



<http://dx.doi.org/10.35596/1729-7648-2025-23-2-35-43>

УДК 621.373.5

УМЕНЬШЕНИЕ ФАЗОВЫХ ШУМОВ ВЫСОКОСТАБИЛЬНЫХ КВАРЦЕВЫХ ГЕНЕРАТОРОВ ПРИ ВОЗДЕЙСТВИИ ВИБРАЦИИ ПОСРЕДСТВОМ ТРОСОВЫХ ВИБРОИЗОЛЯТОРОВ

В. Н. КИЙКО, Н. М. НАУМОВИЧ, М. В. ДАВЫДОВ, В. И. ЖУРАВЛЁВ

*Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники
(Минск, Республика Беларусь)*

Аннотация. Рассмотрено влияние на фазовые шумы кварцевых генераторов случайных вибрационных воздействий. Для уменьшения этих шумов предлагается использовать тросовый виброизолятор ВИ 0,8/0. Проведены экспериментальные исследования, в ходе которых оценивалась эффективность виброизоляторов по осям X , Y и Z . Полученные результаты демонстрируют снижение фазовых шумов при различных вибрационных режимах. Представлены результаты анализа воздействия спектральной плотности вибраций и резонансных частот, подтверждающие улучшение стабильности частоты кварцевых генераторов при использовании тросовых виброизоляторов. В результате измерений установлено, что применение тросовых виброизоляторов позволяет снизить фазовые шумы на 15–30 % в зависимости от частотного диапазона и направления действия случайной вибрации. Виброизоляторы наиболее эффективны в диапазоне частот более 150 Гц для осей X и Z , и более 300 Гц – для Y . Полученные данные подтверждают, что виброизоляторы могут значительно улучшить стабильность работы кварцевых генераторов в условиях вибрации, начиная с определенной частоты воздействия.

Ключевые слова: вибрация, тросовый виброизолятор, кварцевый генератор, спектральная плотность вибрации, резонансные частоты.

Конфликт интересов. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Для цитирования. Уменьшение фазовых шумов высокостабильных кварцевых генераторов при воздействии вибрации посредством тросовых виброизоляторов / В. Н. Кийко [и др.] // Доклады БГУИР. 2025. Т. 23, № 2. С. 35–43. <http://dx.doi.org/10.35596/1729-7648-2025-23-2-35-43>.

REDUCTION OF PHASE NOISE OF HIGHLY STABLE QUARTZ OSCILLATORS UNDER VIBRATION BY MEANS OF CABLE VIBRATION ISOLATORS

VADIM N. KIYKO, NIKOLAY M. NAUMOVICH, MAKSIM V. DAVYDOV,
VADIM I. ZHURAVLIOV

Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics (Minsk, Republic of Belarus)

Abstract. The influence of random vibration effects on the phase noise of quartz generators is examined. To reduce this noise, it is proposed to use a VI 0.8/0 cable vibration isolator. Experimental studies were conducted to evaluate the efficiency of vibration isolators along the X , Y , and Z axes. The results demonstrate a decrease in phase noise under various vibration modes. The results of the analysis of the effect of the spectral density of vibrations and resonant frequencies are presented, confirming the improvement of the frequency stability of quartz oscillators when using cable vibration isolators. As a result of measurements, it was found that the use of cable vibration isolators allows for a 15–30 % decrease in phase noise depending on the frequency range and direction of random vibration. Vibration isolators are most effective in the frequency range above 150 Hz for the X and Z axes, and above 300 Hz for the Y axis. The data obtained confirm that vibration isolators can significantly improve the stability of quartz oscillators under vibration conditions, starting from a certain frequency of action.

Keywords: vibration, cable vibration isolator, quartz generator, spectral density of vibration, resonant frequencies.

Conflict of interests. The authors declare no conflict of interests.

For citation. Kiyko V. N., Naumovich N. M., Davydov M. V., Zhuravliov V. I. (2025) Reduction of Phase Noise of Highly Stable Quartz Oscillators Under Vibration by Means of Cable Vibration Isolators. *Doklady BGUIR*. 23 (2), 35–43. <http://dx.doi.org/10.35596/1729-7648-2025-23-2-35-43> (in Russian).

Введение

Стабильность частоты при воздействии внешних дестабилизирующих факторов, одним из которых является вибрация, – ключевое требование к кварцевым генераторам, поскольку он определяет точность и разрешающую чувствительность радиолокационных и радионавигационных систем, погрешность измерений измерительных систем, качество и надежность систем связи [1]. Стабильность частоты генератора при воздействии вибрации характеризуется его G-чувствительностью (относительное изменение выходной частоты генератора при воздействии ускорения 1 g). Когда к генератору прикладывается ускорение, его фазовые шумы определяются именно G-чувствительностью, которая является векторной величиной, зависящей от направления ускорения относительно трех взаимно перпендикулярных осей генератора (X , Y , Z). Величина и ориентация вектора G-чувствительности определяются измерением отдельных компонент по осям X , Y , Z . Следует отметить, что стабильность частоты кварцевого генератора зависит от различных факторов, среди которых уровень виброускорения, приложенного к генератору, который может включать в себя постоянное ускорение, вибрацию, удар, смещение, наклон или вращение при использовании их в аппаратуре, устанавливаемой на подвижных носителях [2].

Снижение реакции кварцевых генераторов на воздействие вибраций улучшает их фазовые характеристики и характеристики радиосистем в целом. В статье для виброзащиты кварцевых генераторов рассмотрено использование тросовых виброизоляторов ВИ 0,8/0 [3].

Методика исследования

Характеристики кварцевого генератора во многом зависят от технологических и конструктивных достижений по изготовлению кварцевого резонатора, высокая добротность которого обеспечивает низкий фазовый шум. Однако динамический фазовый шум, демонстрируемый кварцевым генератором в условиях высокой вибрации, превышает его фазовый шум в состоянии покоя – это так называемая G-чувствительность, которая отражает зависимость частоты генератора от приложенного ускорения [4]. Чем выше G-чувствительность, тем больше изменяется частота генератора при воздействии внешних ускорений. Для многих приложений требуется минимизация G-чувствительности для обеспечения стабильности работы генератора в условиях переменных внешних условий [5]. Сила ускорения, приложенная к кварцевому генератору, вызывает сдвиг частоты Δf , пропорциональный ускорению и зависящий от направления приложения силы [6], рассчитываемый по формуле:

$$\frac{\Delta f}{f_0} = G\bar{\alpha}, \quad (1)$$

где f_0 – частота кварцевого генератора без вибрации; $\bar{\alpha}$ – приложенное ускорение; G – вектор G-чувствительности.

Для оценки G-чувствительности кварцевого генератора к ускорениям существует множество методов. Обычно это делается для понимания того, как вибрации и механические ускорения могут влиять на стабильность и точность работы генератора. Один из наиболее часто используемых – метод, в котором для создания необходимого ускорения применяется вибростенд, позволяющий создавать вибрации (как гармонические, так и случайные) с различными амплитудами и частотами [7]. Изменения фазовых шумов не одинаковы при различных направлениях прикладываемых механических воздействий. Поэтому такие воздействия следует рассматривать в трех плоскостях.

При измерении фазовых шумов исследуемого кварцевого генератора использовалась схема стенда, приведенная в [3], с рядом доработок. В частности, в нее были добавлены:

– анализатор фазовых шумов, который позволил точно фиксировать изменения фазовых шумов при воздействии вибраций;

– источник питания, обеспечивающий стабильное напряжение для работы кварцевого генератора;

– кварцевый генератор, являвшийся объектом исследования и подвергавшийся вибрационным воздействиям в различных режимах.

Эксперимент проводился при температуре окружающей среды $(23 \pm 1)^\circ\text{C}$ и относительной влажности воздуха 40–50 %. Схема установки, с помощью которой измерялись фазовые шумы кварцевого генератора (без воздействия и при наличии вибраций), приведена на рис. 1. Кварцевый генератор устанавливался на рабочую платформу и подвергался воздействию широкополосной случайной вибрации, определяемой перед началом испытания. Параметры случайной вибрации стандартно устанавливались профилем спектральной плотности мощности (PSD) [8]. Следует отметить, что спектральная плотность вибраций на частотах менее 300 и более 1000 Гц изменяется по закону 3 дБ/октаву.

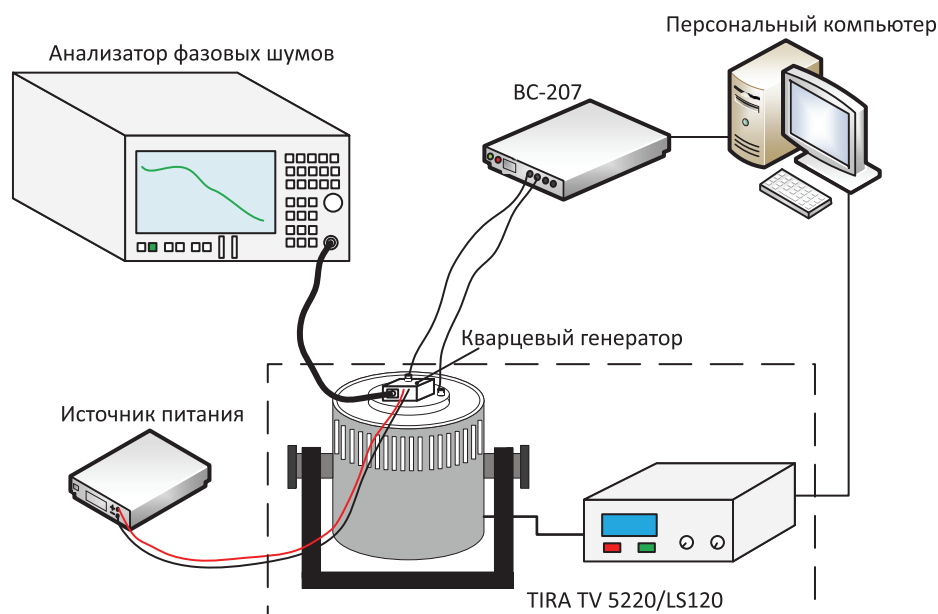


Рис. 1. Схема установки для измерения фазовых шумов:
BC-207 – система управления; TIRA TV 5220/LS120 – электродинамический вибростенд

Fig. 1. Installation diagram for measuring phase noise:
BC-207 – control system; TIRA TV 5220/LS120 – electrodynamic vibration stand

В качестве объекта исследований использовался кварцевый генератор Wenzel 501-24069A (номинальная частота – 100 МГц, напряжение питания – 12 В, выходной сигнал – синусоидальный, уровень выходного сигнала – 0 дБм). Данный генератор является одним из лучших среди доступных на рынке по фазовым шумам и G-чувствительности. Такой подход позволяет оценить эффективность рассматриваемых мероприятий по использованию разработанных виброизоляторов для уменьшения влияния вибраций на фазовые шумы генераторов. Уровень фазовых шумов измерялся анализатором FSWP26 фирмы Rohde & Schwarz.

Первым этапом исследования было изучение влияния случайной вибрации с заданной PSD на кварцевый генератор по осям X , Y , Z . Для измерения фазовых шумов под воздействием вибраций по осям X и Y использовался специальный кондуктор (рис. 2).

Результаты исследований

На рис. 3 приведены зависимости фазовых шумов кварцевого генератора Wenzel при отсутствии вибраций и при различных частотах вибраций вдоль осей X , Y , Z . Как видно из графиков, наиболее чувствительны к вибрациям оси Z и X , что приводит к увеличению фазовых шумов кварцевого генератора.

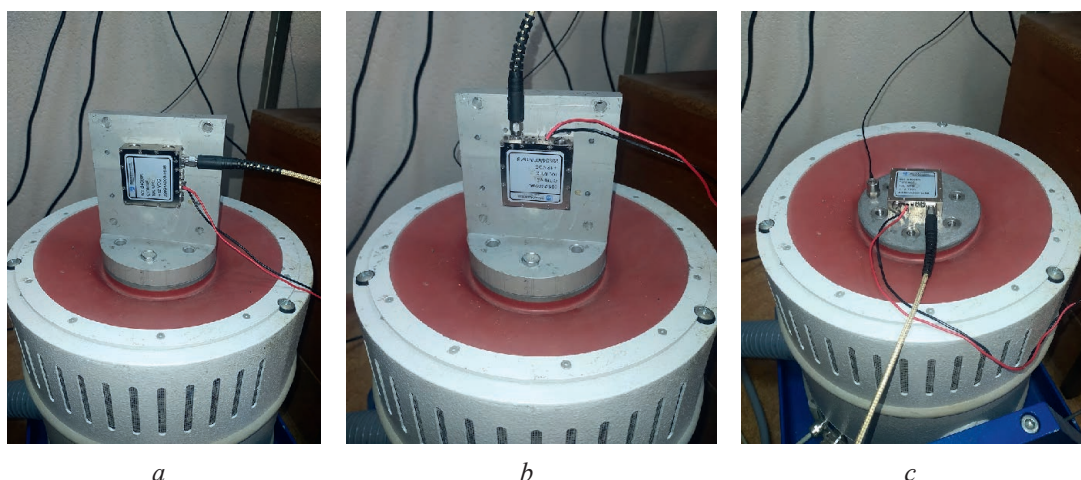


Рис. 2. Внешний вид генератора, установленного на вибростенд для проведения испытаний, при воздействии вибраций вдоль осей X (a), Y (b), Z (c)

Fig. 2. Appearance of the generator installed on a vibration stand for testing under the influence of vibrations along the axes X (a), Y (b), Z (c)

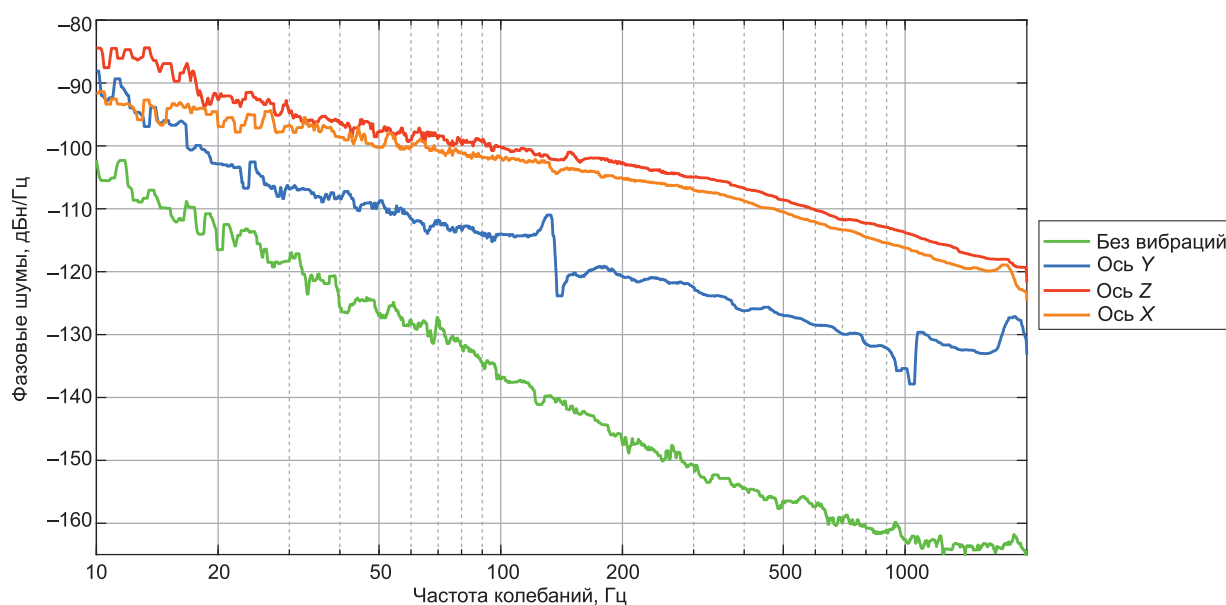


Рис. 3. Зависимость фазовых шумов кварцевого генератора Wenzel от частоты вибраций

Fig. 3. Dependence of phase noise of a Wenzel quartz oscillator on vibration frequency

Применение тросовых виброизоляторов – один из методов уменьшения фазовых шумов кварцевых генераторов. Такие виброизоляторы ослабляют испытываемую кварцевым генератором внешнюю вибрацию, которая может быть выше резонансной частоты системы изоляции, тем самым снижая результирующий динамический фазовый шум [5]. Этот тип виброизоляции увеличивает размеры, поскольку система должна включать в себя виброизоляторы, полезную нагрузку и внешний корпус, а также пространство для колебаний, чтобы все составляющие компоненты могли двигаться независимо друг от друга.

Для испытаний использовались тросовые восьмиветвевые виброизоляторы ВИ 0,8/0 [3], которые монтировались на кварцевый генератор. Генератор с присоединенными виброизоляторами устанавливался во внешний корпус, а он, в свою очередь, – на вибростенд для проведения испытаний (рис. 4).

Воздействие PSD на виброизолированный кварцевый генератор осуществлялось по осям X , Y , Z . При помощи акселерометра РСВ352С22, установленного на кварцевом генераторе, измерялся спектральный уровень вибраций. Измерение уровня вибраций виброизолированного кварцевого генератора при воздействии вибраций вдоль различных его осей необходимо для:

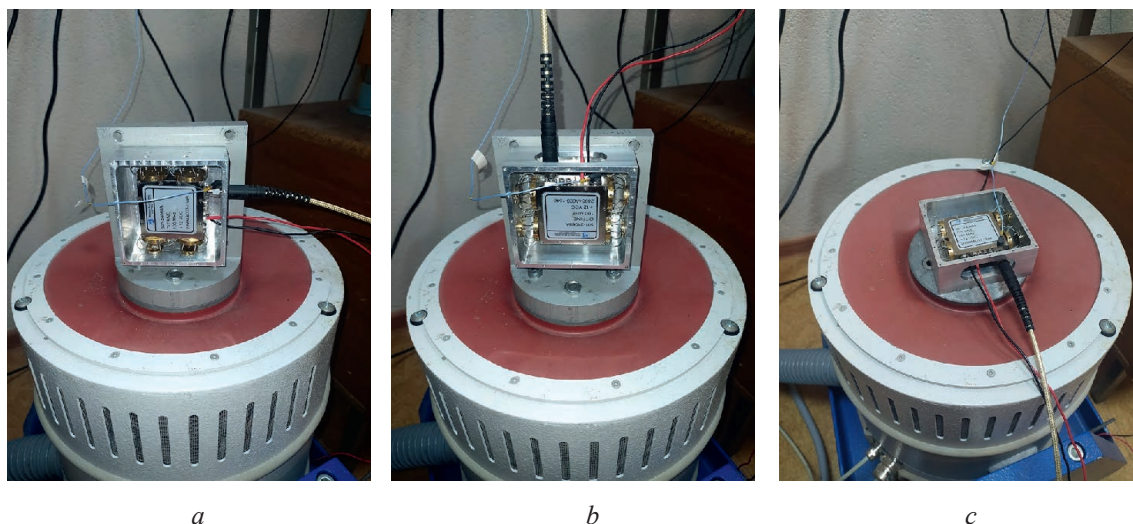


Рис. 4. Внешний вид виброизолированного генератора, установленного на вибростенде, для проведения испытаний при воздействии вибраций вдоль осей X (a), Y (b), Z (c)

Fig. 4. Appearance of a vibration-isolated generator installed on a vibration stand for testing when exposed to vibrations along the axes X (a), Y (b), Z (c)

– оценки эффективности виброизоляции, так как, измеряя уровень вибраций по осям X , Y , Z , можно определить, насколько эффективно виброизоляторы уменьшают вибрационные воздействия на кварцевый генератор. Это помогает оценить, как хорошо изоляторы справляются с поглощением или снижением вибраций, и выявить эффективность предложенной конструкции при различных направлениях воздействия вибраций, что важно для конкретного положения генераторов в реальных конструкциях [9];

– определения чувствительных направлений. Вибрации могут оказывать разное воздействие на генератор в зависимости от направления по осям. Например, вибрации вдоль одной оси могут вызывать более значительные отклонения частоты генератора, чем вдоль другой оси (рис. 3). Измерение уровня вибраций вдоль разных осей позволяет определить, какие направления наиболее критичны для стабильности работы генератора и где нужно усилить меры виброизоляции [4];

– идентификации резонансных частот. Вибрации могут вызывать резонансные явления, которые сильно влияют на стабильность частоты генератора. Измерение вибраций позволяет обнаружить резонансные частоты, где генератор наиболее подвержен влиянию внешних вибрационных воздействий. Это важно для корректной настройки системы виброизоляции [7];

– анализа фазовых шумов. Уровень вибраций напрямую влияет на фазовые шумы генератора. Измеряя вибрации, можно сопоставить их с фазовыми шумами, выявить корреляцию и понять, как изменение уровня вибраций по разным осям отражается на стабильности выходного сигнала генератора [5];

– оптимизации конструкции и настройки виброизоляторов. Результаты измерений позволяют оптимизировать их конструкцию и расположение относительно генератора для достижения максимальной эффективности виброизоляции. Это может включать выбор материалов, формы, а также способов крепления виброизоляторов [7].

В совокупности перечисленные измерения помогают обеспечить надежность и стабильность работы кварцевого генератора в условиях вибрационных воздействий, что критически важно для приложений, требующих высокой точности и стабильности его частоты. На рис. 5 представлены графические зависимости PSD от частоты (канал 2), регистрируемые вибропреобразователем PCB352C22 и являющиеся откликом на возмущающее воздействие.

Зависимости фазовых шумов виброизолированного кварцевого генератора от частоты вибраций при воздействии вибраций вдоль различных осей генератора приведены на (рис. 6). Как видно из рис. 6, a , b (оси X , Z), предлагаемые тросовые виброизоляторы ВИ 0.8/0 позволяют уменьшить уровень фазовых шумов, вызванных вибрациями, начиная со 150 Гц. По оси Y уменьшение уровня фазовых шумов начинается с 300 Гц.

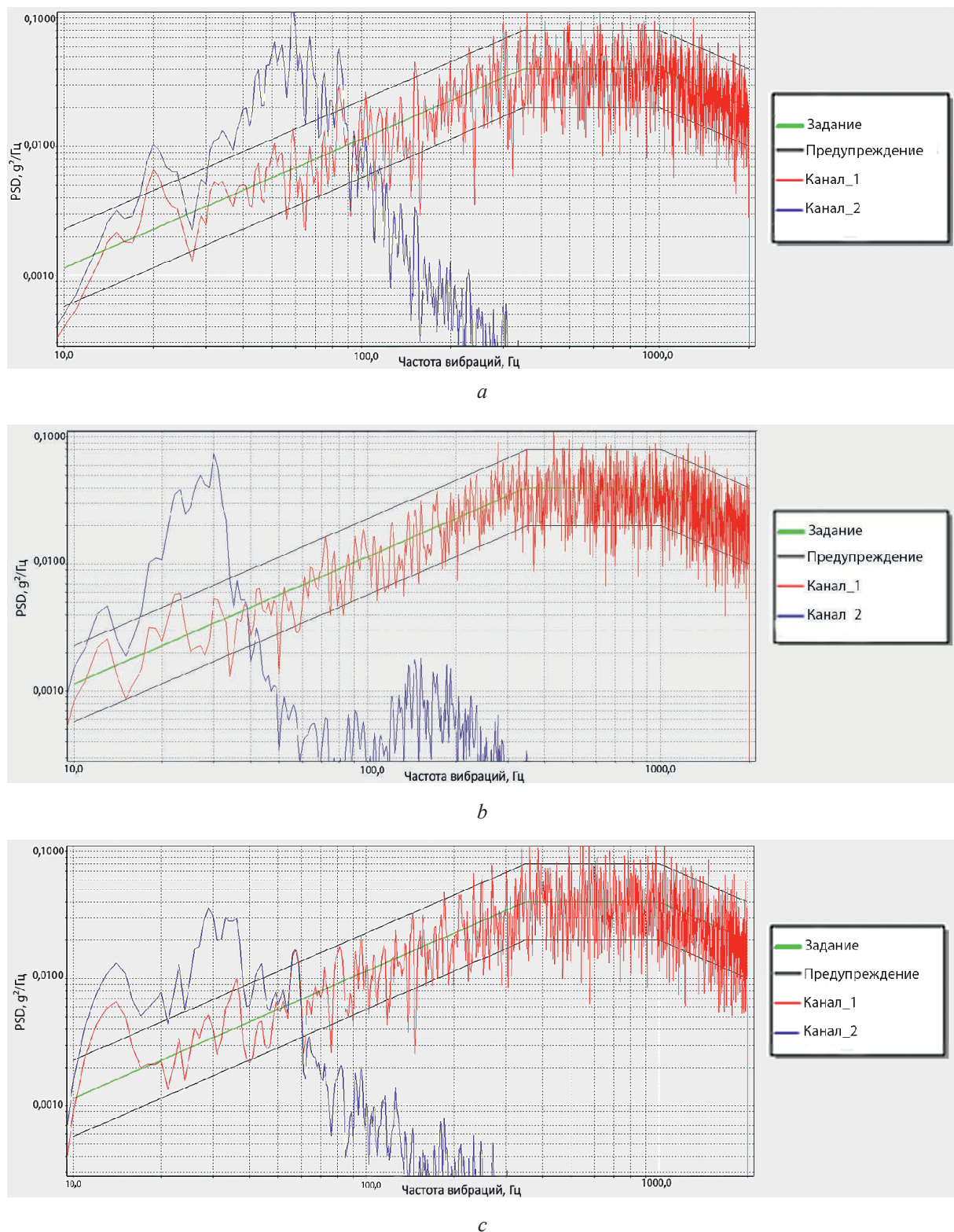


Рис. 5. Зависимость PSD виброизолированного кварцевого генератора от частоты вибраций при воздействии вибраций вдоль осей $X(a)$, $Y(b)$, $Z(c)$

Fig. 5. Dependence of the PSD of a vibration-isolated quartz generator on the vibration frequency when exposed to vibrations along the $X(a)$, $Y(b)$, $Z(c)$ axes

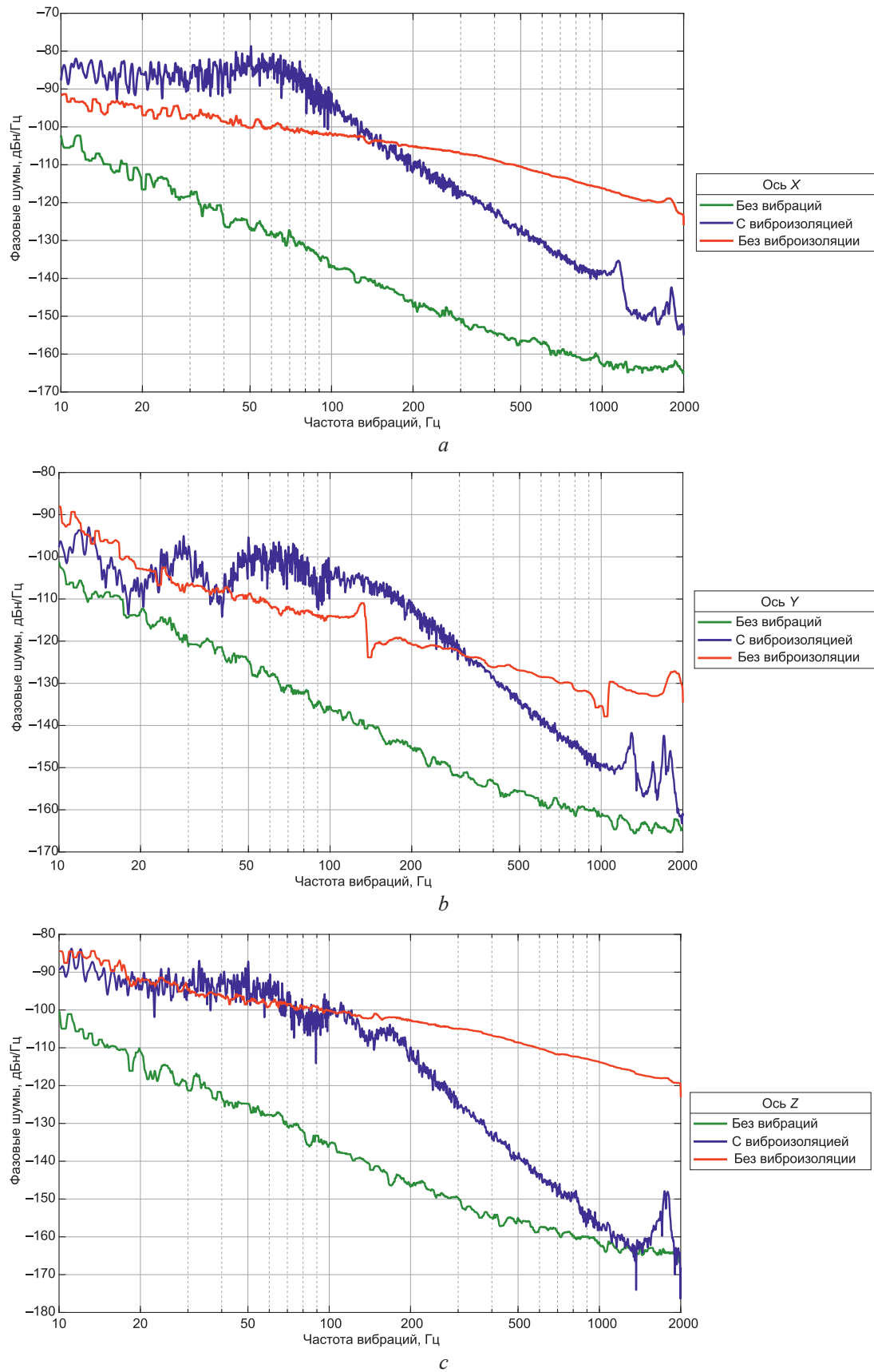


Рис. 6. Зависимость фазовых шумов виброизолированного кварцевого генератора от частоты вибраций при ее воздействии вдоль осей *X* (*a*), *Y* (*b*), *Z* (*c*)

Fig. 6. Dependence of the phase noise of a vibration-isolated quartz oscillator on the vibration frequency when exposed to it along the axes *X* (*a*), *Y* (*b*), *Z* (*c*)

Заключение

1. Максимально возможное снижение фазовых шумов кварцевых генераторов, вызванных вибрацией, является важной задачей для обеспечения характеристик и стабильной работы электронных устройств, отвечающих современным требованиям. Эффективную виброизоляцию кварцевых генераторов в диапазоне частот более 100 Гц могут обеспечить тросовые виброизоляторы.

2. Разработанные авторами виброизоляторы модели ВИ 0,8/0 демонстрируют свою эффективность в снижении уровня фазовых шумов, вызванных случайной вибрацией. Например, на частоте 200 Гц по оси X снижение уровня фазовых шумов составляет 10 дБ, по оси Z – 20 дБ, на частоте 1000 Гц по осям X и Z – 25 и 40 дБ соответственно.

3. Полученные результаты могут быть применены для решения задачи уменьшения фазовых шумов кварцевых генераторов при воздействии на них внешних широкополосных вибраций.

Список литературы

1. Иванов, Ю. Измерение G-чувствительности кварцевых генераторов / Ю. Иванов, А. Никонов, Э. Князева // *Электроника. Наука. Технология. Бизнес*. 2019. № 3. С. 124–129.
2. Ильинский, В. С. Защита РЭА и прецизионного оборудования от динамических воздействий / В. С. Ильинский. М.: Радио и связь, 1982.
3. Использование тросовых виброизоляторов для виброзащиты кварцевых генераторов / В. Н. Кийко [и др.] // *Доклады БГУИР*. 2023. Т. 21, № 4. С. 63–70. <http://dx.doi.org/10.35596/1729-7648-2023-21-4-63-70>.
4. Rubiola, E. *Phase Noise and Frequency Stability in Oscillators* / E. Rubiola. UK: Cambridge University Press, 2008.
5. Optimizing Phase – Noise Performance: Theory and Design Techniques for a Crystal Oscillator / A. Apte [et al.] // *IEEE Microwave Magazine*. 2017. Vol. 18, No 4. P. 108–123.
6. Filler, R. L. The Acceleration Sensitivity of Quartz Crystal Oscillators: A Review / R. L. Filler // *IEEE Transactions on Ultrasonics, Ferroelectrics, and Frequency Control*. 1988. Vol. 35, No 3. P. 297–305.
7. Пономарев, Ю. К. Разработка методики расчета характеристик тросового виброизолятора с радиусным и прямолинейными участками осевой линии / Ю. К. Пономарев, П. В. Посохов, О. Б. Симаков // *Новые материалы и технологии в машиностроении: сб. науч. тр. Брянск: Брянский гос. инж.-технол. ун-т*, 2014. С. 64–74.
8. Test Method Standard – Electronic and Electrical Component Parts: MIL-STD-202G. USA: Department of Defense, 2008.
9. Kurowski, P. M. Finite Element Analysis for Design Engineers / P. M. Kurowski // *SAE*. 2017. P. 181–196.

Поступила 18.11.2024

Принята в печать 03.01.2025

References

1. Ivanov Y., Nikonov A., Knyazeva E. (2019) Measuring the G-Sensitivity of Quartz Oscillators. *Electronics. Science. Technology. Business*. (3), 124–129 (in Russian).
2. Ilyinsky V. S. (1982) *Protection of Electronic and Precision Equipment from Dynamic Impacts*. Moscow, Radio i Sviaz Publ. (in Russian).
3. Kiyko V. N., Naumovich N. M., Davydov M. V., Zhuravliov V. I. (2023) Use of Cable Vibration Isolators for Vibration Protection of Quartz Generators. *Doklady BGUIR*. 21 (4), 63–70. <http://dx.doi.org/10.35596/1729-7648-2023-21-4-63-70> (in Russian).
4. Rubiola E. (2008) *Phase Noise and Frequency Stability in Oscillators*. UK, Cambridge University Press.
5. Apte A., Rohle U. L., Poddar A., Rudlph M. (2017) Optimizing Phase – Noise Performance: Theory and Design Techniques for a Crystal Oscillator. *IEEE Microwave Magazine*. 18 (4), 108–123.
6. Filler R. L. (1988) The Acceleration Sensitivity of Quartz Crystal Oscillators: A Review. *IEEE Transactions on Ultrasonics, Ferroelectrics, and Frequency Control*. 35 (3), 297–305.
7. Ponomarev Yu. K., Posokhov P. V., Simakov O. B. (2014) Development of a Method for Calculating the Characteristics of a Cable Vibration Isolator with Radius and Straight Sections of the Center Line. *New Materials and Technologies in Mechanical Engineering, Collection of Scientific Papers*. Bryansk, Bryansk State Engineering and Technology University. 64–74 (in Russian).
8. MIL-STD-202G. *Test Method Standard – Electronic and Electrical Component Parts*. USA, Department of Defense, 2008.
9. Kurowski P. M. (2017) Finite Element Analysis for Design Engineers. *SAE*. 181–196.

Received: 18 November 2024

Accepted: 3 January 2025

Вклад авторов / Authors' contribution

Авторы внесли равный вклад в написание статьи / The authors contributed equally to the writing of the article.

Сведения об авторах

Кийко В. Н., асп. каф. инфокоммуникационных технологий, Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники (БГУИР)

Наумович Н. М., канд. техн. наук, нач. науч.-констр. центра перспективных радиоэлектронных систем сантиметрового и миллиметрового диапазонов длин волн (Центр 1.6), БГУИР

Давыдов М. В., канд. техн. наук, доц., первый проректор БГУИР

Журавлёв В. И., канд. техн. наук, ст. науч. сотр. Центра 1.6, зав. каф. теоретических основ электротехники, БГУИР

Адрес для корреспонденции

220013, Республика Беларусь,
Минск, ул. П. Бровки, 6
Белорусский государственный университет
информатики и радиоэлектроники
Тел.: +375 29 337-77-19
E-mail: kiyko@bsuir.by
Кийко Вадим Николаевич

Information about the authors

Kiyko V. N., Postgraduate at the Department of Information Technologies, Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics (BSUIR)

Naumovich N. M., Cand. Sci. (Tech.), Head of the Research and Design Center of Advanced Radioelectronic Systems of the Centimeter and Millimeter Wavelengths (Center 1.6), BSUIR

Davydov M. V., Cand. Sci. (Tech.), Associate Professor, First Vice-Rector, BSUIR

Zhuravliov V. I., Cand. Sci. (Tech.), Senior Researcher at the Center 1.6, Head of the Department of Fundamental Electrical Engineering, BSUIR

Address for correspondence

220013, Republic of Belarus,
Minsk, P. Brovki St., 6
Belarusian State University
of Informatics and Radioelectronics
Tel.: +375 29 337-77-19
E-mail: kiyko@bsuir.by
Kiyko Vadim Nikolaevich