



<http://dx.doi.org/10.35596/1729-7648-2023-21-4-63-70>

Оригинальная статья
Original paper

УДК 621.373.5

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ТРОСОВЫХ ВИБРОИЗОЛЯТОРОВ ДЛЯ ВИБРОЗАЩИТЫ КВАРЦЕВЫХ ГЕНЕРАТОРОВ

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

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

Поступила в редакцию 10.03.2023

© Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники, 2023
Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics, 2023

Аннотация. Исследованы виброизоляторы с демпфирующими свойствами стальных многопроволочных тросов для виброзащиты кварцевых генераторов. Моделирование вибрационных характеристик конструктивных элементов проводилось с использованием численных методов. Рассчитаны упругие характеристики и конструктивные параметры троса для виброизолятора. Проведен гармонический анализ с заданными значениями массы и жесткости при воздействии внешних вибраций. Разработан и изготовлен образец тросового виброизолятора. Для проверки полученных расчетных результатов предложена структура испытательного стенда, позволяющего определять значения собственных резонансных частот. Исследованы зависимости виброускорения от частоты колебаний с возмущающим воздействием по синусоидальному и случайному законам с изменяемой частотой в диапазоне 10–2000 Гц. Испытания тросового виброизолятора показали эффективность подавления вибраций для частот более 120 Гц. В нижнем диапазоне случайных вибраций различные резонансы оказывают существенное влияние друг на друга. Эксперименты подтвердили результаты моделирования и эффективность используемого решения: разность показателей при определении резонансных частот составила менее 10 % при уменьшении уровня вибрации до заданного показателя.

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

Конфликт интересов. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Для цитирования. 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>.

USE OF CABLE VIBRATION ISOLATORS FOR VIBRATION PROTECTION OF QUARTZ GENERATORS

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

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

Submitted 10.03.2023

Abstract. Vibration isolators with damping properties of steel multiwire cables for vibration protection of quartz oscillators have been studied. Modeling of vibration characteristics of structural elements was carried out using numerical methods. The elastic characteristics and design parameters of the cable for the vibration isolator are calculated. A harmonic analysis was carried out with given values of mass and stiffness under the influence of external vibrations. A sample of a cable vibration isolator has been developed and manufactured. To verify the calculated results obtained, the structure of the test bench is proposed, which allows determining the values of natural resonant

frequencies. The study of the dependence of vibration acceleration on the frequency of oscillations with a disturbing effect according to the sinusoidal and random laws with a variable frequency in the range of 10–2000 Hz was carried out. Tests of the cable vibration isolator have shown the effectiveness of vibration suppression for frequencies above 120 Hz. In the lower range of random vibrations, various resonances have a significant effect on each other. The experiments confirmed the simulation results and the effectiveness of the solution used: the difference in indicators in determining the resonant frequencies was less than 10 % with a decrease in the vibration level to a given indicator.

Keywords: vibration, cable vibration isolator, harmonic analysis, simulation, crystal oscillator, vibration spectral density, 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. (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).

Введение

Динамичное развитие электронных систем и расширение сферы их применения обуславливают рост требований по обеспечению их стабильной работы в условиях действия различных дестабилизирующих факторов. Одной из приоритетных задач является снижение реакции кварцевых генераторов на воздействие вибраций, что обеспечивает улучшение фазовых характеристик задающих генераторов и характеристик радиосистем в целом [1]. Когда кварцевый генератор подвергается случайной вибрации, ускорение может описываться спектральной плотностью мощности [2]. Фазовый шум L , вызванный вибрацией в кварцевом генераторе, определяется следующим образом:

$$L(f) = 20 \log \left[\frac{G \sqrt{2PSD} f_0}{2f_v} \right], \quad (1)$$

где G – чувствительность к ускорению; PSD – спектральная плотность вибрации, $g^2/Гц$; f_0 – резонансная частота кварцевого кристалла без ускорения; f_v – частота вибрации.

Из выражения (1) видно, что фазовый шум практически полностью определяется уровнем внешних вибраций и G -чувствительностью. Данный параметр зависит от конструкции самого генератора, его расположения в модулях разного уровня, от наличия демпфирующих элементов [3]. В качестве внешних элементов системы виброизоляции кварцевых генераторов применимы различные виды виброизолирующих креплений [4]. В статье рассматриваются тросовые виброизоляторы с демпфирующими свойствами стальных тонких многопроволочных тросов. Основные показатели таких изделий – массогабаритные характеристики, жесткости на сдвиг, сжатие и скручивание. Их особенностями являются длительный срок службы, коррозионная стойкость, виброизоляция по всем осям [5]. Для подтверждения эффективности применения тросовых виброизоляторов в конструкциях кварцевых генераторов необходимо исследовать амплитуды колебаний на виброизоляторах, частоты связанных или независимых колебаний, коэффициент затухания колебаний.

Разработка расчетной модели тросового виброизолятора

Моделирование вибрационных характеристик конструктивных элементов виброизолятора проводили с использованием численного метода конечных элементов [6], в основу которого заложены два типа исследований: статический и модальный. При статическом типе выполняются анализ жесткостей моделей виброгасителей или виброизоляторов в различных направлениях, зависящих от упругих или вязкоупругих свойств материалов, а также сопоставление полученных результатов расчета со значениями, определенными производителем в соответствующих каталогах. Модальный тип исследований предназначен для определения собственных форм и частот колебаний, которые, в свою очередь, являются резонансными для каждого виброизолятора. При моделировании решались следующие задачи.

1. Расчет упругих характеристик троса

При работе виброизолятора его конструктивные элементы (тросы) работают в основном на изгиб. Жесткость этих элементов определяется по формуле

$$c = EJ_{\text{тр}}, \quad (2)$$

где E – модуль упругости материала; $J_{\text{тр}}$ – момент инерции троса.

Для определения момента инерции троса с учетом винтообразности составляющих его проволок использовали выражение [7]

$$J_{\text{тр}} = \frac{n\pi}{64} (6d_2^4 / \cos \alpha + d_1^4), \quad (3)$$

где n – число прядей троса; d_2 – диаметр винтовой проволоки троса; α – угол навивки; d_1 – диаметр центральной проволоки.

2. Разработка модели троса для тросового виброизолятора

При анализе вибрационных характеристик в расчетных пакетах программ инженерного анализа зачастую отсутствуют модели тросов, которые заменяются на цельные стержни равного сечения. В рассматриваемом случае целесообразно изменить модуль упругости в соответствии с формулой

$$E_{\text{ст}} J_{\text{ст}} = E_{\text{тр}} J_{\text{тр}}, \quad (4)$$

где $E_{\text{ст}} = 2e^{+11}$ – модуль упругости стали, Па; $J_{\text{ст}} = \frac{\pi d^4}{64}$ – момент инерции стержня круглого сечения диаметром d ; $E_{\text{тр}}$ – модуль упругости стального троса.

С учетом формул (3), (4) $E_{\text{тр}} = 5127676447$ Па. В качестве проверки правильности вычислений сопоставили измеренный изгиб реального троса с его расчетной моделью. На рис. 1 продемонстрирован изгиб реального троса диаметром 0,8 мм с вылетом 100 мм от собственного веса. Величина перемещения консоли от горизонтали составляла 12,5 мм.

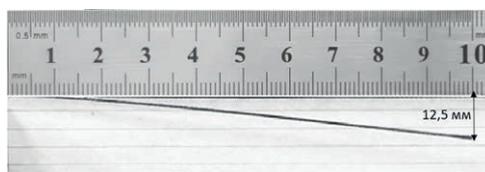


Рис. 1. Изгиб реального троса от собственного веса
Fig. 1. Bending of a real cable due to its own weight

На рис. 2 изображено распределение перемещений расчетной модели троса в виде цельного стержня от собственного веса, но с меньшим, чем у стали, модулем упругости.

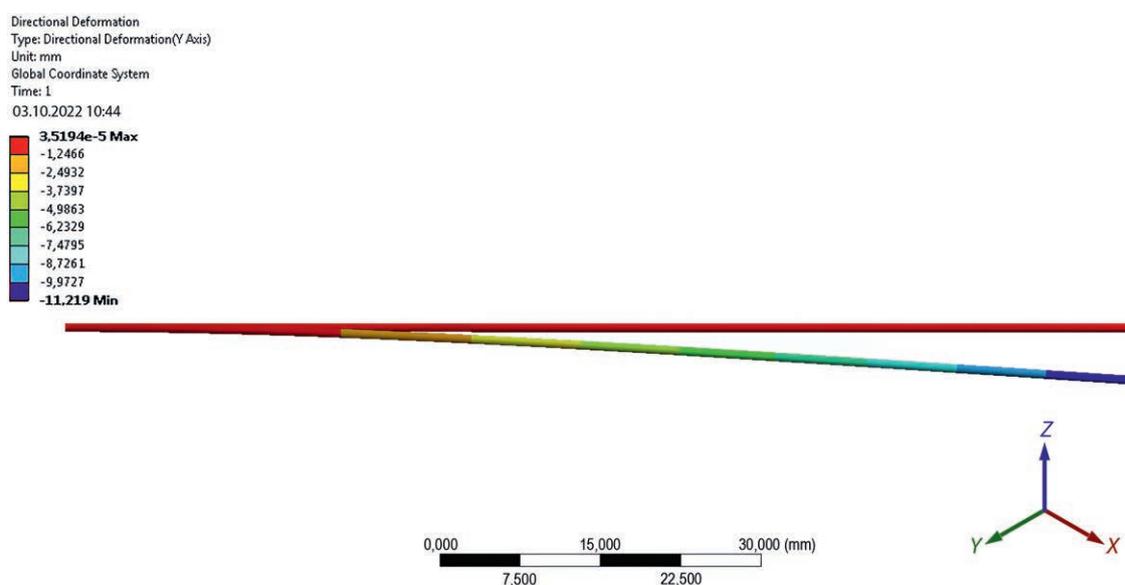


Рис. 2. Распределение перемещений расчетной модели троса в виде цельного стержня от собственного веса
Fig. 2. Distribution of displacements of the design model of a cable in the form of a solid rod from its own weight

Как видно из рис. 1, 2, расчетная модель троса практически совпадает с реальным тросом (отклонение составило 11,219 мм, расхождение результатов – менее 12 %), что позволяет использовать данную модель в дальнейших оценках. Для натурных испытаний был изготовлен макет тросового восьмиветвевого виброизолятора с углом каждой ветви 0° относительно плоскости нижней шайбы-держателя, диаметр троса – 0,8 мм (далее – ВИ 0,8/0) (рис. 3).

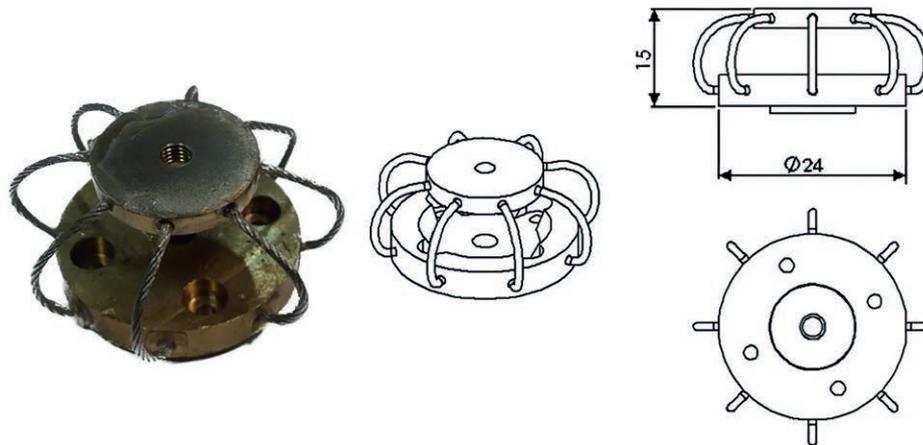


Рис. 3. Макет и разрез тросового восьмиветвевого виброизолятора ВИ 0,8/0
Fig. 3. Layout and section of a cable eight-branch vibration isolator VI 0.8/0

В качестве материала шайб-держателей тросов использовалась латунь ЛС59-1, тросы – из нержавеющей стали 03Х17Н14М3 (aisi 316L) двойной навивки 7×7 и диаметром 0,8 мм. Для фиксации тросов в шайбах-держателях применяли цианакрилатный клей LOCTITE 406. Сборку виброизолятора осуществляли с помощью кондуктора, состоящего из шпильки и трех фиксирующих гаек, которыми шайбы-держатели закреплялись в требуемом положении. Тросы вклеивали в шайбы-держатели, предварительно смонтированные на кондукторе.

Для выполнения экспериментальных исследований разработали расчетную модель, включающую один тросовый виброизолятор и установленный на нем вибропреобразователь (рис. 4). Назначение вибропреобразователя заключается в генерировании электрического сигнала пропорционального механическим колебаниям. Все массо-инерционные характеристики твердотельной модели были приведены в соответствие реальным объектам.

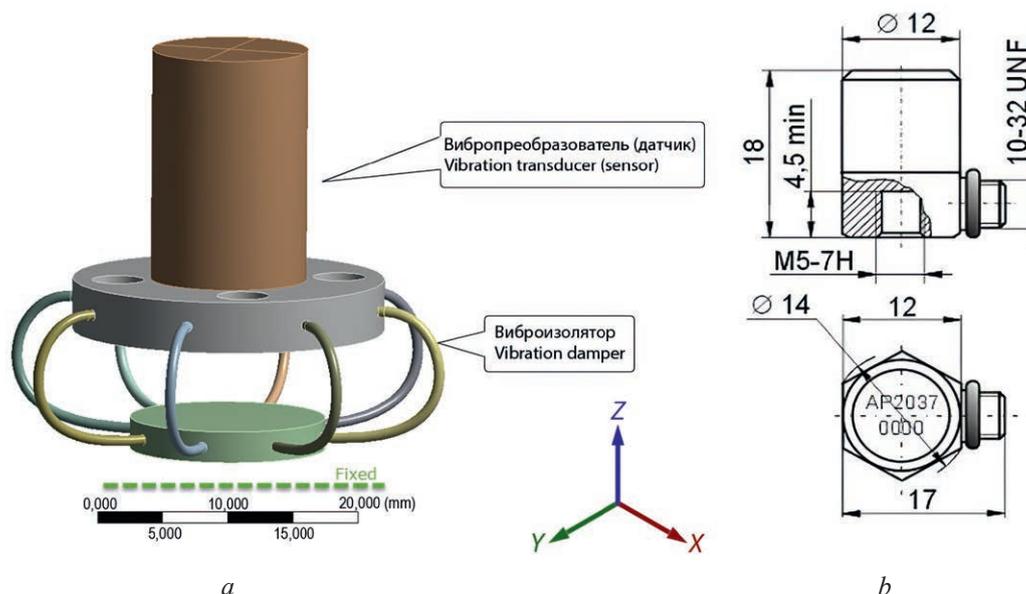


Рис. 4. Модель виброизолятора с установленным на нем вибропреобразователем (a) и разрез вибропреобразователя (b)
Fig. 4. Vibration isolator model with a vibration transducer installed on it (a) and section of the vibration transducer (b)

Результаты моделирования

Компьютерное моделирование виброизолятора проводили с использованием трех видов исследований:

- статического анализа (позволяет сформировать начальное положение, образованное деформированием упругих элементов от собственного веса конструкции);
- модального анализа (позволяет получить значения собственных частот конструкции);
- анализа случайных вибраций (позволяет получить графическую зависимость спектральной плотности сигнала от частоты колебаний).

На рис. 5 представлен полученный методом конечных элементов статический прогиб от собственного веса конструкции виброизолятора с вибропреобразователем, а на рис. 6 – первые четыре формы изгиба и значения собственных частот виброизолятора.

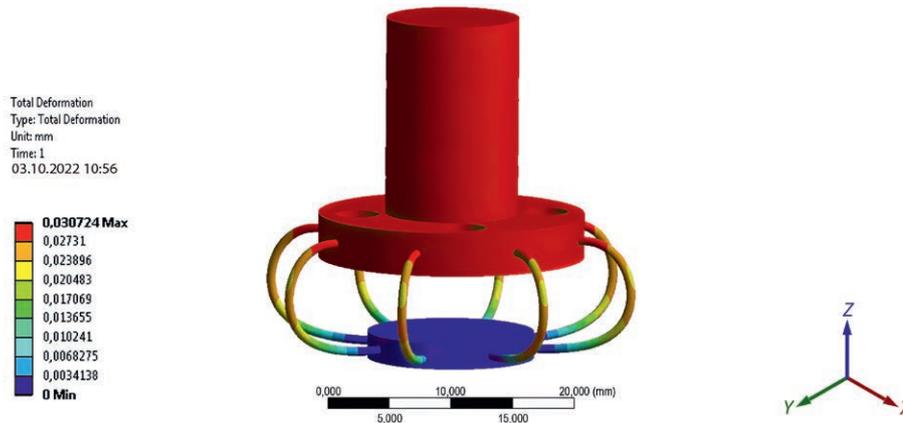


Рис. 5. Статический прогиб от собственного веса конструкции виброизолятора с вибропреобразователем
Fig. 5. Static deflection due to own weight of a vibration isolator structure with a vibration transducer

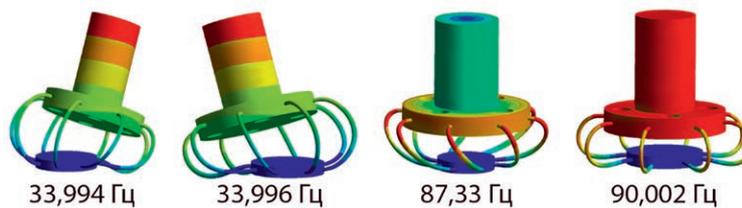


Рис. 6. Формы изгиба и значения собственных частот виброизолятора
Fig. 6. Bending forms and natural frequencies of the vibration isolator

При модальных испытаниях одновременно возбуждается лишь один резонанс, поэтому нет взаимного влияния резонансов друг на друга. Анализ случайных вибраций необходим с точки зрения испытаний, наиболее приближенных к реальным условиям. Преимущество исследования с помощью метода случайных вибраций – достаточно короткое время испытательного воздействия вследствие одновременного возбуждения всех резонансов.

В качестве возмущающего воздействия при анализе случайных вибраций задавали PSD от частоты колебаний в виде, изображенном на рис. 7. Зависимость PSD от частоты колебаний – это получение возмущающего воздействия как при компьютерном моделировании, так и для натурных испытаний.

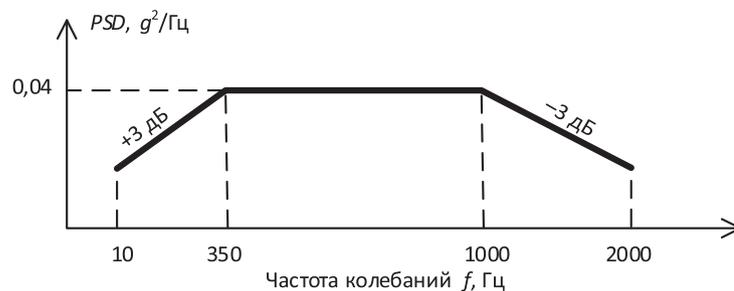


Рис. 7. Вибрационное возмущающее воздействие
Fig. 7. Vibration disturbance

На рис. 7 в диапазоне частот вибраций 300–1000 Гц спектральная плотность вибраций постоянна и равна $0,04 \text{ g}^2/\text{Гц}$. На частотах менее 300 и более 1000 Гц спектральная плотность вибраций изменяется по закону 3 дБ/октаву.

На рис. 8 представлена смоделированная зависимость PSD вдоль вертикальной оси Z (рис. 5) от частоты колебаний, которая является откликом на возмущающее воздействие при компьютерном моделировании.

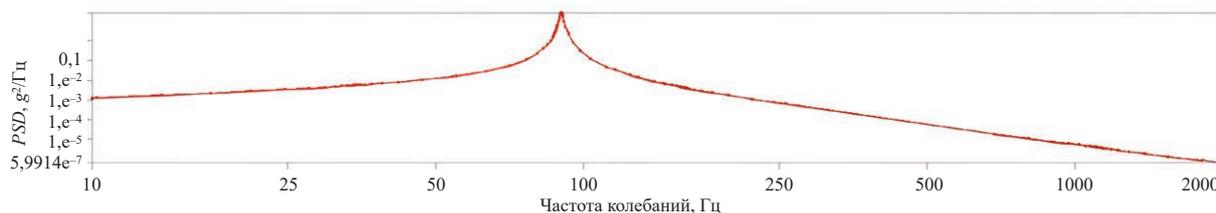


Рис. 8. Результат моделирования зависимости PSD от частоты колебаний
Fig. 8. The result of modeling the dependence of PSD on the oscillation frequency

Экспериментальные исследования

Проверку расчетных данных осуществляли в процессе экспериментов. Для определения собственных резонансных частот тросового виброизолятора провели его испытания на вибростенде TIRA TV 5220/LS120 с системой управления BC-207 (рис. 9).

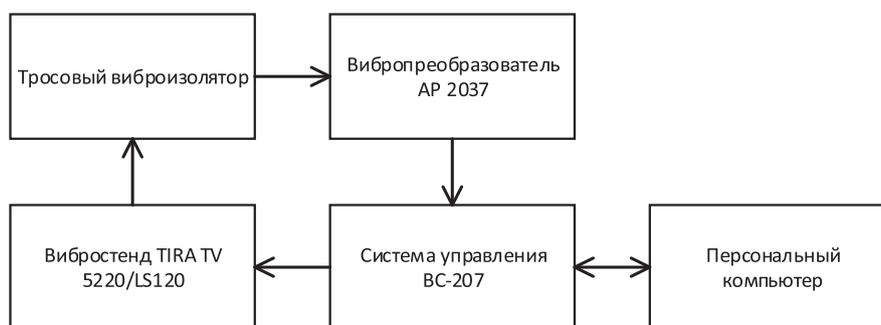


Рис. 9. Схема установки для определения собственных резонансных частот
Fig. 9. Installation scheme for determining natural resonant frequencies

На рис. 10 приведены результаты исследования зависимости виброускорения (в единицах g) от частоты колебаний при испытаниях виброизолятора.

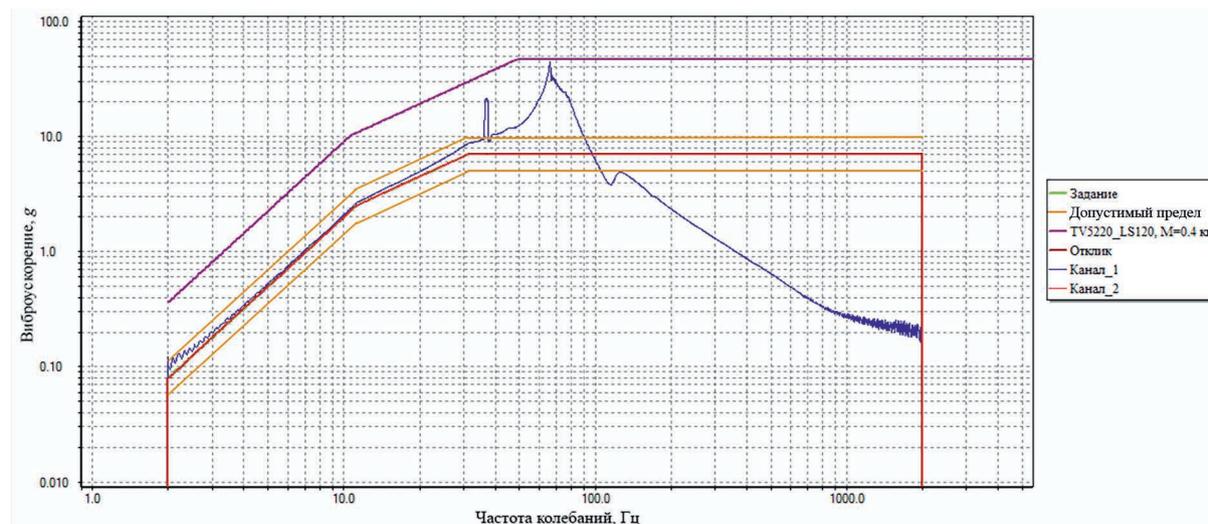


Рис. 10. Зависимость виброускорения от частоты колебаний при испытаниях виброизолятора
Fig. 10. Dependence of vibration acceleration on the frequency of oscillations when testing a vibration isolator

На графике рис. 10 значениям, получаемым с вибропреобразователя, соответствует синяя кривая (Канал_1), по которой видно, что возмущающее воздействие изменяется по синусоидальному закону с частотой колебаний в диапазоне 10–2000 Гц. Как видно из рис. 10 (синяя кривая, Канал_1), на всем диапазоне частот наблюдаются два пика виброускорения, превышающих допустимый предел (желтые кривые). Значения частот для данных резонансов соответствуют собственным частотам виброизолятора (рис. 6), рассчитанным методом конечных элементов. В процессе испытаний виброизолятора получены зависимости PSD от частоты колебаний (Канал_1) (рис. 11) вдоль вертикальной оси Z (рис. 5).

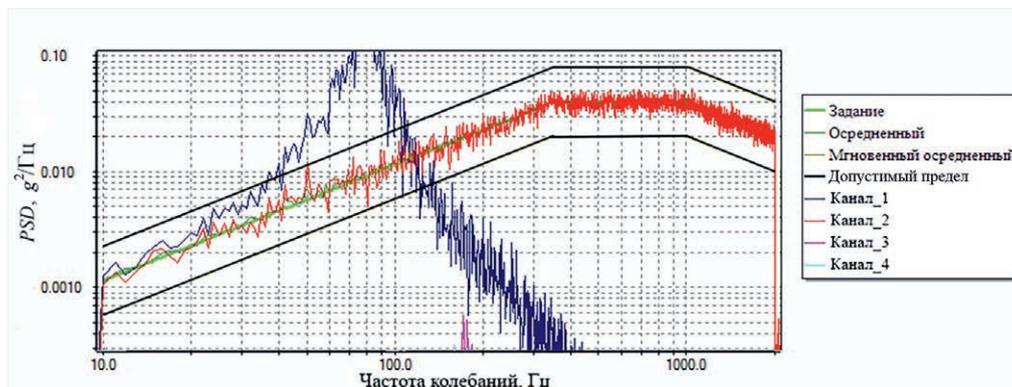


Рис. 11. Зависимость PSD от частоты колебаний при испытаниях виброизолятора
Fig. 11. Dependence of PSD from the frequency of vibrations during testing of a vibration isolator

Согласно рис. 8, 11, максимальное значение PSD , передаваемое на вибропреобразователь вдоль оси Z , находится в диапазоне 80–90 Гц, полученном как по результатам моделирования, так и при проведении экспериментов.

Выводы

1. Компьютерное моделирование и натурные испытания тросового виброизолятора ВИ 0,8/0 показали сопоставимость результатов: разность результатов при определении резонансных частот составила менее 10 %. Определено, что тросовые виброизоляторы ВИ 0,8/0 эффективны для частот вибраций более 120 Гц. В диапазоне до 120 Гц они не позволяют обеспечить подавление вибраций. Более того, при случайных вибрациях есть общий подъем уровня спектральной плотности вибрации, что обусловлено влиянием различных резонансов друг на друга.

2. Зная величины резонансных частот, следует предпринять дополнительные меры для снижения уровней вибрации на защищаемом кварцевом генераторе при использовании тросовых виброизоляторов. Оптимально предусмотреть моделирование системы, состоящей из нужного количества виброизоляторов (определяется техническими требованиями – направлением воздействия на изделие и необходимостью компенсации этих воздействий, габаритами изделия) и кварцевого генератора.

Список литературы

1. 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.
2. Filler, R. L. The Acceleration Sensitivity of Quartz Crystal Oscillators: a Review / R. L. Filler // IEEE Transactions on UFFC. 1988. Vol. 35. P. 297–305.
3. Динамика кварцевого генератора в условиях внешней вибрации / А. М. Гуськов [и др.]. Ижевск: Ижевский ин-т компьютер. исслед., 2014. 202 с.
4. Ильинский, В. С. Защита РЭА и прецизионного оборудования от динамических воздействий / В. С. Ильинский. М.: Радио и связь, 1982. С. 260.
5. Гармонический анализ тросовых виброизоляторов для синтезаторов частот / В. И. Журавлев [и др.] // Компьютерные технологии и анализ данных (СТДА'2022): матер. III Междунар. науч.-практ. конф., Минск, 21–22 апр. 2022 г. Минск: Белор. гос. ун-т, 2022. С. 203–206.
6. Kurowski, P. Chapter 11: Vibration Analysis, in Finite Element Analysis for Design Engineers / P. Kurowski // SAE. 2017. P. 181–196.

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 госуд. инж.-технол. ун-т, 2014. Вып. 20. С. 64–74.

References

1. Apte A., Rohde U. L., Poddar A., Rudolph M. (2017) Optimizing Phase-Noise Performance: Theory and Design Techniques for a Crystal Oscillator. *IEEE Microwave Magazine*. 18 (4), 108–123.
2. Filler R. L. (1988) The Acceleration Sensitivity of Quartz Crystal Oscillators: a Review. *IEEE Transactions on UFFC*. 35, 297–305.
3. Guskov A. M. et al. (2014) *Dynamics of a Quartz Oscillator under External Vibration*. Izhevsk, Izhevsk Institute for Computer Research. 202 (in Russian).
4. Ilyinsky V. S. (1982) *Protection of REA and Precision Equipment from Dynamic Impacts*. Moscow, Radio and Communication. 260 (in Russian).
5. Zhuravliov V. I., Naumovich N. M., Stezhko I. K., Kiyko V. N. (2022) Harmonic Analysis of Cable Vibration Isolators for Frequency Synthesizers. *Computer Technologies and Data Analysis (CTDA'2022), Materials of the III Intern. Scientific-Practical. Conf., Minsk, Apr 21–22, 2022*. Minsk, Belarusian State University. 203–206 (in Russian).
6. Kurowski P. (2017) Chapter 11: Vibration Analysis, in *Finite Element Analysis for Design Engineers*. SAE. 181–196.
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, Sat. Scientific Works*. 20. Bryansk: Bryansk State Engineering and Technology University. 64–74 (in Russian).

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., аспирант, ст. преподаватель кафедры инфокоммуникационных технологий Белорусского государственного университета информатики и радиоэлектроники

Наумович Н. М., к. т. н., начальник научно-конструкторского центра перспективных радиоэлектронных систем сантиметрового и миллиметрового диапазонов длин волн (Центр 1.6) научно-исследовательской части Белорусского государственного университета информатики и радиоэлектроники

Давыдов М. В., к. т. н., проректор по учебной работе Белорусского государственного университета информатики и радиоэлектроники

Журавлёв В. И., к. т. н., ст. н. с. Центра 1.6 научно-исследовательской части, заведующий кафедрой теоретических основ электротехники Белорусского государственного университета информатики и радиоэлектроники

Адрес для корреспонденции

220013, Республика Беларусь,
г. 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, Senior Lecturer at the Department of Infocommunication Technologies of the Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics

Naumovich N. M., Cand. of Sci., Head of the Research and Design Center of Advanced Radioelectronic Systems of the Centimeter and Millimeter Wavelengths (Center 1.6) of R&D Department of the Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics

Davydov M. V., Cand. of Sci., Vice-Rector for Academic Affairs of the Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics

Zhuravliov V. I., Cand. of Sci., Senior Researcher at the Center 1.6 of R&D Department, Head of the Department of Theoretical Foundations of Electrical Engineering of the Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics

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