

Новейшие кварцевые генераторы с высокой кратковременной стабильностью и особенности их применения

Юрий Иванов, Аркадий Никонов

Кратковременная стабильность частоты – один из основных параметров кварцевых генераторов, используемых в измерительной аппаратуре. Наиболее часто именно она определяет стабильность всей измерительной системы на коротких временах. Новейшие генераторы производства АО «Морион» могут обеспечивать стабильность частоты 8×10^{-14} за 1 секунду. В статье приводится описание таких генераторов и аспекты их применения для достижения таких уровней стабильности.

Стабильность частоты – основная характеристика любых генераторов, определяющая рабочие характеристики аппаратуры, в которой они применяются. Частота генераторов может отклоняться от первоначального значения под действием разных дестабилизирующих факторов – таких как изменение температуры, старение кварцевого резонатора, воздействие вибрации, нестабильность питающего напряжения и т.п. Основной мерой стабильности частоты является относительное изменение частоты, оно определяется как отношение разности текущей и номинальной (первоначальной) частоты к этой номинальной частоте.

$$y = \frac{(f - f_0)}{f_0} = \frac{df}{f}$$

Принято разделять нестабильность частоты кварцевых генераторов по времени на кратковременную

и долговременную. Кратковременная нестабильность определяется за время от долей секунды до нескольких десятков секунд и имеет в основном случайную природу. Долговременная нестабильность определяется за время от нескольких часов до нескольких лет. Она уже является в основном систематической и определяется старением кварцевого резонатора. На рис. 1 представлен схематический график нестабильности частоты от времени и разница между кратковременной и долговременной нестабильностью [1].

Рассмотрим сигнал от кварцевого генератора – математически его можно описать следующим уравнением [1–3]:

$$V(t) = [V_0 + \varepsilon(t)] \cdot \sin[2\pi\nu_0 t + \phi(t)],$$

где V_0 – амплитуда сигнала,

ν_0 – номинальная частота,

$\varepsilon(t)$ – случайные изменения амплитуды (амплитудный шум),

$\phi(t)$ – случайные изменения фазы (фазовый шум).

Графически это можно представить в виде нескольких периодов сигнала, наложенных друг на друга.

В идеальном генераторе амплитудный $\varepsilon(t)$ и фазовый $\phi(t)$ шумы должны быть равны 0. Но в любом реальном генераторе они всегда присутствуют и могут быть обнаружены в выходном сигнале. В основном нас будет интересовать фазовый шум, который и вызывает отклонение частоты от номинального значения. Для измерения частоты всегда необходим какой-то временной интервал. Этот интервал обычно называется временем наблюдения или усреднения [2]. При измерении частоты счётчиками частоты этот интервал обычно называют временем счёта. Ниже показан график относительного изменения частоты кварцевого генератора, полученный счётчиком частоты HP53132 с установленным временем счёта 0,1 с.

Основной мерой кратковременной нестабильности является двухвыборочная стандартная девиация (девиация Аллана) [1–3]. Вычисляется она следующим образом:

$$\sigma_y^2(\tau) = \frac{1}{2} \langle (\bar{y}_{k+1} - \bar{y}_k)^2 \rangle,$$

где $y = \frac{df}{f}$ – относительное изменение частоты за время наблюдения τ ,

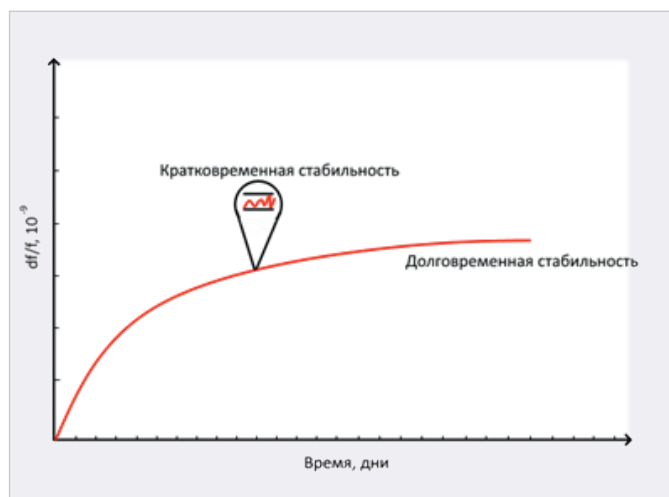


Рис. 1. Долговременная и кратковременная стабильность кварцевых генераторов

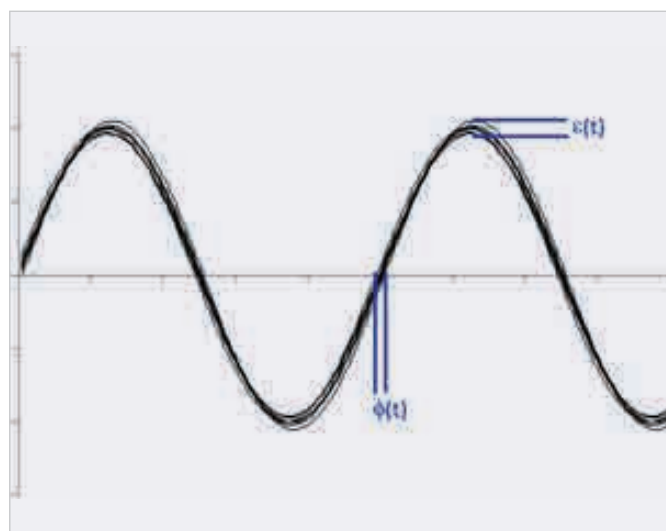


Рис. 2. Сигнал кварцевого генератора

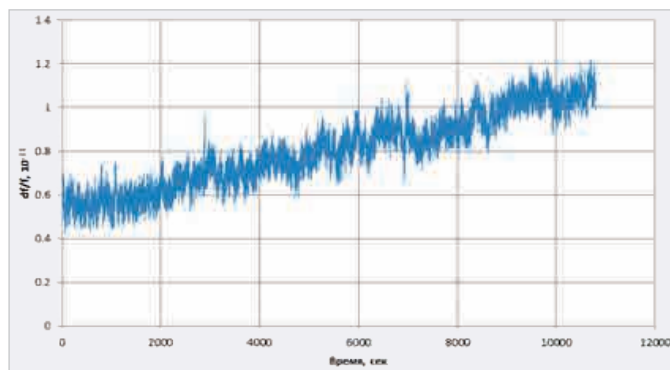


Рис. 3. График относительного изменения частоты кварцевого генератора с временем счёта 0,1 с

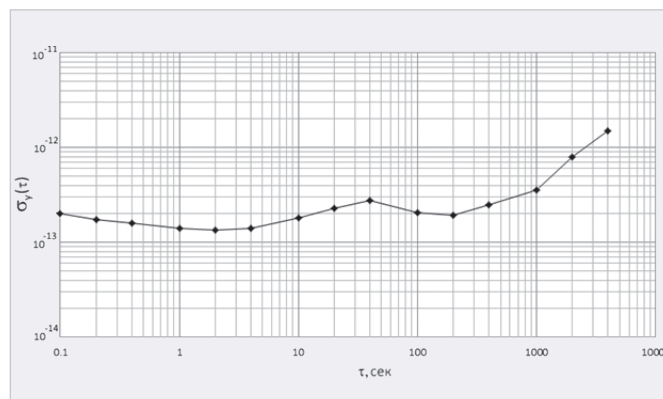


Рис. 4. График девиации Аллана

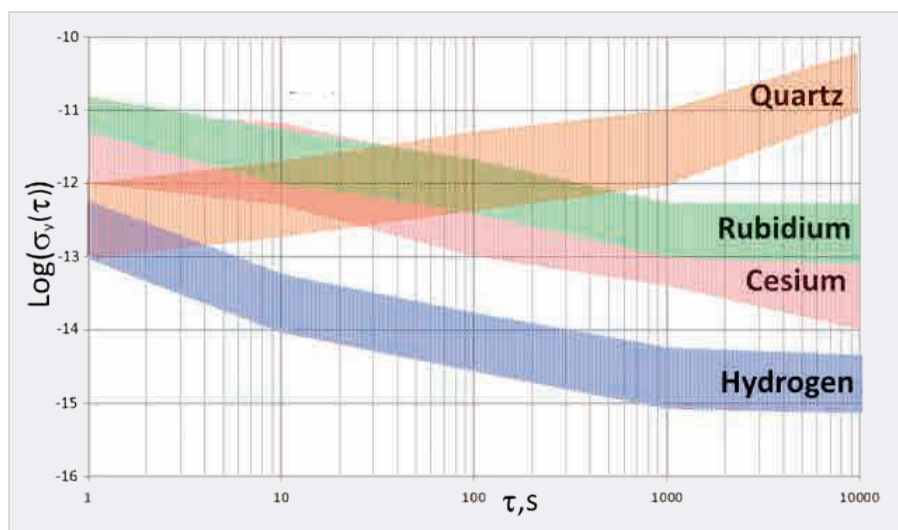


Рис. 5. Стабильность для разных типов генераторов: кварцевых, рубидиевых, цезиевых, водородных

(...) – операция усреднения по времени.

То есть девиация Аллана определяется бесконечным усреднением разности двух соседних отсчётов частоты, отстающих друг от друга на время τ . Понятно, что при практическом применении берётся некоторое конечное число таких усреднений. Обычно для надёжной оценки необходимо провести усреднение, по крайней мере, 100 раз. При этом можно переписать формулу для её использования уже с конечным количеством усреднений:

$$\sigma_y^2(\tau) = \frac{1}{2(M-1)} \sum_{k=1}^{M-1} (\bar{y}_{k+1} - \bar{y}_k)^2,$$

где M – количество усреднений.

Если провести расчёт девиации Аллана для данных, представленных на рис. 2, при разных временах наблюдения, то можно получить следующий график, на котором по оси X отложено время наблюдения (τ).

Можно обратить внимание, что график изменения частоты на рис. 3 имеет постоянный наклон. Этот наклон появляется вследствие старения кварцевого

резонатора. На графике девиации Аллана (рис. 4) он проявляется увеличением значения с ростом времени усреднения. Старение резонатора может начать сказываться на результатах оценки даже при малых временах усреднения (10 секунд и даже чуть меньше), в особенности если генератор был выключен долгое время.

Если представить стабильности разных типов генераторов на одном графике, то можно получить картину, представленную на рис. 5.

Можно видеть, что на коротких временах наблюдения стабильность прецизионных кварцевых генераторов превышает стабильность рубидиевых и цезиевых генераторов и находится на одном уровне с водородными стандартами частоты. С увеличением времени стабильность кварцевых генераторов ухудшается из-за старения кварцевого резонатора. Конечно, представленный на рис. 5 диапазон стабильностей для кварцевых генераторов относится только к одному из их самых стабильных типов – термостатированному кварцевому генератору.

Стабильность частоты кварцевого генератора напрямую зависит от качества кварцевого резонатора, технологии его изготовления, конструктивных решений. Оценивать качество изготовления кварцевого резонатора и его влияние на стабильность частоты можно в основном только статистически – изготавливая опытные партии генераторов и измеряя их параметры. Это довольно трудный и долгий процесс.

Конечно, чтобы реализовать все возможности резонатора при проектировании кварцевого генератора, должны быть учтены многие нюансы. Мы можем сказать, что у нас есть целая линейка прецизионных кварцевых генераторов, в которых применяются однотипные резонаторы, но при этом их кратковременная стабильность лежит в диапазоне от нескольких единиц 10^{-12} (ГК199) до $8 \cdot 10^{-14}$ (ГК336R). Для обеспечения высокой кратковременной стабильности крайне важно:

- максимально устранить влияние изменения температуры окружающей среды;
- обеспечить чистое питание цепей генератора и особенно цепи варикапа;
- использовать элементную базу с крайне низкими собственными шумами.

На первом пункте остановимся чуть более подробно. Чтобы уменьшить температурную нестабильность в прецизионных кварцевых генераторах применяется термостатирование. Кварцевый резонатор и все чувствительные к изменению температуры элементы помещаются внутрь термостата, в котором поддерживается постоянная температура (рис. 6).

Температура внутри термостата устанавливается несколько выше (обычно на $5-15^\circ\text{C}$) верхней рабочей температуры эксплуатации генератора. Такая конструкция позволяет получить тем-

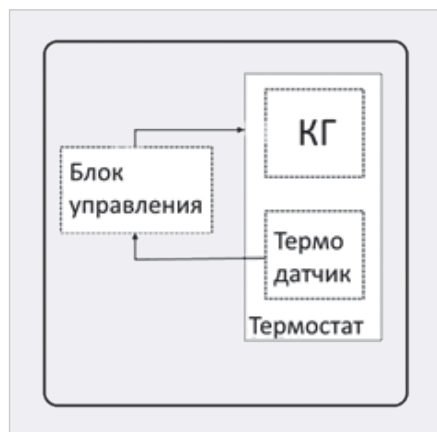


Рис. 6. Схема конструкции термостатированного генератора

пературную стабильность $\pm 1 \cdot 10^{-9}$ в стоградусном интервале. То есть при изменении температуры на 1°C стабильность такого генератора ориентировочно будет равна $\pm 1 \cdot 10^{-11}$. Изменения на десятые доли градуса достаточно для того, чтобы наблюдать нестабильность в 10^{-12} знаках.

Чтобы перейти к стабильности в $10^{-13} \dots 10^{-14}$, нужно максимально нивелировать влияние температуры при эксплуатации и измерениях. Генераторы с лучшей температурной стабильностью также могут и обеспечить меньшие величины кратковременной нестабильности. В таких генераторах уже применяется двойное термостатирование, а также дополнительные меры по уменьшению чувствительности к динамическим изменениям внешних условий. Конечно, это увеличивает габариты и потребление генератора [6].

В качестве примера можно привести два наших генератора: ГК341 и ГК336. ГК341 – это генератор с одинарным термостатированием, он обеспечивает температурную стабильность $\pm 1 \cdot 10^{-9}$ и имеет габариты $50 \times 50 \times 16$ мм. Девиация Аллана за 1 секунду для такого генератора может достигать $1,5 \cdot 10^{-13}$. Конечно, это достигается при соответствующих условиях эксплуатации. Незначительные изменения температуры способны ухудшить стабильность генератора. ГК336 – это генератор с двойным термостатированием, при этом в качестве внутренней ступени в нём используется тот же ГК341. Его габаритные размеры уже $92 \times 80 \times 50$ мм, зато и температурная стабильность может достигать $\pm 1 \cdot 10^{-11}$. Большие габариты внешней ступени термостата позволяют обеспечить хороший температурный демпфер. Такой генератор может обеспечить девиацию Аллана за 1 секунду

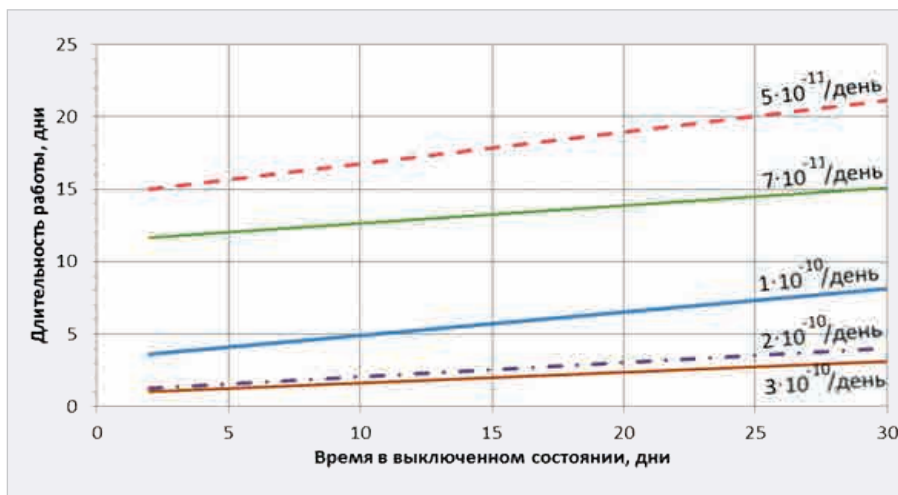


Рис. 7. Типовое время выхода прецизионных генераторов на разные нормы по суточному старению от времени в выключенном состоянии

на уровне $8 \cdot 10^{-14}$. И конечно, он гораздо более устойчив к изменению температуры.

Как уже было отмечено, старение кварцевого резонатора сильно сказывается при увеличении времени наблюдения. Вообще, старение очень сильно зависит от того, сколько генератор был выключен до этого. Ниже показаны характерные кривые суточной стабильности в зависимости от времени выключения генератора (рис. 7).

Так, чтобы обеспечить стабильность $1 \cdot 10^{-10}$ за сутки после выключения на 2 дня, генератору нужно будет проработать 4 дня. Большой уход частоты сразу после включения начинает сказываться уже при времени наблюдения в несколько секунд. Чтобы показывать кратковременную нестабильность в 10^{-13} и тем более в 10^{-14} , генераторам обязательно нужно дать поработать в течение нескольких часов, а лучше обеспечить постоянный режим работы таких генераторов в аппаратуре.

Также стоит обратить внимание на зависимость стабильности от управления частотой генератора. Генератор без возможности перестройки частоты будет обладать большей стабильностью, чем с ней. В таком генераторе отсутствуют цепи управления частотой с варикапом, который вносит собственные шумы. Наш самый стабильный на сегодняшний день генератор ГК336R без перестройки частоты может обеспечить девиацию Аллана за 1 секунду, равную $8 \cdot 10^{-14}$, и температурную стабильность $\pm 1 \cdot 10^{-11}$. Возможность управления частотой сразу ухудшит эти показатели до $1 \cdot 10^{-13}$ и $\pm 2 \cdot 10^{-11}$ соответственно.

Управление частотой при необходимости может обеспечиваться либо аналоговой цепью, либо цифровой. Генераторы с цифровым управлением содержат внутри себя ЦАП, и управление частотой осуществляется с помощью подачи кода. При таком варианте управления ухудшение стабильности минимально. Однако в моменты изменения кода управления неизбежно ухудшение кратковременной нестабильности и фазовых шумов. В генераторах с аналоговым управлением для приведения частоты генератора к номиналу на вход управления необходимо подать управляющее напряжение. На земляном выводе генератора возникает падение напряжения, зависящее от протекающего тока нагревательных транзисторов термостата, и при таком подключении оно попадает в цепь управления и ухудшает температурную и кратковременную стабильность частоты. Для уменьшения этого влияния необходимо уменьшить сопротивление (длину) общей цепи протекающих токов питания генератора и цепи управления. Кардинальным способом является использование разных земель. Но такой путь снижает унификацию генераторов и накладывает достаточно серьезные ограничения на схемотехнику оборудования. При этом всё равно остаются дополнительные источники шумов в цепи управления, например, такие как термоэлектрический эффект [6].

Одной из перспективных возможностей увеличения стабильности является применение в аппаратуре генераторов с большим допуском по точности настройки (отклонением от номинальной частоты). В большинстве случаев



Рис. 8. Внешний вид рабочего места для измерения очень малых величин кратковременной стабильности

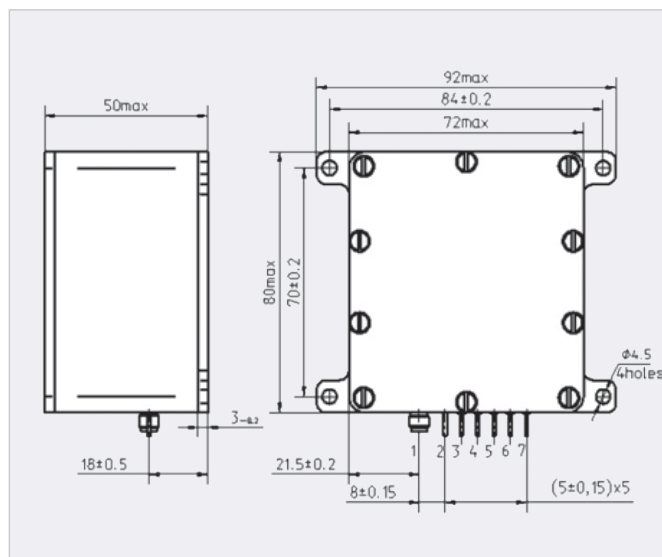


Рис. 9. Габаритный чертёж ГК336R-TC

в аппаратуре технически это вполне допустимо (при обработке сигнала это всё можно учесть) и даже будет иметь свои преимущества: меньше вероятность биения частот. Чтобы обеспечить номинальную частоту, кварцевые элементы резонаторов доводят до нужной толщины, стравливая или допыляя электроды. Это, конечно, влияет на качество металлизации кварцевого элемента. Отказ от этой технологической операции помогает немного повысить уровень стабильности. Отклонение частоты генератора от номинала при этом существенно расширяется и составляет примерно несколько сотен 10^{-6} .

Измерение кратковременной нестабильности генераторов в 10^{-14} знаках также требует специального подхода. Во-первых, мы максимально устраняем влияние дестабилизирующих факторов:

- генератор перед измерением находится во включённом состоянии на измерительном стенде несколько часов, чтобы максимально устранить влияние старения. При этом чем больше требуемое время наблюдения, – тем дольше генератор должен прогреваться;
- генератор при измерении помещается под специальный колпак, чтобы устранить влияние изменения температуры. Само помещение максимально изолировано;
- сам измерительный стенд расположен на специальном виброустойчивом рабочем столе.

Во-вторых, накладываются серьёзные требования к помещению, окружающей обстановке, соединительным кабелям

и, конечно, к приборам для измерения. На рис. 8 представлен внешний вид измерительного места.

В-третьих, в качестве опорного генератора выступает такой же кварцевый генератор с сопоставимой кратковременной стабильностью. При этом становится необходимо учитывать вклад опорного генератора в результаты измерений. Если кратковременная стабильность опорного генератора известна, то можно вычислить кратковременную нестабильность измеряемого генератора по следующей формуле:

$$\sigma_{yDUT} = \sqrt{\sigma_y^2 - \sigma_{yREF}^2}$$

где σ_y – результат измерения на опорный генератор,

σ_{yREF} – кратковременная нестабильность опорного генератора,

σ_{yDUT} – кратковременная нестабильность измеряемого генератора.

В случае если кратковременная нестабильность опорного генератора неизвестна, используется метод трёх генераторов [4, 5]. Его суть заключается в том, что попарно проводятся три измерения между каждым из генераторов. Тогда кратковременную нестабильность для каждого из трёх генераторов можно найти по следующим формулам:

$$\begin{cases} \sigma_{y1} = \sqrt{\frac{1}{2}(\sigma_{y12}^2 + \sigma_{y13}^2 - \sigma_{y23}^2)} \\ \sigma_{y2} = \sqrt{\frac{1}{2}(\sigma_{y12}^2 - \sigma_{y13}^2 + \sigma_{y23}^2)} \\ \sigma_{y3} = \sqrt{\frac{1}{2}(-\sigma_{y12}^2 + \sigma_{y13}^2 + \sigma_{y23}^2)} \end{cases}$$

где σ_{y12} – результат измерения между 1 и 2 генераторами,

σ_{y13} – результат измерения между 1 и 3 генераторами,

σ_{y23} – результат измерения между 2 и 3 генераторами.

В процессе производства мы отбираем опорные генераторы с очень малыми кратковременными нестабильностями. Величина их нестабильности определяется методом трёх генераторов, при этом берётся несколько триад. Величина нестабильности отобранных опорных генераторов измеряется каждые полгода.

На сегодняшний день нашим самым стабильным прецизионным генератором является ГК336R-TC, в нём учтены все описанные выше нюансы. Это генератор с двойным термостатированием, обладающий внушительными габаритами.

Он изготавливается на частоту 10 МГц с очень широким допуском по точности настройки ($\pm 300 \cdot 10^{-6}$), что позволяет не проводить дополнительные операции травления и допыления электродов. Частота 10 МГц наиболее отработана и исследована у нас на сегодняшний день, что также позволяет нам обеспечить низкую кратковременную нестабильность. Большие габаритные размеры 92×80×50 мм (см рис. 9, 10) позволяют обеспечить хороший температурный демпфер.

Стоит обратить внимание, что ГК336R выпускается без возможности управления частотой. Всё это позволяет получить сверхнизкие показатели кратковременной нестабильности в $8 \cdot 10^{-14}$ за 1 секунду.

Данный генератор является специальной версией ГК336-TC, у которого уже есть возможность перестройки частоты и более малый диапазон точности настройки. Но при этом его кра-



Рис. 10. Внешний вид ГК336

кратковременная нестабильность составляет уже $1,0 \cdot 10^{-13}$ за 1 секунду.

Кратковременная нестабильность (рис. 11) кварцевых генераторов может достигать нескольких единиц 10^{-14} . За последние несколько лет мы значительно продвинулись на пути к её уменьшению. Конечно, её получение накладывает некоторые ограничения на эксплуатацию генераторов: отсутствие управления частотой, широкий допуск на точность номинальной частоты, лабораторные условия эксплуатации и измерения и т.п. Работа над усовершенствованием кварцевого резонатора и полной реализацией его возможностей в генераторе продолжается.

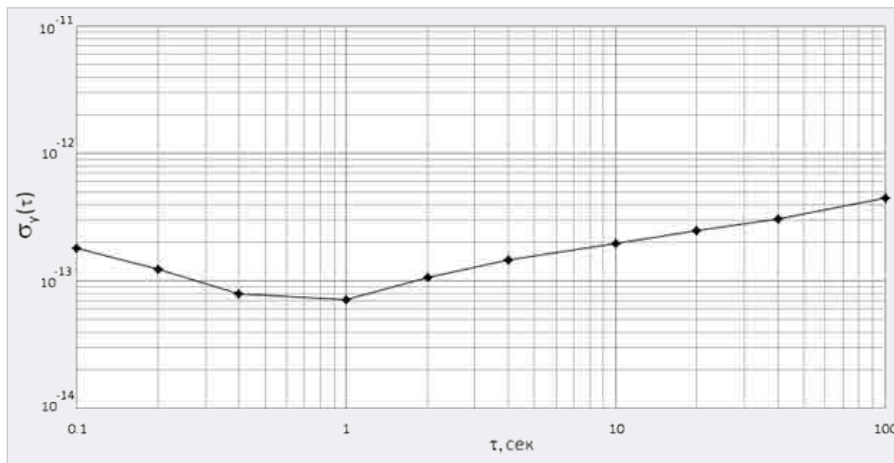


Рис. 11. Кратковременная нестабильность для ГК336R

Литература

1. Vig J.R. Quartz crystal resonators and oscillators: a tutorial, US Army Communications-Electronics Research, Development & Engineering Center Fort Monmouth, NJ, USA, March 2004.
2. Howe D.A., Allan D.W., Barnes J.A. Properties of signal sources and measurement methods // in Proceedings of the 35th Annual Symposium of Frequency Control, Philadelphia, Pennsylvania, USA, pp. A1–A47=NIST Technical Note 1337, pp. TN14–TN60. May 1981.
3. Samuel R. Stein Frequency and time – their measurement and characterization // in E. A. Gerber and A. Ballato, Precision Frequency Control, Vol. 2, pp. 191–416, Academic Press, 1985.
4. Ekstrom Christopher R., Koppang Paul A. Degrees of Freedom and Three-Cornered Hats // Proceedings of the 33th Annual Precise Time and Time Interval Systems and Applications Meeting, Long Beach, California, November 2001, pp. 425–430.
5. James E.G., Allan D.W. A method for estimating the frequency stability of an individual oscillator // Proceedings of the 28th Annual Symposium of Frequency Control, Atlantic City, NJ, USA. May 1974, pp. 243–246.
6. Котюков А.В., Никонов А.Г., Заславский А.В., Иванов Ю.А. Особенности применения кварцевых генераторов с высокой температурной стабильностью // Электронные компоненты. 2020. № 8. С. 54–57. ©

НОВОСТИ МИРА

Власти оценили состояние бизнеса в России

Работа более 86 процентов российских компаний оказалась затронута введенными санкциями. Такую оценку дал аппарат уполномоченного при президенте России по защите прав предпринимателей Бориса Титова в результатах «Мониторинга текущего состояния бизнеса». Документ цитирует «Интерфакс».

«86,8 процента опрошенных предпринимателей затронуты действием санкций, 77,4 процента, по их словам, к санкциям адаптировались или надеются это сделать, а вот 11,7 процента этого сделать не сумели и останавливают бизнес – полностью или частично», – сообщили специалисты. Аппарат Титова опросил руководителей и владельцев 6 тысяч компаний из 85 регионов страны.

Большинство опрошенных властями респондентов (67,1 процента) ощуща-

ют последствия экономического спада. 29,4 процента отчитались о снижении выручки, добавив, что пока контролируют ситуацию. Четверть (24,9 процента) предпринимателей охарактеризовали свое состояние как серьезный спад, а 7,1 процента назвали его кризисным. Ещё 5,7 процента закрыли свой бизнес или начали этот процесс. О стабильном росте своего бизнеса сообщили только 10,4 процента респондентов.

Больше всего жалуются на спад спроса (62,2 процента ответов), далее следуют дефицит оборотных средств и кассовые разрывы, разрыв цепочек поставок и сложности доставки по импорту. Подавляющая часть бизнесменов при этом называют действия правительства недостаточными в условиях санкционного давления, и около 35 процентов характеризуют их как «спокойные и эффективные».



При этом более половины предпринимателей заявили, что сейчас «необходимо отказать от косметических изменений и кардинально менять правила игры: нужна новая экономическая модель, где будет удобно, выгодно и безопасно работать». С этим выводом согласился и сам Титов. «Преодолеть проблемы можно только путём кардинальных реформ, изменением самой модели развития», – резюмировал он.

www.lenta.ru