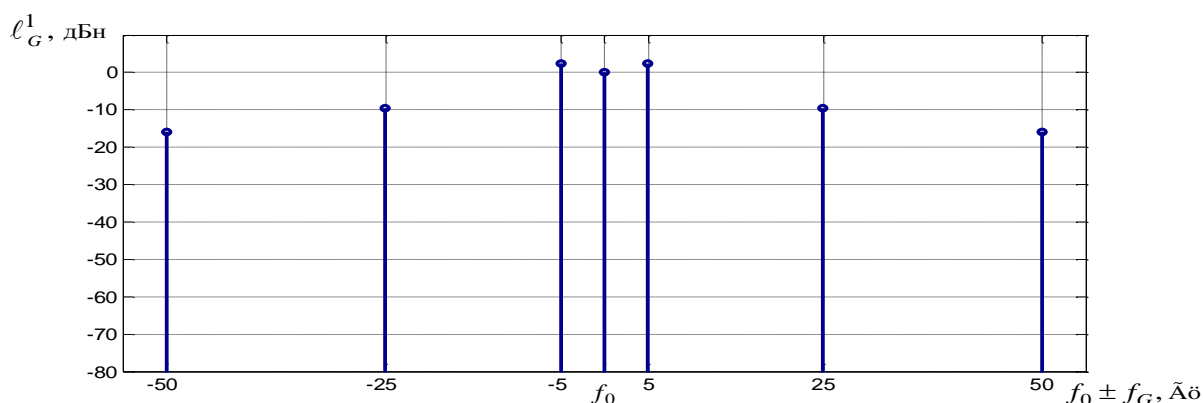


Рис. 2. Типовий спектр сигналу КГ 1575 МГц, підданого синусоїдальній вібрації з частотами 5 Гц, 25 Гц і 50 Гц

За умови малих значень індексу модуляції коефіцієнт ℓ_G пов'язаний з $S_G(f)$:

$$\ell_g = S_G / (2f_G^2) \quad (9)$$

Таким чином, для випадкових вібрацій

$$\ell_g^1 = (|\mathbf{G}|f_0)^2 A(f) / (2f_G^2), \quad (10)$$

де $A(f)$ — спектральна щільність флуктуацій потужності прискорення.

Результати розрахунків у відповідності до (10) рівня бічних складових кварцового генератора на 10 МГц з вібраційною чутливістю $|\mathbf{G}|=1 \cdot 10^{-9}/g$ і максимальної девіацією частоти 0,01 Гц представлені на рис. 3. Розрахунки проведено для типового спектру випадкової вібрації літака, який може бути апроксимований кусочно-лінійною функцією $A(f)$ [$g^2/\text{Гц}$]: $A_1(f)=0,04$, $5 < f_G < 220 \text{ Гц}$; $A_2(f)=0,07 \cdot (f_G/300)^2$, $220 < f_G < 300 \text{ Гц}$; $A_3(f)=0,07$, $300 < f_G < 1000 \text{ Гц}$; $A_4(f)=0,07 \cdot (f_G/1000)^{-2}$, $1000 < f_G < 2000 \text{ Гц}$ [2]. Видно, що в межах діапазону вібрацій спостерігається різке (до 45 дБ) зростання фазового шуму КГ, а за границями частотного діапазону вібрації фазовий шум ідентичний шуму кварцового генератора, не підданого прискоренню.

В сучасних цифрових системах фазовий шум КГ описується терміном «фазовий джиттер» (тремтіння фази), який інтегрований в пропускну здатність системи, при цьому потужність флуктуацій фазового шуму в діапазоні частот від f_1 до f_2 визначається як

$$\varphi_n^2 = \int_{f_1}^{f_2} S_\varphi(f) df, \quad (11)$$

де S_φ спектральна щільність фази, що дорівнює 2ℓ в смузі частот від f_1 до f_2 .

Фазовий шум кварцового генератора (рис. 3) без урахування вібрацій-

ного впливу складає: $\ell(f) = 1 \cdot 10^{-10} / f^2$, $f \leq 1$ кГц; $\ell(f) = 1 \cdot 10^{-16}$, $f > 1$ кГц. Тоді потужність флуктуацій в смузі частот від 1 Гц до 2000 Гц

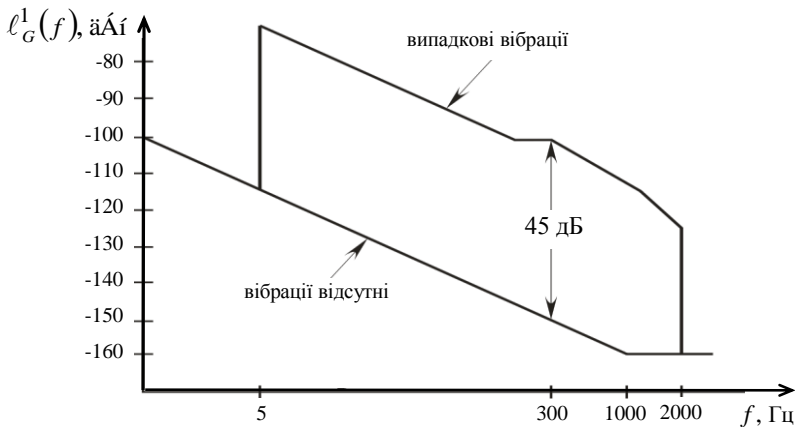


Рис. 3. Вібраційно-індукований фазовий шум кварцового генератора

відповідно до (11) знаходиться в межах

$$\phi_n^2 \approx 2 \cdot 10^{-10} \text{ рад}^2$$

$$(\phi_n = 1,41 \cdot 10^{-5} \text{ рад}).$$

В свою чергу, для генератора, який піддається впливу вібрації (рис. 3) сумарний фазовий шум дорівнює

$$\phi_{nG}^2 = 8 \cdot 10^{-7} \text{ рад}^2$$

$$(\phi_{nG} = 8,95 \cdot 10^{-4} \text{ рад}),$$

що для середньоквадратичного відхилення ϕ_{nG} приблизно в 60 разів більше, ніж у випадку відсутності вібрації.

Багаточастотно-функціональний метод віброкомпенсації нестабільності частоти кварцових генераторів

На основі проведених досліджень поведінки п'єзореzonансних пристроїв під дією зовнішніх вібраційних впливів, запропонована структура віброкомпенсованої багаточастотної автоколивальної системи на базі двопетльової імпульсної системи ДІФАПЧ (рис. 4), яка забезпечує стійкий двочастотний режим коливань з вихідними частотами $f_{вих1}$, та $f_{вих2}$ [1,4-7].

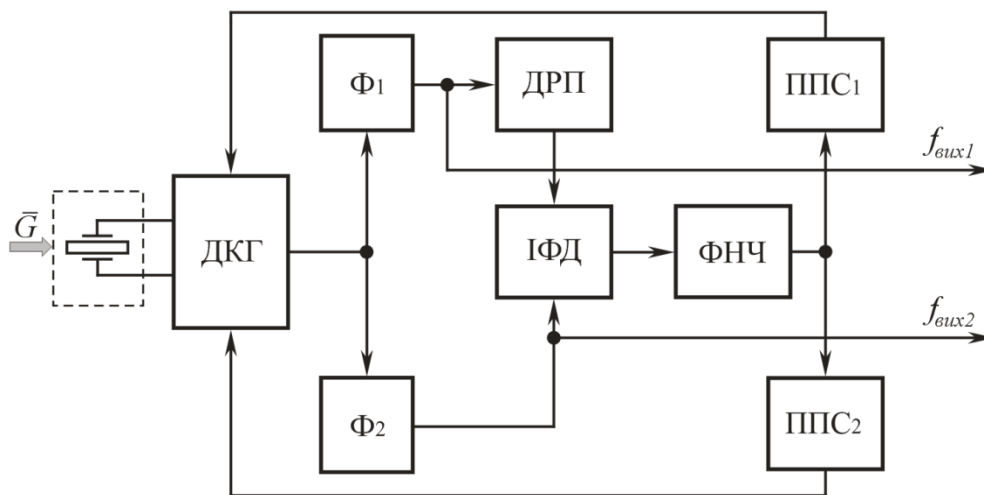


Рис. 4. Схема віброкомпенсації кварцового генератора

ДКГ — двочастотний кварцовий генератор; $\Phi_{1,2}$ — фільтри; ІФД — імпульсний фазовий детектор; ДРП — дробово-раціональний перетворювач; ФНЧ — фільтр низьких частот; ППС_{1,2} — підсилювачі постійного струму

Збудження ПР у двомодовому режимі дозволяє позбавитись від градіє-

нтиних похибок визначення дестабілізуючого сигналу. В запропонованій схемі віброкомпенсації частоти f_1 і f_2 сигналу з виходу двочастотного кварцового генератора ДКГ, які поступають через фільтри Φ_1 і Φ_2 на входи ІФД, записуються у вигляді

$$\begin{aligned} f_1 &= (M/N)f_{01} + (M/N)a_{1G}G \\ f_2 &= f_{02} + a_{2G}G \end{aligned} \quad (12)$$

де a_{1G} , a_{2G} — коефіцієнти вібраційної чутливості резонансних частот ПР; G — вібраційний сигнал; M/N — коефіцієнт перетворення частоти f_1 дробово-раціонального перетворювача ДРП, який вибирається із умови $M/N f_{01} \approx f_{02}$.

Для імпульсної системи ДІФАПЧ в режимі синхронізму частоти на входах ІФД дорівнюють:

$$f_{вих2} = (M/N)f_{вих1} = f_1 = f_2 = f_{02} + \frac{M}{N} \cdot \frac{a_{2G}W_1 - a_{1G}W_2}{(M/N)W_1 - W_2} G. \quad (13)$$

За умови використання параметрів W_1 і W_2 кола керування ДІФАПЧ, які відповідають умові

$$W_1/W_2 = a_{1G}/a_{2G}, \quad (14)$$

вихідні частоти віброкомпенсованого генератора $f_{вих1}$ і $f_{вих2}$, як видно з (14), у ідеальному випадку не будуть залежати від вібрації. Похибка компенсації визначається за формулою

$$\begin{aligned} \delta f_{вих1} &= \frac{1}{f_{вих1}} \cdot \frac{1}{(M/N)W_1 - W_2} \left[W_1W_2 \left(\frac{M}{N} a_{1G} - a_{2G} \right) \times \right. \\ &\times \left. (\delta W_1 - \delta W_2) / \left(\frac{M}{N} W_1 - W_2 \right) + (a_{2G}W_1 \cdot \delta a_{2G} - a_{1G}W_2 \cdot \delta a_{1G}) \right]. \end{aligned} \quad (15)$$

Використовуючи в двочастотного КГ п'єзрезонатор CR – 729 SC – зрізу, який має на основній моді коливаль (5 МГц) і третій механічній гармоніці наступні характеристики: $a_{2G}=6,05 \cdot 10^{-3}$ Гц/г; $\delta a_{2G}=2 \cdot 10^{-2}$; $a_{1G}=11,85 \cdot 10^{-3}$ Гц/г; $\delta a_{1G}=10^{-2}$ і для $W_1=300$ Гц/В; $\delta W_1=2 \cdot 10^{-3}$; $W_2=153,2$ Гц/В; $\delta W_2=10^{-3}$, отримуємо $\delta f_{вих1}=3,7 \cdot 10^{-4}$ Гц/г $\times G/f_{вих1} = 2,7 \cdot 10^{-11}/g \times G$, тобто нестабільність частоти КГ за рахунок дії вібрації зменшується у 32 рази [1,7,11].

Висновки

Отримані результати показують, що вібраційно - індуковані шуми різко зростають для ПРП НВЧ діапазонів радіочастот (п'єзрезонансних пристроїв з перенесенням спектру). При цьому фазові помилки можуть досягати десятих часток радіан, що спричиняє істотний негативний вплив на ефективність систем, які використовують фазову модуляцію або ФАПЧ.

Використання схем компенсації зовнішніх віброчастотних впливів на основі багаточастотного збудження кварцового резонатора дозволяє знизити вібротехнічну чутливість ПРП більш, ніж у 30 разів без істотних конструктивно-технологічних витрат, що дозволяє істотно розширити сферу їх функціонального застосування.

Перелік посилань

1. Колпаков Ф. Ф. Теорія і реалізаційні основи інваріантних п'єзореzonансних коливальних систем / Ф.Ф. Колпаков, С. К. Підченко. – Харків: Нац. аерокосм. ун-т. “Харк. авіац. ін-т.”, 2011. – 327 с. – Режим доступу: <http://k504.xai.edu.ua/fcounter.php?book=html/library/Kolpakov/TiROIPKS.pdf>
2. Filler R. L. The Acceleration Sensitivity of Quartz Crystal Oscillators // IEEE. Transactions on ultrasonics, ferroelectrics, and frequency control / R. L. Filler. – 1988. – Vol. 35, No 3. – pp. 297 - 305.
3. Vig J. R. Quartz crystal resonators and oscillators for frequency control and timing applications. A Tutorial // NASA STI/Recon Technical Report N, 95, 19519. – Режим доступу: http://www.am1.us/Local_Papers/U11625 VIG-TUTORIAL.pdf
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. – 2012. – Vol. 6, No. 11. – pp. 17-22.
5. Zelensky A. A. Mathematical Model of Multi-Frequency Piezoresonance Oscillation System / A.A. Zelensky, S.K. Pidchenko, A.A. Taranchuk // Communications. – 2013. – Vol. 1, No 1. – pp. 1-8.
6. Зеленский А.А. Инвариантные пьезорезонансные устройства с управляемой динамикой / А.А. Зеленский, С.К. Пидченко // Физические основы приборостроения. – Москва: Научно-технологический центр уникального приборостроения РАН. – 2013. – Т. 2, № 2. – с. 38-49.
7. Pidchenko S. Digital Synthesizer With Temperature And Vibration Compensation Of Frequency Instability /S. Pidchenko, A. Taranchuk, V. Stecjuk // Modern Problems of Radio Engineering, Telecommunication and Computer Science : Proc. of the Int. Conf. TCSET'2014 ; Feb. 25, 2014. – Lviv-Slavske, Ukraine. – pp. 291-292.
8. Підченко С. К. Математичне моделювання силочастотних характеристик кварцових резонаторів / С.К. Підченко, А.А. Таранчук, В.І. Стецюк // Радіоелектронні і комп'ютерні системи. – 2011. – № 2(50). – с. 27-31.
9. Підченко С. К. Лабораторний стенд для дослідження характеристик віброчутливості кварцових резонаторів / С.К. Підченко, А.А. Таранчук, В.І. Стецюк // Вісник Вінницького політехнічного інституту. – 2012. – № 1. – С. 187-190.
10. Zelenskiy A.A. Multifrequency Core Structure of an Invariant Quartz Oscillatory System / A.A. Zelenskiy, S.K. Pidchenko, A.A. Taranchuk // Proceedings of the XIth International Conference TCSET' 2012, February 21-24, Lviv-Slavske, Ukraine. – 2012. – P. 125.
11. Патент України 86668, МПК H03L9/00. Пристрій генерування / С. К. Підченко, А. А. Таранчук, В. І. Стецюк ; № U201307653 ; заявл. 17.06.2013; опубл. 10.01.2014, Бюл. № 1.

References

1. Kolpakov F. F. and Pidchenko S. K. (2011) *Teoriia i realizatsiini osnovy invariantnykh p'iezezonansnykh kolyvalnykh system* [Implementation theory and the foundations of invariant resonant piezoelectric oscillatory systems]. Kharkiv, 327p. ISBN 978-966-662222-1

2. Filler R. L. (1988) The Acceleration Sensitivity of Quartz Crystal Oscillators. *IEEE Transactions on ultrasonics, ferroelectrics, and frequency control*. Vol. 35, No 3. – pp. 297 - 305.
3. Vig, J. R. (1994) Quartz crystal resonators and oscillators for frequency control and timing applications. A tutorial. NASA STI/Recon Technical Report N 95 : 19519. Available at: http://www.am1.us/Local_Papers/U11625 VIG-TUTORIAL.pdf
4. Zelensky A. A., Pidchenko S. K. and Taranchuk A. A. (2012) The principles of developing invariant piezoresonance units with controlled dynamics. *Eastern European journal of enterprise technologies*. Vol. 6, No. 11, pp. 17-22.
5. Zelensky A. A., Pidchenko S. K. and Taranchuk A. A. (2013) Mathematical Model of Multi-Frequency Piezoresonance Oscillation System. *Communications*. Vol. 1, No. 1, pp. 1-8.
6. Zelenskiy A. A. and Pidchenko S.K. (2013) Invariant piezoresonance units with controlled dynamics. *Physical Bases of Instrumentation*. Vol. 2, No 2, pp. 38-49. (In Russian)
7. Pidchenko S., Taranchuk A. and Stecjuk V. (2014) Digital Synthesizer With Temperature And Vibration Compensation Of Frequency Instability. *Modern Problems of Radio Engineering, Telecommunication and Computer Science TCSET'2014*, pp. 291-292.
8. Pidchenko S. K., Taranchuk A. A. and Stetsyuk V. I. (2011) Mathematical modeling force-frequency characteristics of the quartz resonators. *Radioelektronni i komp'uterni systemy*. No 2 (50), pp. 27-31.
9. Pidchenko S. K., Taranchuk A. A. and Stetsiuk V. I. (2012) Laboratornyi stand dlia doslidzhennia kharakterystyk vibrochutlyvosti kvartsovykh rezonatoriv [Laboratory stand to study the characteristics of quartz resonators to vibration] *Visnyk of Vinnytsia Politechnical Institute*. No 1, pp. 187-190.
10. Zelenskiy A. A., Pidchenko S. K. and Taranchuk A. A. (2012) Multifrequency Core Structure of an Invariant Quartz Oscillatory System. *Modern Problems of Radio Engineering, Telecommunication and Computer Science (TCSET' 2012)*, pp. 125.
11. Pidchenko S. K., Taranchuk A. A.; Stetsiuk V. I. (2014) *Prystrii heneruvannia* [Oscillation devise] Patent UA86668.

Підченко С. К., Таранчук А. А., Стецюк В. І., Хоптинський Р. П. Віброкомпенсація нестабільності частоти кварцових генераторів в режимі багаточастотного збудження п'єзореzonатора. Запропонований ефективний метод підвищення віброчастотної стабільності п'єзореzonансних пристроїв, заснований на принципах компенсації зовнішніх віброчастотних впливів за рахунок розширення інформаційного об'єму вихідних сигналів ПРП в режимі багаточастотного збудження кварцового резонатора. Проведений аналіз спектра частотно-модульованого сигналу кварцових генераторів декаметрового і дециметрового діапазонів радіочастот в умовах синусоїдальних і випадкових широкосмугових механічних дестабілізуючих впливів. Наведено кількісні оцінки рівнів побічних складових спектра вихідного сигналу для типових параметрів кварцових генераторів, а також фазового джиттера при використанні КГ в цифрових системах. Показано, що використання запропонованого методу компенсації зовнішніх віброчастотних впливів дозволяє знизити вібромеханічну чутливість ПРП більш, ніж у 30 разів без істотних конструктивно-технологічних витрат.

Ключові слова: кварцовий генератор, кварцовий резонатор, вібрація, фазовий шум, нестабільність частоти.

Пидченко С. К., Таранчук А. А., Стецюк В. І., Хоптинский Р. П. **Виброкомпенсация нестабильности частоты кварцевых генераторов в режиме многочастотного возбуждения пьезорезонатора.** Предложен эффективный метод повышения виброчастотной стабильности пьезорезонансных устройств, основанный на принципах компенсации внешних виброчастотных воздействий за счет расширения информационного объема исходных сигналов ПРУ в режиме многочастотного возбуждения кварцевого резонатора. Проведен анализ спектра частотно-модулированного сигнала кварцевых генераторов декаметрового и дециметрового диапазонов радиочастот в условиях синусоидальных и случайных широкополосных механических дестабилизирующих воздействий. Приведены количественные оценки уровней побочных составляющих спектра выходного сигнала для типовых параметров кварцевых генераторов, а также фазового джиттера при использовании КГ в цифровых системах. Показано, что использование предложенного метода компенсации внешних виброчастотных воздействий позволяет снизить вибромеханическую чувствительность ПРУ более, чем в 30 раз без существенных конструктивно-технологических затрат.

Ключевые слова: кварцевый генератор, кварцевый резонатор, вибрация, фазовый шум, нестабильность частоты.

*S. Pidchenko, A. Taranchuk, V. Stetsyuk, R. Khoptinskiy. **Vibrational compensation crystal oscillator frequency instability in multifrequency excitation mode piezoelectric resonator***

Introduction. The effective method of vibrational frequency stability increasing of the piezoresonant devices based on the principles of compensating of external vibrational frequency influences due to extension of information volume of PRU original signals in a mode of the QR multifrequency excitation is offered.

The results. The analysis of a frequency modulated signal range of crystal oscillators of HF and UHF RF spectrums in the conditions of sinusoidal and accidental broadband mechanical destabilizing actions is carried out. The quantitative estimates of collateral spectrum components levels of an output signal for standard parameters of crystal oscillators, and also phase jitter are given using XO in digital systems.

Conclusions. It is shown that use of the offered method of external vibrational frequency influences compensating allows to reduce vibrational mechanical sensitivity of PRU more than by 30 times without essential constructive and technological expenses.

Keywords: quartz oscillators, quartz crystal, vibration, phase noise, frequency instability.