

ИЗМЕРЕНИЕ G-ЧУВСТВИТЕЛЬНОСТИ КВАРЦЕВЫХ ГЕНЕРАТОРОВ

Ю. Иванов¹, А. Никонов², Э. Князева³

Основное требование, предъявляемое к кварцевым генераторам, – обеспечение высокой стабильности частоты генерируемых колебаний, которой определяются точность и разрешающая способность радиолокационных и радионавигационных систем, погрешность измерений в устройствах измерительной техники, качественные характеристики и надежность систем связи, радиовещания и телевидения. Стабильность зависит от многих факторов, включая приложенное к генератору ускорение, которое проявляется в виде постоянного ускорения, вибрации, ударов, перемещения, наклона или вращения. Именно такое влияние на стабильность частоты рассматривается в данной статье.

ОПРЕДЕЛЕНИЕ G-ЧУВСТВИТЕЛЬНОСТИ. ВЕКТОРНОЕ ПРЕДСТАВЛЕНИЕ

Стабильность частоты кварцевых генераторов зависит от многих параметров, в частности, от воздействия ускорения или вибрации, что особенно критично для некоторых вариантов применения кварцевых генераторов, например, при их работе на подвижной технике. Данный параметр принято называть G-чувствительностью генератора. Он определяется как относительное изменение выходной частоты генератора при воздействии ускорения 1 g. Величина возникшего частотного сдвига при этом может варьироваться в пределах от 10^{-8} до 10^{-11} на 1 g.

G-чувствительность – векторная величина, так как зависит и от направления ускорения относительно трех взаимно перпендикулярных осей генератора. Наибольший сдвиг частоты генератора наблюдается в случае, если приложенное ускорение направлено параллельно вектору G-чувствительности. Величину и ориентацию вектора G-чувствительности ($\vec{\Gamma}$) определяют путем измерения отдельных взаимно ортогональных компонент в x, y, z осях (рис. 1).

МЕТОДЫ ИЗМЕРЕНИЯ

Метод переворота 2g tipover

Самый простой способ оценить G-чувствительность генератора по одной из осей (G_x , G_y , G_z) – измерить изменение частоты генератора вследствие его поворота вокруг этой оси (2g tipover test). Так как во время переворота ускорение изменяется на 2g, то для вычисления

G-чувствительности по этой оси потребуется поделить на 2 полученное изменение частоты генератора. Для определения вектора G-чувствительности следует провести подобный замер для всех трех осей и вычислить величину вектора по формуле:

$$\vec{\Gamma} = \sqrt{G_x^2 + G_y^2 + G_z^2}. \quad [2].$$

Ниже представлен пример прописи частоты во время нескольких последовательных поворотов вокруг одной оси (рис. 2). Полученный сдвиг частоты составляет $0,89 \cdot 10^{-9}$, таким образом, G-чувствительность вдоль этой оси будет составлять $0,45 \cdot 10^{-9}$, для двух других осей – $0,3 \cdot 10^{-9}$ и $0,21 \cdot 10^{-9}$, соответственно вектор G-чувствительности генератора – $0,58 \cdot 10^{-9}/g$.

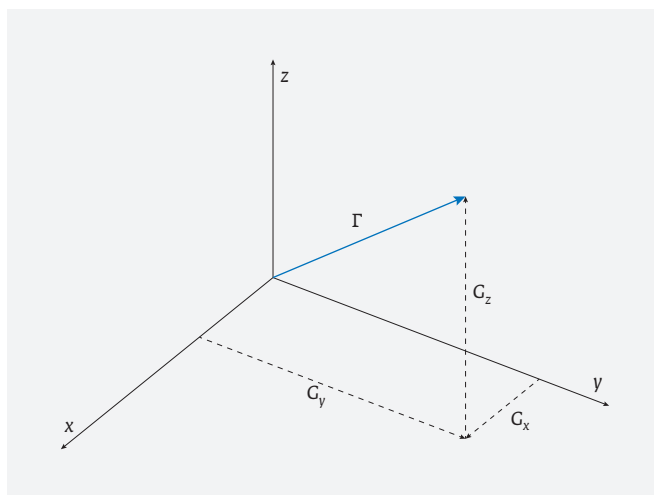


Рис. 1. Векторное представление G-чувствительности [1]

¹ АО «Морион», старший инженер-разработчик.

² АО «Морион», заместитель начальника лаборатории разработки генераторов.

³ АО «Морион», инженер-разработчик.

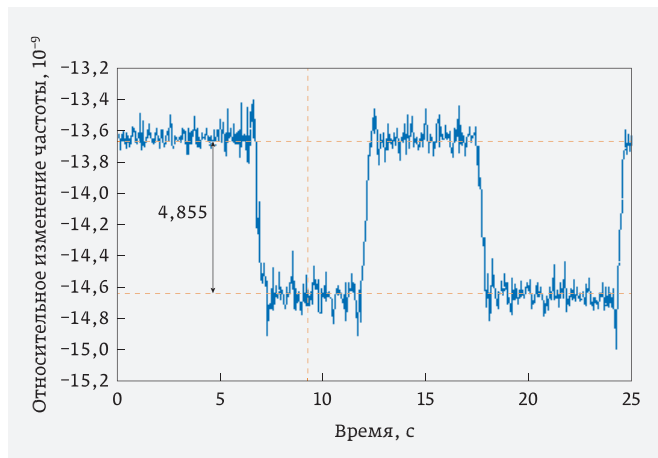


Рис. 2. Результаты испытания G-чувствительности по одной оси методом переворота

Несомненным достоинством метода является простота – подобное измерение можно провести без дополнительных приборов прямо на столе. К сожалению, метод не универсален, так как генераторы с низкой температурной стабильностью демонстрируют дополнительные, не зависящие от G-чувствительности резонатора, изменения частоты, которые вызваны изменением температуры вследствие конвекции воздуха в устройстве. Помимо этого, для расчета G-чувствительности необходимо брать отсчеты частоты непосредственно до и после поворота. Данный метод применим для измерения G-чувствительности термостатированных высокостабильных генераторов, результаты при этом совпадают с данными измерения другими методами (табл. 1).

Испытания на автоматизированном стенде

Схема и изображение автоматизированного стенда для проведения 2g tipover испытания представлены на рис. 3. Данный стенд обеспечивает автоматический поворот

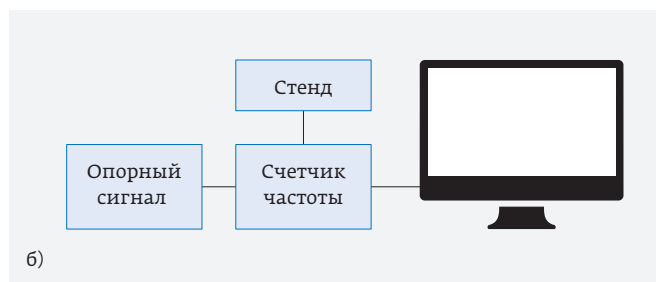
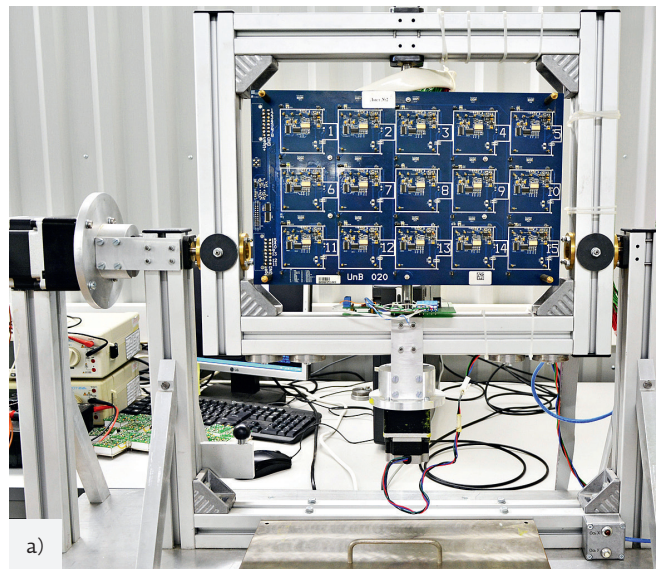


Рис. 3. Автоматизированный стенд для испытания G-чувствительности (2g tipover test)

вокруг каждой из трех осей генератора и снятие частоты непосредственно до и после поворота. Наряду с этим на стенде предусмотрены места сразу для 15 генераторов.

Измерения при постоянном вращении

Еще один возможный вариант измерения G-чувствительности – при постоянном вращении. За счет постоянного

Таблица 1. Результаты измерений G-чувствительности

Способ измерения	100 МГц (MV136)			10 МГц (MV209)		
	Испытуемый генератор 1	Испытуемый генератор 2	Испытуемый генератор 3	Испытуемый генератор 4	Испытуемый генератор 5	Испытуемый генератор 6
2g tipover	$7,6 \cdot 10^{-10}$	$6,5 \cdot 10^{-10}$	$1 \cdot 10^{-9}$	$5 \cdot 10^{-10}$	$6 \cdot 10^{-10}$	$5,1 \cdot 10^{-10}$
Постоянное вращение	$4,5 \cdot 10^{-10}$	$5,4 \cdot 10^{-10}$	$4,4 \cdot 10^{-10}$	$4,7 \cdot 10^{-10}$	$6,6 \cdot 10^{-10}$	$5,7 \cdot 10^{-10}$
Измерение фазовых шумов ШСВ	$3,3 \cdot 10^{-10}$	$2,2 \cdot 10^{-10}$	$5,5 \cdot 10^{-10}$	$5,8 \cdot 10^{-10}$	$6,6 \cdot 10^{-10}$	$5,2 \cdot 10^{-10}$
Измерение фазовых шумов SIN	$3 \cdot 10^{-10}$	$2,6 \cdot 10^{-10}$	$5,3 \cdot 10^{-10}$	$6 \cdot 10^{-10}$	$6,5 \cdot 10^{-10}$	$5,5 \cdot 10^{-10}$

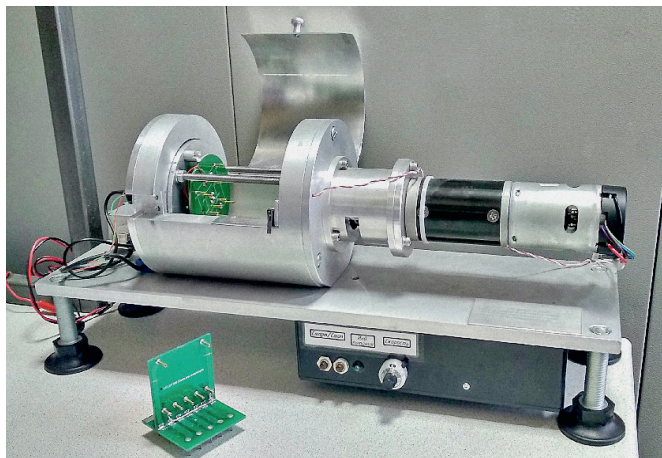


Рис. 4. Автоматизированный стенд для испытания G-чувствительности с постоянным вращением

вращения температура равномерно распределяется внутри объема генератора, что позволяет более точно оценить результат воздействия ускорения.

Стенд для проведения подобного испытания изображен на рис. 4. Генератор помещается внутрь стенда, во время вращения его частота фиксируется с помощью счетчика частоты. Также в работе стенда предусмотрена возможность изменения скорости вращения. Во время вращения генератора в подобной установке частота изменяется по синусоидальному закону. При этом каждое измерение учитывает влияние воздействия сразу по двум осям. Результаты снятия частоты во время вращения вокруг одной из осей на данном стенде представлены на рис. 5.

Однако расчеты сложнее, так как в результате каждого вращения ускорение изменяется сразу вдоль двух осей. Поэтому результаты такого метода менее наглядны.

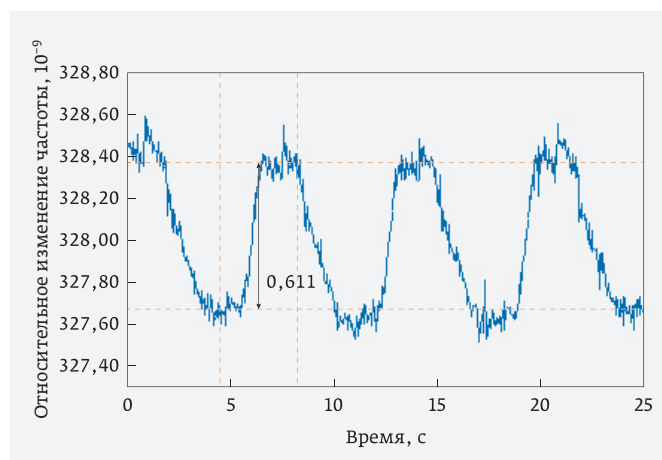


Рис. 5. Результаты испытания на автоматизированном стенде с постоянным вращением

Необходимо также иметь в виду, что при большой скорости вращения должно быть установлено очень малое время счета частоты, а это может привести к большой погрешности измерения.

Описанные методики измерения G-чувствительности при перевороте пригодны только для измерений низкочастотных генераторов (<30 МГц) с высокой температурной стабильностью.

КОСВЕННЫЙ МЕТОД ИЗМЕРЕНИЯ

Другим подходом к измерению G-чувствительности является косвенный метод, позволяющий произвести расчет на основе оценки уровня фазовых шумов под воздействием вибрации. Как уже отмечалось, при приложении ускорения к генератору происходит сдвиг частоты (Δf), пропорциональный величине ускорения и зависящий от его направления. Определяется из уравнения:

$$\frac{\Delta f}{f_0} = \vec{\Gamma} \vec{a} = y,$$

где f_0 – частота генератора без воздействия; \vec{a} – приложенное ускорение; $\vec{\Gamma}$ – вектор G-чувствительности; y – сдвиг частоты [3].

Следует учитывать, что в данном случае может появиться погрешность, обусловленная изменением уровня ФШ генератора под влиянием не только приложенной к нему вибрации, но и различных шумов в тракте сигнала. Стенд для испытаний фазовых шумов под воздействием вибрации показан на рис. 6.

Генератор (цифра 1 на фото), установленный на виброплатформу (2), подвергается воздействию вибрации (синусоидальной или широкополосной), параметры которой задаются перед началом испытания. К этим параметрам относятся амплитуда и частота вибрации (для широкополосной – диапазон частот). Особое внимание стоит обратить на коаксиальные кабели (3), соединяющие испытуемый генератор, который находится на виброплатформе, с измерительной системой (4). Все провода должны быть надежно закреплены, чтобы не возникло дополнительных изменений фазы.

Специальное приспособление из инженерного пластика ZEDEX (5) для крепления генераторов к вибростенду позволяет избежать магнитных наводок от самого стенда на низких частотах.

Синусоидальная вибрация

При воздействии синусоидальной вибрации в спектре сигнала появляются дополнительные боковые полосы на частоте вибрации (рис. 7), уровень которых можно измерить с помощью узкополосного анализатора спектра или измерителя фазовых шумов.

Вычислить G-чувствительность вдоль одной из осей генератора можно по формуле:

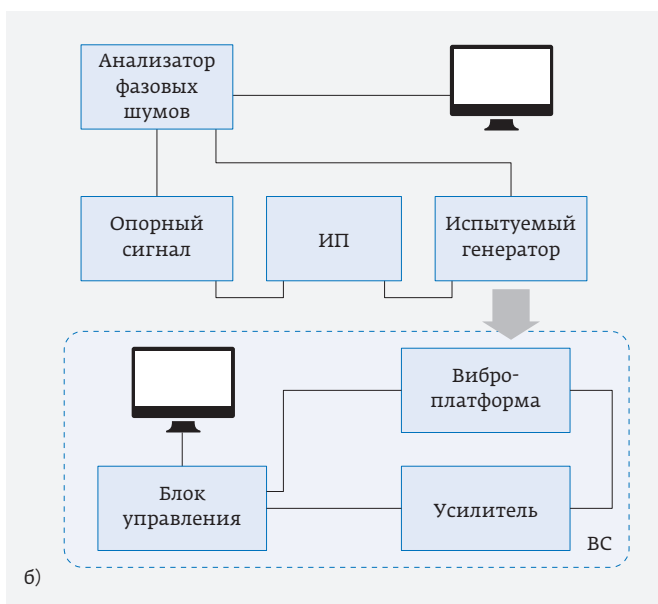
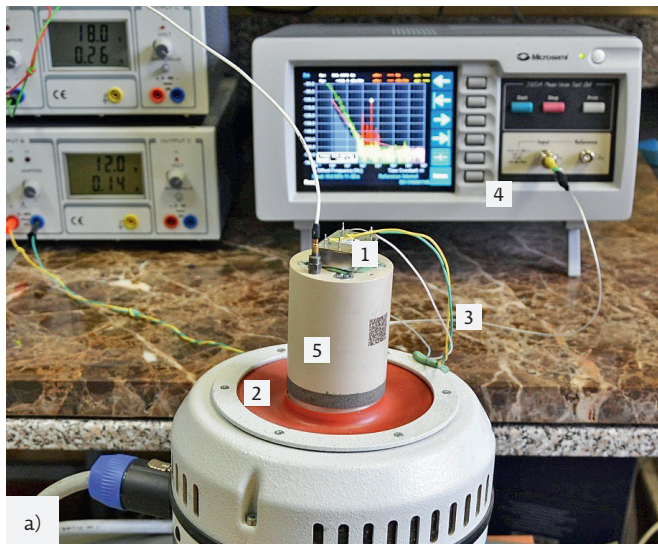


Рис. 6. Стенд для измерения уровня фазовых шумов под воздействием вибрации

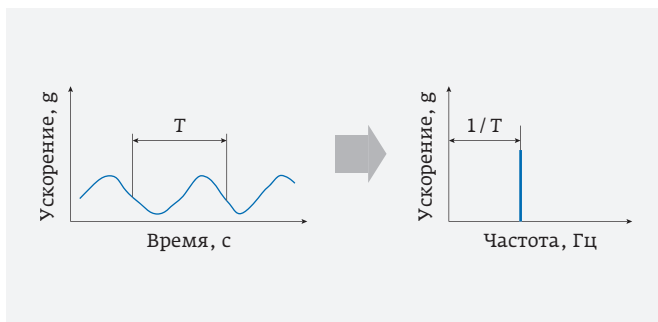


Рис. 7. Синусоидальная вибрация во временной (слева) и частотной (справа) области

$$g = \frac{2f_v}{Af_0} 10^{\frac{L(f_v)}{20}}$$

где A – пиковое значение приложенного ускорения, f_v – частота вибрации, $L(f_v)$ – уровень фазовых шумов на частоте вибрации [3].

На рис. 8 показаны результаты оценки уровня фазовых шумов под воздействием синусоидальной вибрации с частотой 210 Гц и амплитудой 5 г. Таким образом, измерив уровень фазовых шумов, можно рассчитать G-чувствительность генератора:

$$g_x = \frac{2f_v}{Af_0} 10^{\frac{L(f_v)_x}{20}} = \frac{2 \cdot 210}{5 \cdot 100 \cdot 10^6} 10^{\frac{-90}{20}} = 0,26 \cdot 10^{-10} / g;$$

$$g_y = \frac{2f_v}{Af_0} 10^{\frac{L(f_v)_y}{20}} = 2,10 \cdot 10^{-10} / g;$$

$$g_z = \frac{2f_v}{Af_0} 10^{\frac{L(f_v)_z}{20}} = 4,21 \cdot 10^{-10} / g;$$

$$\bar{\Gamma} = \sqrt{G_x^2 + G_y^2 + G_z^2} = \sqrt{\left(\frac{g_x}{2}\right)^2 + \left(\frac{g_y}{2}\right)^2 + \left(\frac{g_z}{2}\right)^2} = 4,7 \cdot 10^{-10} / g.$$

Широкополосная синусоидальная вибрация

Для оценки G-чувствительности также можно применять широкополосную вибрацию. В таком случае вибрация случайным образом распределена по диапазону частот, фаз, амплитуд; и ускорение может быть описано его спектральной плотностью мощности $S_a(f)$ (рис. 9) [4].

Воздействие случайной вибрации на фазовый шум определяется по формуле

$$L(f_v) = 20 \log(\bar{\Gamma} \frac{f_0}{f_v} \sqrt{\frac{S_a(f_v)}{2}}).$$

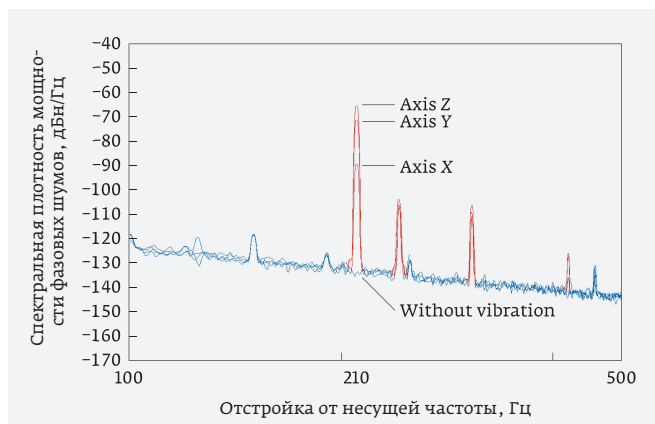


Рис. 8. Результаты измерения фазовых шумов под воздействием синусоидальной вибрации

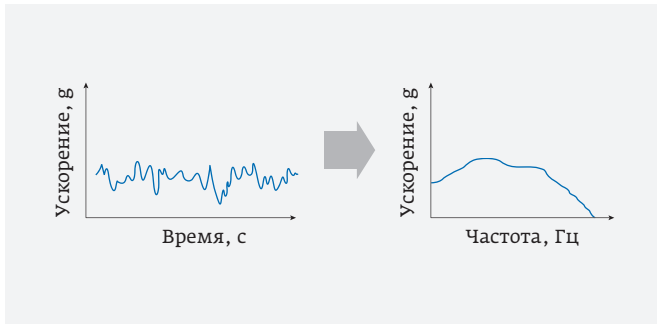


Рис. 9. Широкополосная случайная вибрация во временной (слева) и частотной (справа) области

Тогда формула для G-чувствительности имеет вид:

$$\bar{\Gamma} = \frac{f_v}{f_0} \sqrt{\frac{2}{S_a(f_v)}} \cdot 10^{\frac{L(f_v)}{20}},$$

где $S_a(f)$ – спектральная плотность мощности случайного ускорения, $g^2/\text{Гц}$ [3].

Деградация фазовых шумов генератора при воздействии на него широкополосной синусоидальной вибрации в диапазоне 50–200 Гц и среднеквадратичной СПМ $0,17 g^2/\text{Гц}$ показана на рис. 10.

Фазовые шумы под воздействием вибрации

Уровень фазовых шумов зависит в первую очередь от G-чувствительности генератора и приложенной вибрации, а не от уровня фазовых шумов самого генератора. На рис. 11 разными цветами показаны фазовые шумы четырех генераторов на 100 МГц с разной G-чувствительностью без воздействия вибрации (сплошные линии) и при вибрации с амплитудой 5g (пунктирные линии). Так, например, для двух генераторов на 100 МГц с разным уровнем фазовых шумов $-129 \text{ дБс}/\text{Гц}$ и $-149 \text{ дБс}/\text{Гц}$ на 100 Гц от несущей частоты и одинаковой величиной G-чувствительности $10^{-9}/g$ при приложенной вибрации с амплитудой 5g будет характерен одинаковый уровень фазовых шумов $-52 \text{ дБс}/\text{Гц}$ на 100 Гц. Генератор с G-чувствительностью $3 \cdot 10^{-10}/g$ будет иметь уровень фазовых шумов $-63 \text{ дБс}/\text{Гц}$ на 100 Гц. Из рис. 11 видно, что у генератора с низкой G-чувствительностью (голубая кривая) уровень фазовых шумов при воздействии ускорения ниже, чем у генераторов с высокой G-чувствительностью.

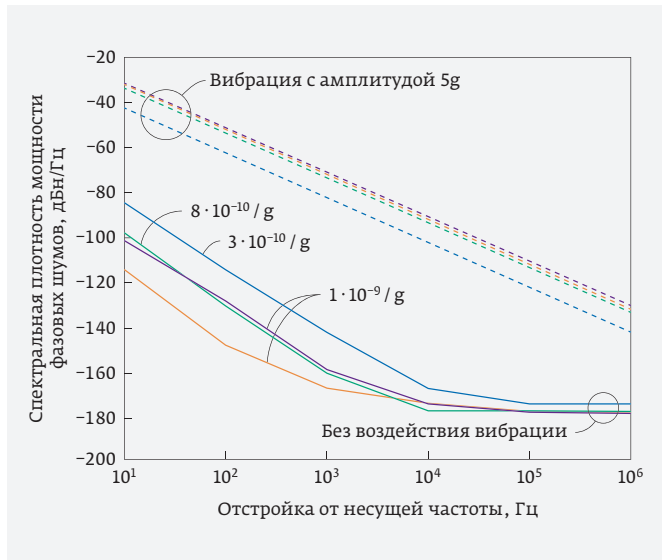


Рис. 11. Фазовые шумы генераторов с различной G-чувствительностью

СРАВНЕНИЕ МЕТОДОВ

Результаты измерения G-чувствительности нескольких генераторов всеми описанными методами приведены в табл. 1.

Для 10 МГц генераторов результаты примерно одинаковы, а для 100 МГц результаты измерения на переверот показывают большие величины, чем косвенные методы измерения по уровню фазовых шумов. Результат измерения G-чувствительности при синусоидальной вибрации менее подвержен воздействию тепловых процессов, таких как конвекция, и позволяет наиболее точно оценить G-чувствительность генератора.

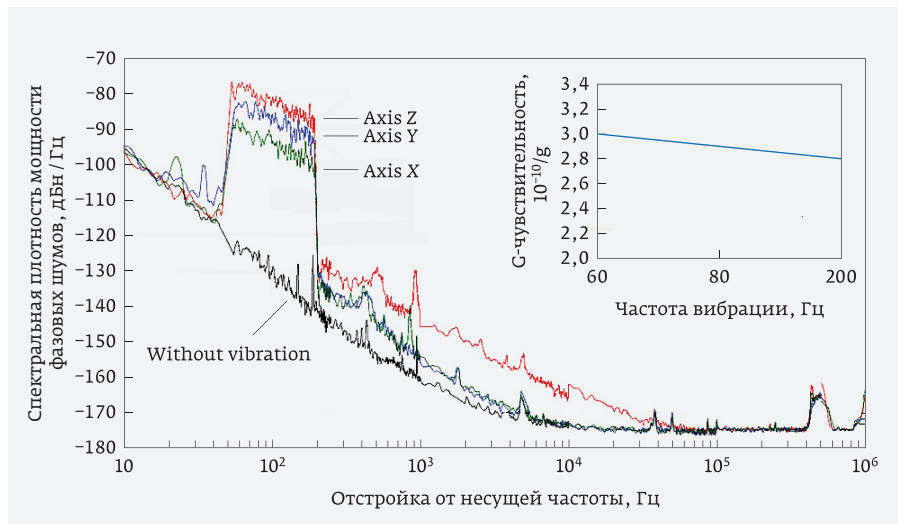


Рис. 10. Результаты измерения фазовых шумов под воздействием широкополосной вибрации

Таблица 2. Генераторы с низкой G-чувствительностью производства АО «Морион»

Тип генератора	Частота, МГц	G-чувствительность, g
MV207	10	$<0,5 \cdot 10^{-9}$
MV209	10	$<0,5 \cdot 10^{-9}$
MV317	100	$<3 \cdot 10^{-10}$

В настоящее время АО «Морион» предлагает генераторы с низкой G-чувствительностью (табл. 2).

* * *

При использовании генератора в условиях, когда к нему прикладывается ускорение, его фазовые шумы определяются в первую очередь именно G-чувствительностью. Наиболее универсальным методом измерения этого параметра является оценка по уровню фазовых шумов при

воздействии синусоидальной вибрации. Измерение методом переворота хотя и является самым простым методом измерения, во многих случаях оно не позволяет достоверно оценить уровень чувствительности генератора к ускорению из-за влияния других процессов во время подобного измерения.

ЛИТЕРАТУРА

1. **Fry S.** Acceleration Sensitivity Characteristics of Quartz Crystal Oscillators. GreenRay Industries Inc, 2006.
2. **Filler R. L.** The acceleration sensitivity of quartz crystal oscillators: a review // IEEE Transactions on ultrasonics, ferroelectrics and frequency control. 1998. V. 35. No. 3.
3. **Vig J. R.** Quartz crystal resonators and oscillators: a tutorial, US Army Communications-Electronics Research, Development & Engineering Center Fort Monmouth, NJ, USA, July 2016. <https://iee-uffc.org/download/quartz-crystal-resonators-and-oscillators-for-frequency-control-and-timing-applications-a-tutorial-2>
4. **Hati A.** PM Noise of Oscillators and Components in the Presence of Vibration. NIST. 2009.