

Измерение G-чувствительности кварцевых генераторов

Юрий Иванов, Аркадий Никонов,
Эльвира Князева (morion@morion.com.ru)

Важным требованием, предъявляемым к кварцевым генераторам, является обеспечение высокой стабильности частоты генерируемых колебаний, определяющей точность и разрешающую способность радиолокационных и радионавигационных систем, погрешность измерений в устройствах измерительной техники, качественные характеристики и надёжность систем связи, радиовещания и телевидения. Эта стабильность зависит от многих факторов, включая ускорение, приложенное к генератору, которое может проявляться 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

Зависимость стабильности частоты кварцевых генераторов от воздействия ускорения или вибрации особенно критична для некоторых применений, например при работе на подвижной технике. Данный параметр принято называть G-чувствительностью генератора. Он определяется как относительное изменение выходной частоты генератора при воздействии ускорения 1g. Величина возникшего частотного сдвига при этом может варьироваться от 10^{-8} до 10^{-11} на 1g.

G-чувствительность является векторной величиной, т.к. зависит не только от значения, но и от направления ускорения относительно трёх взаимно перпендикулярных осей генера-

тора. Таким образом, наибольший сдвиг частоты генератора произойдёт, в случае если приложенное ускорение направлено параллельно вектору G-чувствительности. Величину и ориентацию вектора G-чувствительности Γ определяют путём измерения отдельных взаимно ортогональных компонент в осях x, y, z. (см. рис. 1) [1].

МЕТОДЫ ИЗМЕРЕНИЯ 2G tipover

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

полученное изменение частоты генератора. Для получения Γ следует провести подобный замер для всех трёх осей и вычислить его величину по формуле:

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

На рисунке 2 представлен пример прописи частоты во время нескольких последовательных поворотов вокруг одной оси. Полученный сдвиг частоты составляет $0,89 \times 10^{-9}$ – таким образом, G-чувствительность вдоль этой оси будет составлять $0,45 \times 10^{-9}$. Для других осей подобные результаты составили $0,3 \times 10^{-9}$ и $0,21 \times 10^{-9}$ – соответственно, Γ генератора будет равен $0,58 \times 10^{-9}/g$.

Несомненным достоинством этого метода является его простота: подобное измерение можно провести без дополнительных приборов прямо на столе. К сожалению, данный метод не универсален, т.к. генераторы с низкой температурной стабильностью демонстрируют дополнительные изменения частоты, не зависящие от G-чувствительности резонатора, которые вызваны изменением температуры вследствие конвекции воздуха в генераторе. Помимо этого, необходимо понимать, что для расчёта G-чувствительности необходимо брать отсчёты частоты непосредственно до и после поворота. Метод 2G tipover применим для измерения G-чувствительности термостатированных высокостабильных генераторов – результаты при этом хорошо совпада-

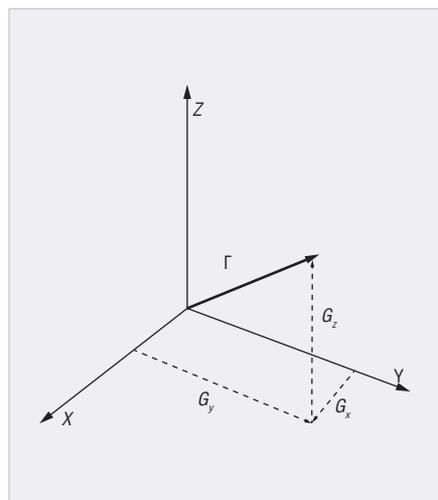


Рис. 1. Векторное представление G-чувствительности

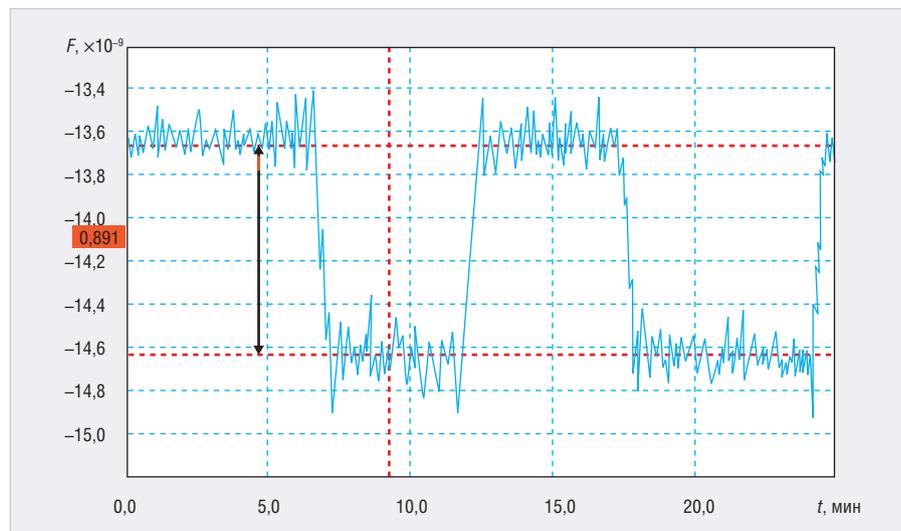


Рис. 2. Результаты испытания G-чувствительности по одной оси методом переворота

ют с результатами измерения другими способами (см. табл. 1).

Автоматизированный стенд

На рисунке 3 представлены схема и изображение автоматизированного стенда для проведения испытания методом 2G tipover.

Данный стенд обеспечивает автоматический поворот вокруг каждой из трёх осей генераторов и снятие частоты непосредственно до и после поворота. Помимо этого, в стенде предусмотрены места сразу для 15 генераторов.

Измерения при постоянном вращении

Ещё одним из возможных вариантов измерения G-чувствительности являются измерения при постоянном вращении, за счёт которого температура равномерно распределяется внутри объёма генератора, что позволяет более точно оценить результат воздействия ускорения.

На рисунке 4 изображён стенд для проведения подобного испытания. Генератор помещается внутрь стенда, во время вращения его частота фиксируется с помощью счётчика частоты. Также в данном стенде предусмотрена возможность изменения скорости вращения. Во время вращения генератора в подобной установке частота изменяется по синусоидальному закону. При этом каждое измерение содержит влияние воздействия сразу по 2 осям.

Результаты снятия частоты во время вращения вокруг одной из осей в данном стенде представлены на рисунке 5. Расчёты при этом более сложны, т.к. в результате каждого вращения происходит изменение ускорения сразу вдоль двух осей. Тем самым результаты такого метода являются менее наглядными. Также необходимо иметь в виду, что при высокой скорости вращения должно быть установлено очень малое время счёта 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 хорошей температурной стабильностью.

Косвенный метод измерения

Другим подходом к измерению G-чувствительности является косвенный метод, позволяющий рассчитать

Таблица 1. Результаты измерений G-чувствительности

Способ	100 МГц (MV136)			10 МГц (MV209)		
	DUT № 1	DUT № 2	DUT № 3	DUT № 4	DUT № 5	DUT № 6
2G tipover	$7,6 \times 10^{-10}$	$6,5 \times 10^{-10}$	1×10^{-9}	5×10^{-10}	6×10^{-10}	$5,1 \times 10^{-10}$
Постоянное вращение	$4,5 \times 10^{-10}$	$5,4 \times 10^{-10}$	$4,4 \times 10^{-10}$	$4,7 \times 10^{-10}$	$6,6 \times 10^{-10}$	$5,7 \times 10^{-10}$
Измерение фазовых шумов ШСВ	$3,3 \times 10^{-10}$	$2,2 \times 10^{-10}$	$5,5 \times 10^{-10}$	$5,8 \times 10^{-10}$	$6,6 \times 10^{-10}$	$5,2 \times 10^{-10}$
Измерение фазовых шумов SIN	3×10^{-10}	$2,6 \times 10^{-10}$	$5,3 \times 10^{-10}$	6×10^{-10}	$6,5 \times 10^{-10}$	$5,5 \times 10^{-10}$

Примечание: DUT – испытуемое устройство; ШСВ – широкополосная синусоидальная вибрация.

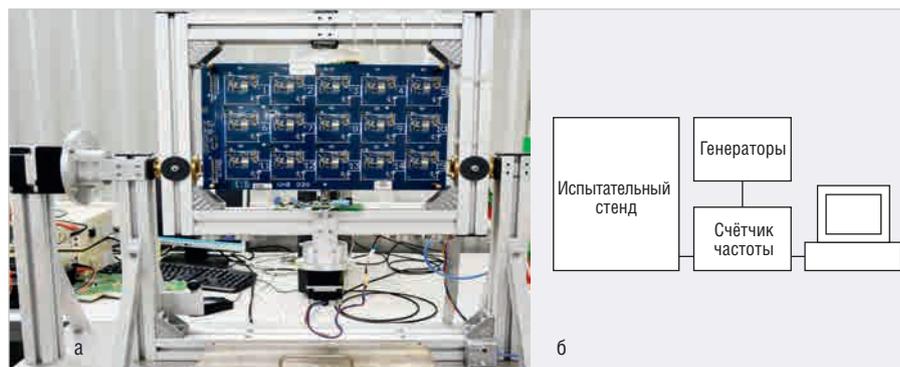


Рис. 3. Автоматизированный стенд для испытания G-чувствительности (2G tipover test): а) общий вид; б) структурная схема

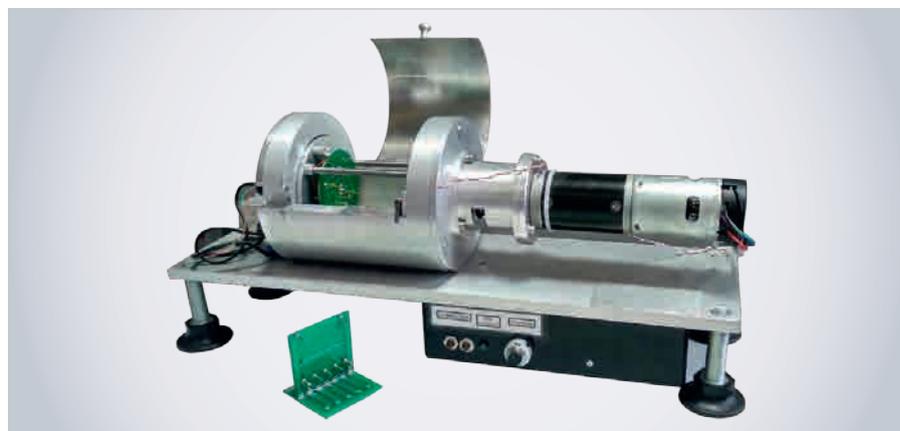


Рис. 4. Автоматизированный стенд для испытания G-чувствительности с постоянным вращением

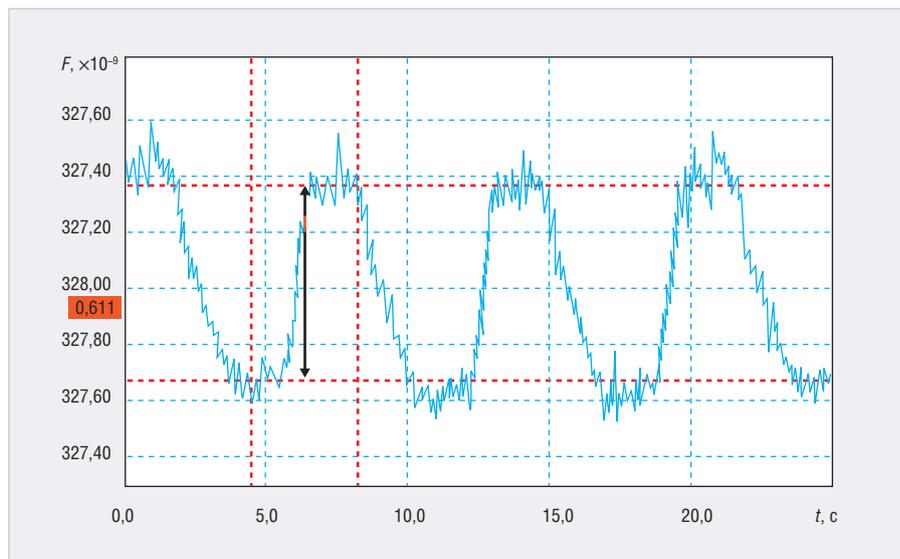


Рис. 5. Результаты испытания в автоматизированном стенде с постоянным вращением

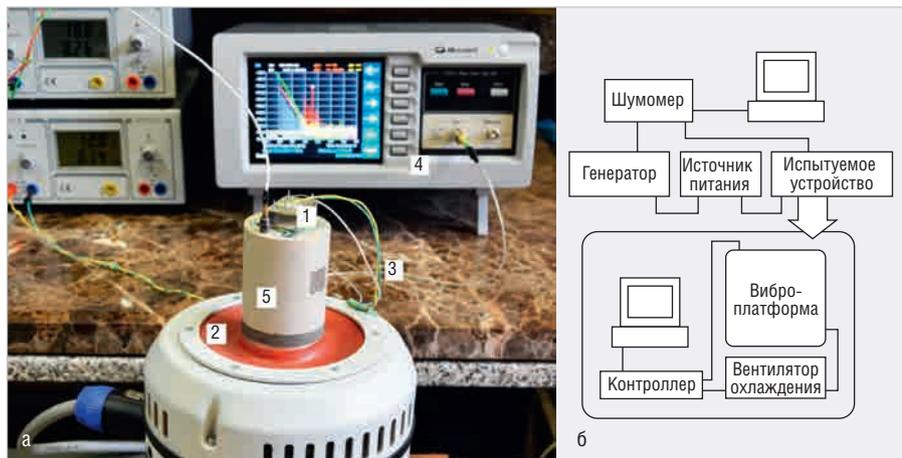


Рис. 6. Стенд для измерения уровня фазовых шумов под воздействием вибрации: а) общий вид; б) структурная схема

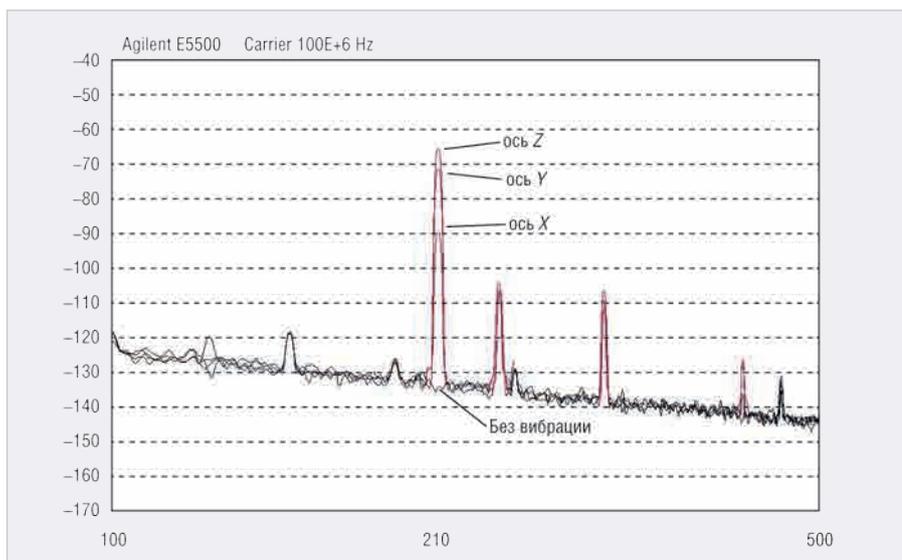


Рис. 8. Результаты измерения фазовых шумов под воздействием синусоидальной вибрации

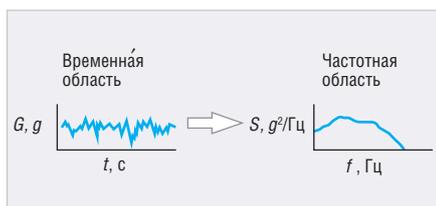


Рис. 9. Спектр вибрации, случайным образом распределённой по диапазону частот

её на основе оценки уровня фазовых шумов под воздействием вибрации.

Как уже было сказано, при приложении ускорения к генератору происходит сдвиг частоты (Δf), пропорциональный величине ускорения и зависящий от его направления. Определяется как:

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

где f_0 – частота генератора без воздействия, a – приложенное ускорение, Γ – вектор G-чувствительности, y – сдвиг частоты [3].

Стоит обратить внимание, что в данном случае может появиться погрешность, обусловленная изменением уровня фазовых шумов (ФШ) генератора под влиянием не только приложенной к нему вибрации, но и различных шумов в тракте сигнала.

На рисунке 6 показаны стенд для испытаний фазовых шумов под воздействием вибрации и структурная схема измерений.

Генератор 1 (см. рис. 6а), 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 генератор с измерительной системой 4. Все провода должны быть надёжно закреплены, чтобы

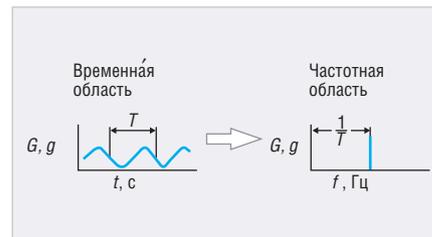


Рис. 7. Появление дополнительной боковой полосы на частоте вибрации

не возникало дополнительных изменений фазы.

Специальное приспособление 5 из инженерного пластика ZEDEX 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 (см. 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 следующей формуле:

$$G = \frac{2 \times f_v}{A \times f_0} \times 10^{\frac{L(f_v)}{20}},$$

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

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

$$G_x = \frac{2 \times f_v}{A \times f_0} \times 10^{\frac{L(f_v)}{20}} = \frac{2 \times 210}{5 \times 100 \times 10^6} \times 10^{-90} = 0,26 \times 10^{-10} / g;$$

$$G_y = \frac{2 \times f_v}{A \times f_0} \times 10^{\frac{L(f_v)}{20}} = 2,10 \times 10^{-10} / g;$$

$$G_z = \frac{2 \times f_v}{A \times f_0} \times 10^{\frac{L(f_v)}{20}} = 4,21 \times 10^{-10} / g;$$

$$\Gamma = \sqrt{G_x^2 + G_y^2 + G_z^2} = \sqrt{\frac{G_x^2}{2} + \frac{G_y^2}{2} + \frac{G_z^2}{2}} = 4,7 \times 10^{-10} / g.$$

Широкополосная синусоидальная вибрация

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

Воздействие случайной вибрации на фазовый шум определяется по формуле:

$$20 \log(G \frac{f_0}{f_v} \sqrt{\frac{S_a(f_v)}{2}})$$

Тогда формула для G-чувствительности будет иметь следующий вид:

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

где $S_a(f_v)$ – спектральная плотность мощности (СПМ) случайного ускорения ($g^2/Гц$) [3].

На рисунке 10 изображена деградация фазовых шумов генератора при воздействии на него широкополосной синусоидальной вибрации в диапазоне 50...200 Гц и среднеквадратичной СПМ 0,17 $g^2/Гц$.

Фазовые шумы под воздействием вибрации

Следует понимать, что уровень фазовых шумов зависит в первую очередь от G-чувствительности генератора и приложенной вибрации, а не от уровня фазовых шумов самого генератора. Так, например, два генератора на 100 МГц с разным уровнем фазовых шумов –129 дБн/Гц и –149 дБн/Гц на 100 Гц от несущей частоты и одинаковой величиной G-чувствительности $1 \times 10^{-9}/g$ при приложенной вибрации с амплитудой 5g будут иметь одинаковый уровень фазовых шумов –52 дБн/Гц на 100 Гц. А генератор с G-чувствительностью $3 \times 10^{-10}/g$ будет иметь уровень фазовых шумов –63 дБн/Гц на 100 Гц.

На рисунке 11 видно, что у генератора (голубая кривая) с низкой G-чувствительностью уровень фазовых шумов при воздействии ускорения ниже, чем у генераторов с высокой G-чувствительностью.

СРАВНЕНИЕ МЕТОДОВ

В таблице 1 приведены результаты измерения нескольких генераторов всеми описанными в статье методами.

Для 10 МГц генераторов результаты примерно одинаковы, в то время как для 100 МГц приборов результаты измерений на переворот показывают боль-

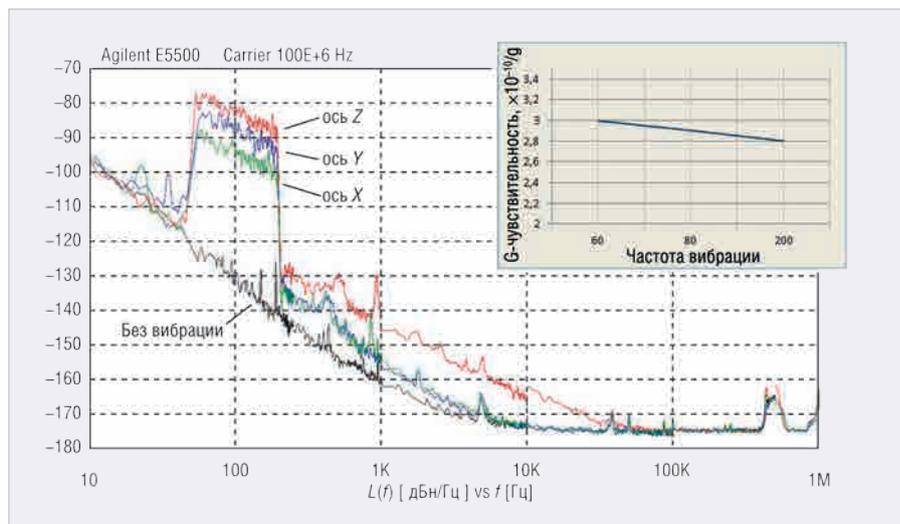


Рис. 10. Результат измерения фазовых шумов под воздействием широкополосной вибрации

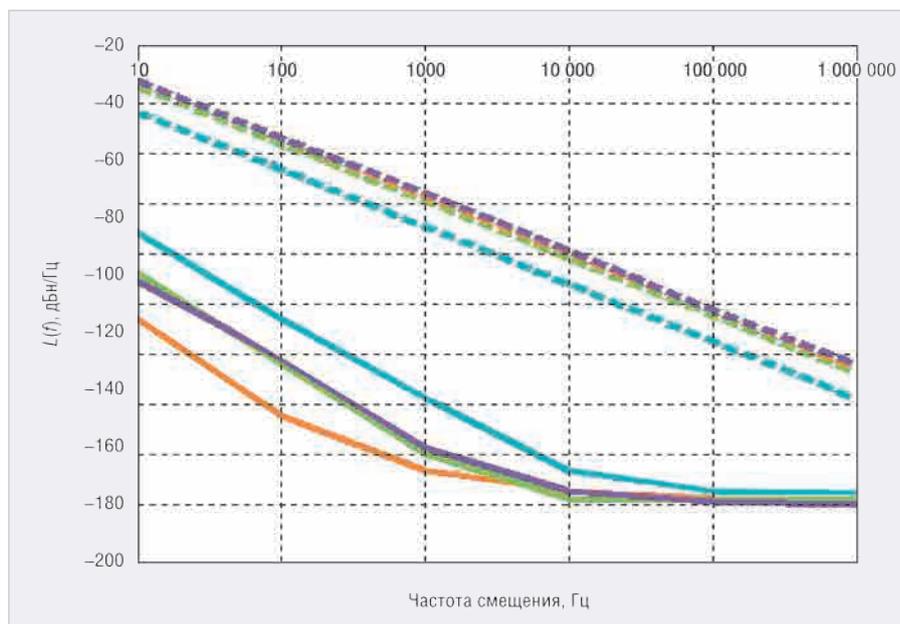


Рис. 11. Фазовые шумы генераторов с различной G-чувствительностью

шие величины, чем косвенные методы измерений 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.

На сегодняшний день АО «Морион» может предложить генераторы с низкой G-чувствительностью (см. табл. 2).

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

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

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. Vol. 35. № 3. May 1998.
3. Vig J.R. Quartz crystal resonators and oscillators: a tutorial, US Army. Communications-Electronics Research, Development & Engineering Center Fort Monmouth. NJ, USA. March 2004.
4. Hati A. PM Noise of Oscillators and Components in the Presence of Vibration. NIST. 2009.

НОВОСТИ МИРА

**Правительство РФ
ПРЕДПОЧИТАЕТ КОНКУРЕНТНУЮ
МОДЕЛЬ РАЗВИТИЯ 5G**

Российское правительство считает конкурентную модель по созданию и внедрению сети пятого поколения в России предпочтительным вариантом – об этом журналистам сообщил вице-премьер Максим Акимов.

Ранее Минкомсвязь представила ряду министерств концепцию развития сети 5G, предполагающую создание частного единого инфраструктурного оператора из-за не-

хватки частотного спектра в России. В министерстве считают эту модель в условиях дефицита свободных частот единственно возможной. Минкомсвязь готова пересмотреть концепцию в пользу более конкурентного распределения, если на самом высоком уровне будет создан национальный комитет по 5G (предложение по его созданию вице-премьер Максим Акимов высказал в январе) и будет принято решение расчитать частоты под 5G так, чтобы хватило каждому оператору.

Максим Акимов также сообщил, что финальное решение по выбору развития сети будет принято, когда разрешится вопрос расчистки частот и коммерциализации технологий для работы с 5G.

Согласно паспорту нацпрограммы «Цифровая экономика РФ», концепция создания и развития сетей 5G должна быть утверждена до 31 марта 2019 года в рамках федерального проекта «Информационная инфраструктура», а диапазон частот – до 30 сентября 2019 года. В декабре 2018 года Государственная комиссия по радиочастотам решила без конкурса выделить частоты для тестирования 5G единому инфраструктурному оператору, если его создадут операторы связи. В ноябре 2018 года «Ростелеком» и «Мегафон» объявили о планах совместного развития сетей 5G в России, а в январе 2019 года – о создании совместного предприятия.

Согласно отчёту Ericsson Mobility Report, свыше 40% мирового населения к концу 2024 года будут жить в зоне действия сетей 5G, и в этих сетях будет обрабатываться четверть мобильного трафика. По данным отчёта, лидерами в области 5G в ближайшие годы будут Северная Америка и Северо-Восточная Азия.

Новости Интернета вещей

«ЕВРОЦЕМЕНТ ГРУП» ВНЕДРЯЕТ СИСТЕМУ МОНИТОРИНГА НА БАЗЕ RFID-МЕТОК «МИКРОНА»

На 14 российских предприятиях холдинга «Евроцемент груп» внедряется система мобильного мониторинга производственного оборудования на базе RFID-меток «Микрона» для проведения техосмотров. Первыми заводами, где промаркировали более 1000 производственных установок, стали «Липецкцемент» и «Кавказцемент».

Объекты, подлежащие контролю, маркируются усиленными RFID-метками высокочастотного и ультравысокочастотного диапазона. Метки разработаны под проект и запущены в серийное производство в 2018 году. Считывание и запись на метку эксплуатационных характеристик оборудования осуществляется через мобильные устройства идентификации оборудования.

В настоящее время RFID-системы и продукция «Микрона» успешно применяются в различных отраслях для решения таких задач, как инвентаризация, логистика и прослеживаемость товаропотоков, управление доступом, автоматизация техпроцессов, контроль контрафакта, цифровизация промышленных и сельскохозяйственных предприятий и др.

Пресс-служба ПАО «Микрон»



Магнитоэлектрики MICROMETALS

Применение сердечников Micrometals гарантирует:

- снижение стоимости индуктивных компонентов
- снижение потерь на 30...50% по сравнению с ферритами
- повышение надёжности аппаратуры
- оптимизацию конструкции и уменьшение габаритов индуктивных компонентов



ОФИЦИАЛЬНЫЙ ДИСТРИБЬЮТОР
АКТИВНЫЙ КОМПОНЕНТ ВАШЕГО БИЗНЕСА
(495) 232-2522 • INFO@PROCHIPRU • WWW.PROCHIPRU



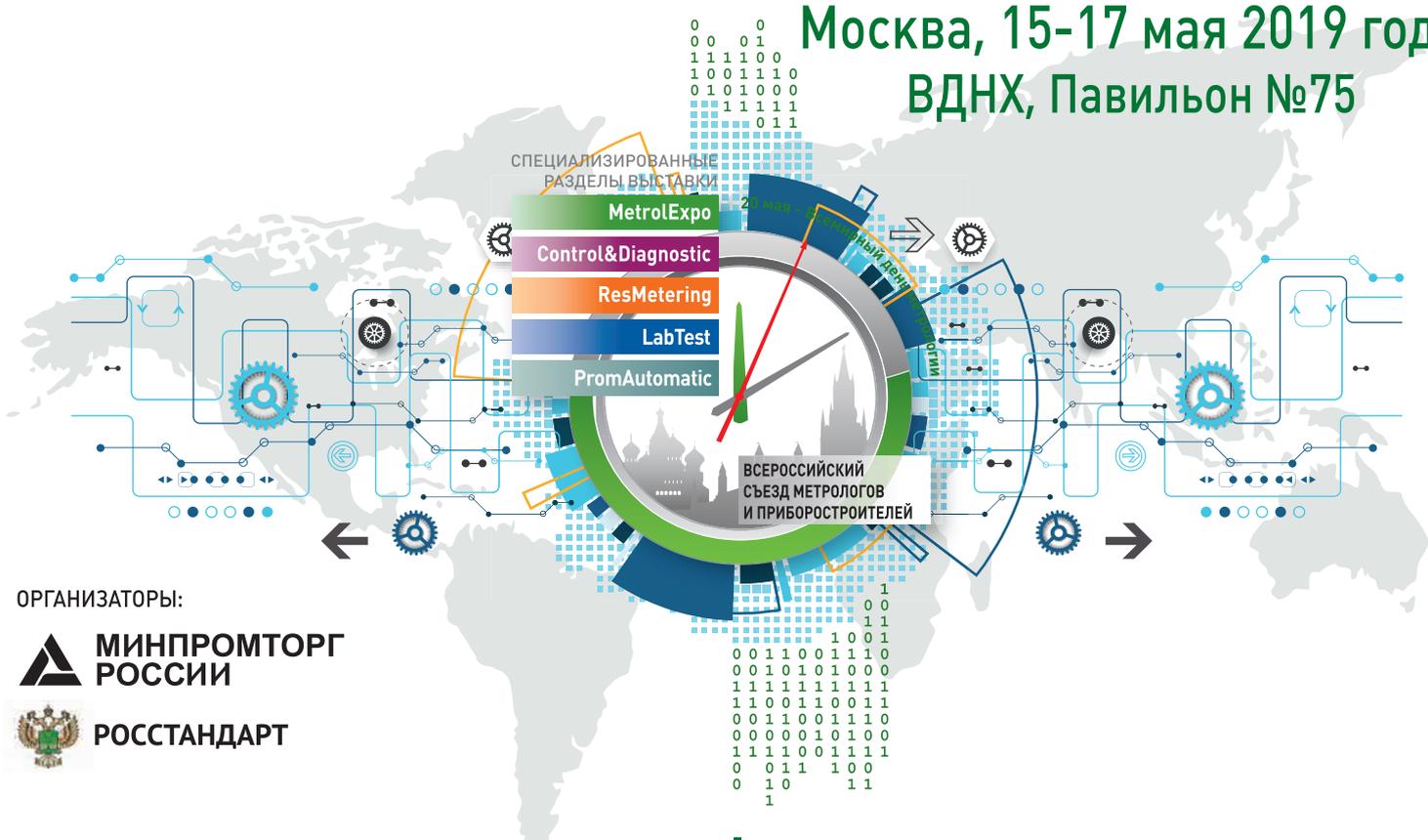
ПРОЧИТАЙТЕ

ГЛАВНОЕ СОБЫТИЕ В ОБЛАСТИ ПРИБОРОСТРОЕНИЯ, ТОЧНЫХ ИЗМЕРЕНИЙ, МЕТРОЛОГИИ И ИСПЫТАНИЙ

МОСКОВСКИЙ МЕЖДУНАРОДНЫЙ ИННОВАЦИОННЫЙ ФОРУМ

ТОЧНЫЕ ИЗМЕРЕНИЯ – ОСНОВА КАЧЕСТВА И БЕЗОПАСНОСТИ

Москва, 15-17 мая 2019 года
ВДНХ, Павильон №75



ОРГАНИЗАТОРЫ:

 **МИНПРОМТОРГ
РОССИИ**

 **РОССТАНДАРТ**

СПЕЦИАЛИЗИРОВАННЫЕ РАЗДЕЛЫ ВЫСТАВКИ



METROLEXPO

МЕТРОЛОГИЯ, ИЗМЕРЕНИЯ И ИСПЫТАНИЯ



CONTROL&DIAGNOSTIC

КОНТРОЛЬ И ДИАГНОСТИКА



LABTEST

ЛАБОРАТОРНЫЕ ИСПЫТАНИЯ



PROMAUTOMATIC

ПРОМЫШЛЕННАЯ АВТОМАТИЗАЦИЯ



RESMETERING

УЧЁТ ЭНЕРГОРЕСУРСОВ



WEIGHT SALON

ВЕСОВОЙ САЛОН

ЦИФРЫ И ФАКТЫ 2018 года:

Участники – 296 компаний из 24 стран мира

Посетители – 5046 специалистов
из 63 регионов России

Площадь экспозиции – 6870 м²

Приборы и оборудование – 2145 единиц

Мероприятия съезда – 25 секций

Докладчики – 84 чел.

Делегаты – 980 чел.



ДИРЕКЦИЯ ФОРУМА

Тел./Факс: +7 (495) 937-40-23

E-mail: metrol@expoprom.ru

Спешите забронировать стенд
www.metrol.expoprom.ru