

Литература

1. Жиганов И. Ю. Многоканальный телевизионный способ дистанционного измерения геометрических параметров // Вестник Самарского госуд. аэрокосмич. ун-та. 2009. № 2. С. 110—114.
2. Скворцов Б. В., Жиганов И. Ю. Метрологический анализ многоканальных телевизионных методов измерений геометрических параметров объектов // Измерительная техника. 2009. № 9. С. 5—8; Skvortsov B.V., Zhiganov I. Yu. Metrological analysis of multichannel TV methods of measuring object geometrical parameters // Measurement Techniques. 2009. V. 52. N. 9. P. 902—907.

3. Скворцов Б. В., Жиганов И. Ю., Малышева-Стройкова А. Н. Методы дистанционных измерений геометрических параметров объектов // LAP LAMBERT Academic Publishing GmbH & Co. KG. 2012. № 1. С. 313.

4. Пат. 73069 РФ. Телевизионное устройство измерения геометрических параметров объектов / Жиганов И. Ю., Скворцов Б. В. / Изобретения. Полезные модели. 2008. № 13.

5. Нестеров В. Н., Мухин В. М., Мещанов А. В. Метод многомерных тестовых объектов в оптических измерительных системах: Самара: Изд-во СНЦ РАН, 2013.

6. Карасик В. Е., Орлов В. М. Лазерные системы видения. М.: Изд-во МВТУ им. Баумана, 2001.

Дата принятия 09.04.2014 г.

ИЗМЕРЕНИЯ ВРЕМЕНИ И ЧАСТОТЫ

621.317.08

Анализ нестабильности частоты группового сигнала ансамбля активных водородных стандартов

С. Д. ПОДОГОВА*, К. Г. МИШАГИН**, И. Н. ЧЕРНЫШЕВ*, В. Г. ВОРОНЦОВ*

* ЗАО «Время-Ч», Н. Новгород, Россия, e-mail: podogova@vremya-ch.com

** Нижегородский государственный университет им. Н. И. Лобачевского, Н. Новгород, Россия, e-mail: mishagin@rf.unn.ru

Проанализированы характеристики группового сигнала, полученного с помощью вспомогательного генератора, подстраиваемого под среднюю частоту сигналов ансамбля активных водородных стандартов частоты и времени. Для анализа использованы данные реальных измерений, проведенных в ЗАО «Время-Ч» в 2013 г.

Ключевые слова: стандарт частоты и времени, групповой эталон времени и частоты, нестабильность частоты, вариация Аллана.

The analysis of frequency instability of group signal produced by auxiliary oscillator synchronized to the average frequency of active hydrogen maser ensemble is presented. Real measurements data obtained in JSC «Vremya-CH» in 2013 were used for the analysis.

Key words: ensemble of atomic clocks, atomic clock, frequency instability, Allan variance.

Современные эталоны времени и частоты представляют систему из нескольких стандартов. Основная задача эталона — хранение и воспроизведение единиц времени и частоты, а также формирование непрерывного высокочастотного сигнала с высокими показателями стабильности и надежности. Формирование выходных сигналов эталона, как правило, осуществляется с помощью небольшого ансамбля активных водородных стандартов [1]. В России в настоящее время ансамбли водородных стандартов являются основой для вторичных и рабочих эталонов времени и частоты. За рубежом в качестве рабочих эталонов часто применяют ан-

самбли цезиевых стандартов частоты (на цезиевой атомно-лучевой трубке) или цезиевые и водородные стандарты вместе [2].

С целью повышения точностных характеристик эталонов рассчитывают поправки на фазу и частоту формируемых высокочастотных сигналов и сигналов шкалы времени. С учетом данных поправок реализуются групповая шкала времени и групповая частота в аналитическом виде. В публикациях зачастую представлены или результаты моделирования алгоритмов групповой шкалы и частоты, или групповые характеристики эталонов, полученные в результате постобработ-

ки данных измерений [3—4]. Отдельная задача — формирование в режиме реального времени сигнала, имеющего характеристики точности и нестабильности частоты группового эталона.

Для формирования выходного сигнала применяют различные подходы. Широко распространен подход, при котором стандарт с наилучшими характеристиками нестабильности частоты назначают ведущим, а его сигнал используют в качестве выходного [5, 6]. Для повышения характеристик точности периодически проводят коррекцию частоты и дрейфа частоты выходного сигнала ансамбля по результатам внешних или внутренних сличений.

Альтернативный подход предполагает применение формирователя выходного сигнала на основе управляемого кварцевого генератора, сигнал которого подстраивается по частоте под среднее взвешенное значение частот сигналов сразу нескольких стандартов ансамбля. Такой подход реализован в формирователе эталонных частот резервируемом Ч7-317 производства ЗАО «Время-Ч». Усреднение случайных флуктуаций частоты нескольких сигналов позволяет улучшить характеристики нестабильности частоты группового сигнала при нескольких опорных генераторах.

В настоящее время указанный формирователь входит в состав шести функционирующих групповых эталонов времени и частоты. Однако характеристики нестабильности частоты группового сигнала, а также способы их оценки до сих пор не были представлены для обсуждения в научных журналах. В данной статье приведены характеристики нестабильности частоты группового сигнала, формируемого прибором Ч7-317, которые были получены в результате экспериментов в 2013 г.

На рис. 1 представлена схема частотной автоподстройки сигнала групповой частоты в приборе Ч7-317. Выходной сигнал Ч7-317 формируется с помощью управляемого напряжением кварцевого генератора ГУН. В процессоре П реализован алгоритм управления частотой выходного сигнала, использующий данные о текущих разностях частот между входными и выходным сигналами, измеренные многоканальным частотным компаратором КЧ. Таким образом, в результате работы цифровой петли частотной автоподстройки частота выходного сигнала генератора является средним взвешенным значением частот опорных сигналов и рассчитывается по формуле [7]:

$$f_{\Sigma} = (1 + \delta) \sum_n w_n f_n + f_{\xi},$$

где δ — программируемый относительный сдвиг частоты; w_n — весовой коэффициент сигнала n ; f_n — частоты сигналов стандартов, входящих в состав ансамбля; f_{ξ} — шум, вносимый системой автоподстройки.

В качестве характеристики нестабильности частоты f_{Σ} используем дисперсию (вариацию) Аллана [8, 9], а также девиацию Аллана, вычисляемую как корень квадратный из дисперсии. Предположим некоррелированность опорных сигналов, а также то, что вариации частоты опорных сигналов представляют стационарный гауссовский случайный процесс, тогда справедливо следующее выражение для дисперсии Аллана частоты выходного сигнала:

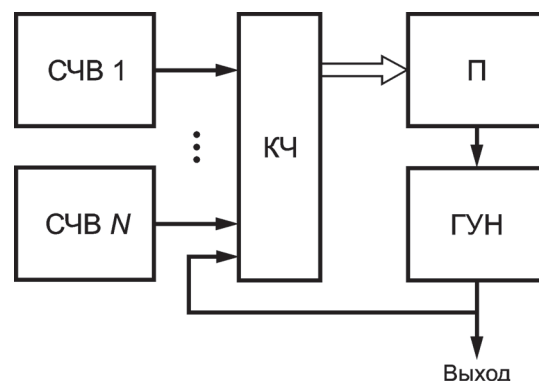


Рис. 1. Схема частотной автоподстройки вспомогательного генератора относительно нескольких опорных сигналов:

СЧВ — стандарт частоты и времени; ГУН — генератор, управляемый напряжением; КЧ — компаратор частотный; П — процессор

$$\sigma_{\Sigma}^2(\tau) = \sum_n w_n^2 \sigma_n^2(\tau) + \sigma_{\xi}^2(\tau), \quad (1)$$

где $\sigma_n^2(\tau)$ — дисперсия Аллана n -го сигнала; $\sigma_{\xi}^2(\tau)$ — дисперсия Аллана шума, вносимого системой автоподстройки.

Величина $\sigma_{\xi}^2(\tau)$ на временах τ , много больших интервала времени управления, определяется в основном погрешностью измерения разности частот в компараторе для соответствующего значения τ .

При известных характеристиках нестабильности частоты сигналов, входящих в группу, вычислим весовые коэффициенты, минимизирующие нестабильность частоты выходного сигнала в интервале времени измерения τ :

$$w_n(\tau) = \sigma_{\min}^2(\tau) / \sigma_n^2(\tau),$$

$$\sigma_{\min}^2(\tau) = \left[\sum_n \sigma_n^2(\tau) \right]^{-1}. \quad (2)$$

Величину, рассчитываемую по формуле (2) на основе экспериментальных данных, можно рассматривать как оценку минимально возможной нестабильности частоты группового сигнала для данного интервала времени. Далее рассмотрим задачу измерения нестабильности частоты группового сигнала, формируемого с помощью Ч7-317.

В системе, основанной на группе стандартов частоты одного типа, в отсутствие более стабильного источника невозможно с помощью прямых измерений корректно оценить характеристики нестабильности частоты отдельных стандартов. Для этого используют метод трех генераторов [10]. Отметим, что в рассматриваемых экспериментах сигналы всех стандартов частоты в ансамбле были использованы для формирования сигнала групповой частоты, т. е. флуктуации частоты группового сигнала были коррелированы с флуктуациями частоты входных сигналов. Ниже описана методика для вычисления дисперсии Аллана группового сигнала, основан-

ная на методе трех генераторов и учитывающая связь выходного (группового) и входных сигналов.

Из прямых измерений в системе внутренних сличений эталона известны отсчеты разности частот между сигналом n -го стандарта частоты и сигналом управляемого кварцевого генератора, формирующего выходной сигнал. Так как используемый компаратор гарантирует вариацию интервала между отсчетами в различных каналах не более 10 мс, предположим, что ежесекундные измерения входных сигналов относительно группового сигнала синхронны. Следовательно, по этим данным можно восстановить взаимные разности частот и их вариации между входными сигналами, а затем по методу трех генераторов определить собственные характеристики нестабильности частоты каждого входного сигнала. Используем следующую кросскорреляционную формулу для вычисления характеристики собственной нестабильности частоты (девиации Аллана):

$$\sigma_{1,23}(\tau) = \sqrt{\frac{1}{2(N-1)} \left| \sum_{i=1}^{N-1} \sigma_{12,i} \sigma_{13,i} \right|}, \quad (3)$$

где $\sigma_{1,23}$ — оценка собственной нестабильности частоты сигнала 1 на основе взаимных сличений с сигналами 2 и 3; N — длина выборки отсчетов разности частот; $\sigma_{12,i}$, $\sigma_{13,i}$ — отсчеты вариаций относительных разностей частот для выбранного интервала времени измерения τ .

Если количество входных сигналов больше трех, то можно многократно применять метод трех генераторов с последующим взвешенным усреднением оценок нестабильности частоты отдельного сигнала [11]. В результате усреднения снижается случайная погрешность измерения и, соответственно, повышается достоверность окончательной оценки. Для ансамбля, состоящего из четырех стандартов, оцен-

ка собственной нестабильности частоты (на примере сигнала 1) осуществляется по формуле

$$\sigma_1^2 = \sum_{k=2}^3 \sum_{l>k}^4 \beta_{kl} \sigma_{1,kl}^2; \beta_{kl} = \frac{1}{\sigma_{kl}^2} / \sum_{k=2}^3 \sum_{l>k}^4 \frac{1}{\sigma_{kl}^2}, \quad (4)$$

где σ_{kl} — оценка девиации Аллана разности частот сигналов k и l , полученная на основе результатов измерений.

Как было показано в [11], использование весовых коэффициентов, представленных в (4), позволяет получить оценку собственной нестабильности частоты, близкую к оптимальной в смысле минимальной дисперсии оценки.

Далее рассмотрим дисперсию Аллана для разности частот группового сигнала и одного из входных сигналов k :

$$\sigma_{\Sigma k}^2 = \langle (\sigma_{\Sigma j} - \sigma_{ki})^2 \rangle = \sigma_{\Sigma}^2 + \sigma_k^2 - 2 \left\langle \sigma_{ki} \left(\sum_n w_n \sigma_{ni} \right) \right\rangle, \quad (5)$$

где угловые скобки $\langle \rangle$ означают усреднение по статистическому ансамблю; $\sigma_{\Sigma j}$ — отсчет вариации частоты группового сигнала; σ_{ki} , σ_{ni} — отсчеты вариации частоты сигналов k и n ; σ_k — оценка собственной нестабильности частоты входного сигнала k .

Предположив взаимную некоррелированность входных сигналов, из (5) получим выражение для искомой характеристики — дисперсии Аллана частоты группового сигнала:

$$\sigma_{\Sigma}^2 = \sigma_{\Sigma k}^2 - (1 - 2w_k) \sigma_k^2. \quad (6)$$

Таким образом, для вычисления оценки дисперсии Аллана группового сигнала необходимо вычислить оценки $\sigma_{\Sigma k}$, σ_k и определить вклад указанного входного сигнала w_k в частоту группового сигнала.

Результаты измерений. Были проведены два эксперимента по формированию сигнала средней частоты с помощью Ч7-317 для групп из трех активных водородных стандартов частоты и времени Ч1-1003А и четырех активных водородных стандартов частоты и времени с автономной настройкой резонатора Ч1-1003М. В обоих экспериментах опорные сигналы имели сопоставимые по нестабильности частоты характеристики, поэтому были выбраны одинаковые весовые коэффициенты.

Результаты для первой группы представлены на рис. 2. В ходе эксперимента с применением компараторов, встроенных в Ч7-317, измеряли разность частот между выходным групповым сигналом и входными сигналами от трех стандартов Ч1-1003А. В силу особенностей программного обеспечения формирователя Ч7-317 полученные отсчеты разности частот имели интервал следования 100 с и были профилированы в полосе 0,01 Гц. Длина выборки — 9212 отсчетов. С помощью полученных отсчетов восстановили взаимные разности частот и вариации частот опорных сигналов на перекрывающихся временных интервалах, по которым, используя (3), оценили характеристики нестабильности частоты

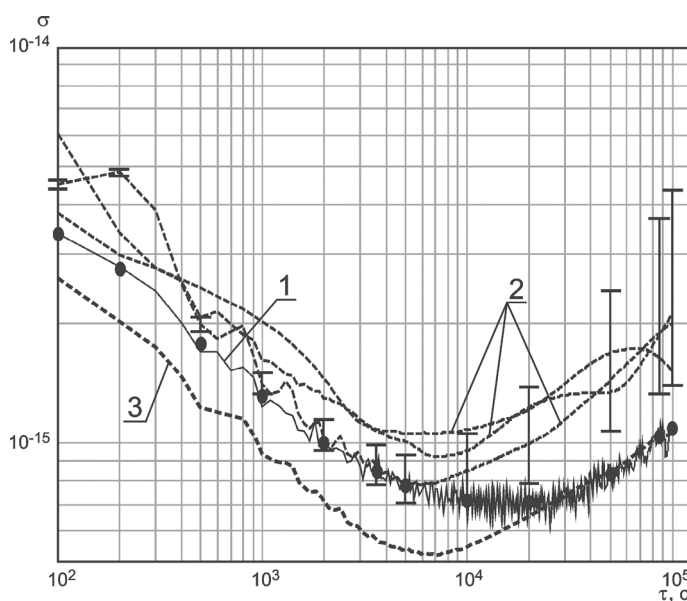


Рис. 2. Девиации Аллана группового сигнала (вычисления по формулам с перекрытиями (•) и без перекрытий (1), для трех входных сигналов Ч1-1003А (2)); оценка минимально возможной девиации Аллана группового сигнала (3)

отдельных сигналов (кривые 2). С целью определения достоверности оценки для девиации Аллана одного из опорных сигналов представлены доверительные интервалы, соответствующие вероятности попадания 0,9, посчитанные по методике, описанной в [12]. По (6) рассчитали искомую оценку девиации Аллана группового сигнала. Для демонстрации разброса данной оценки использовали формулу вычисления девиации Аллана по непрерывающимся во времени отсчетам вариаций частоты с шагом по интервалу времени измерения 100 с (сплошная линия 1). Так же на рис. 2 представлена оценка, посчитанная по перекрывающимся во времени отсчетам вариаций частоты на квазилогарифмической шкале интервалов времени измерения, и оценка предельно достижимой нестабильности частоты группового сигнала для данного ансамбля, посчитанная с помощью формулы (2) на квазилогарифмической шкале и по перекрывающимся отсчетам (кривая 3).

Проанализировав результаты, сделаем следующие замечания. Во-первых, сигнал групповой частоты на всех интервалах времени измерения имеет нестабильность частоты, которая не выше, чем нестабильность частоты любого из опорных сигналов (для соответствующего интервала τ). Во-вторых, нестабильность частоты группового сигнала на интервалах времени измерения до 5000 с почти такая же, как у опорного сигнала с наименьшей нестабильностью частоты в данном диапазоне интервалов. В-третьих, на интервалах времени измерения более 20000 с значения нестабильности частоты группового сигнала близки к оценке минимально возможных значений для данного ансамбля.

Перейдем к результатам для второй группы стандартов, которые представлены на рис. 3. В этом эксперименте взаимные сличения осуществляли с помощью внешнего компаратора фазового многоканального ЯКУР.411146.033, обеспечивающего синхронные измерения в разных каналах с погрешностью не более 10 мс. Интервал между отсчетами — 1 с, количество отсчетов — 400000, полоса пропускания компаратора — 3 Гц. Оценка нестабильности частоты опорных сигналов (кривые 2) осуществлена с использованием формулы (4) на основе перекрывающихся во времени отсчетов разности частот. Для одного из опорных сигналов представлены доверительные интервалы с вероятностью попадания 0,9 [12]. Характеристика нестабильности частоты группового сигнала рассчитана по перекрывающимся отсчетам на квазилогарифмической шкале интервалов времени измерения и по непрерывающимся отсчетам с шагом по интервалу времени измерения 100 с (кривая 1).

Как и в предыдущем эксперименте, нестабильность частоты группового сигнала не выше, чем у любого из опорных сигналов для всех интервалов времени измерения. Также можно отметить, что на малых интервалах (менее 1000 с) измеренная нестабильность частоты группового сигнала (кривая 1) заметно выше оценки минимально возможных значений (кривая 3). На больших интервалах (более 1000 с)

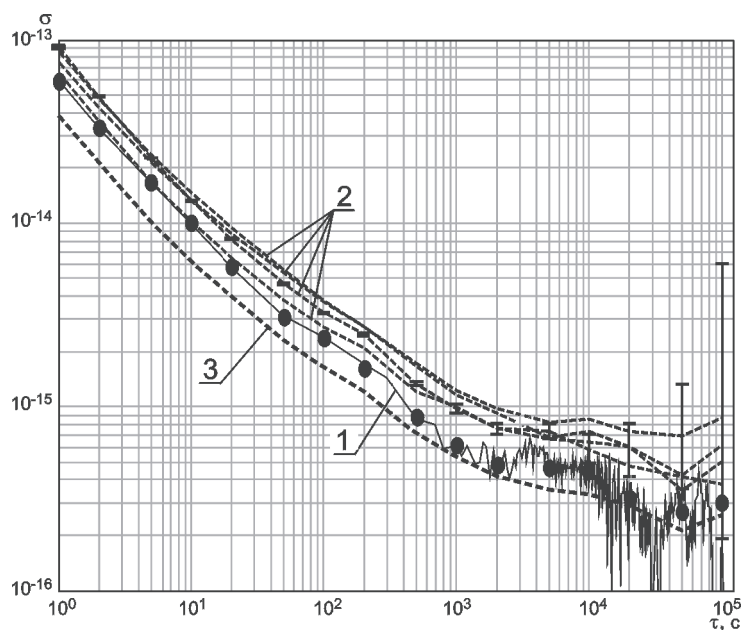


Рис. 3. Девиации Аллана группового сигнала (вычисления по формулам с перекрытиями (•) и без перекрытий (1), для четырех входных сигналов Ч1-1003М (2)); оценка минимально возможной девиации Аллана группового сигнала (3)

измеренные значения приближаются к оценкам предельно возможных значений нестабильности частоты группового сигнала для данного ансамбля.

Отличие между кривыми 1 и 3 на рис. 2, 3 достаточно мало и сопоставимо или меньше погрешности, которую имеют используемые компараторы [10]. Действительно, в первом эксперименте (см. рис. 2) для $\tau = 100$ с отличие составляет приблизительно 10^{-15} , во втором эксперименте (см. рис. 3) для $\tau = 1$ с — приблизительно $2 \cdot 10^{-14}$. При увеличении τ погрешность, обусловленная измерительной системой, уменьшается быстрее (как $\sim \tau^{-1}$), чем оцениваемые характеристики нестабильности частоты, что может объяснить сближение измеряемой характеристики нестабильности частоты группового сигнала и оценки минимально возможных значений. Кроме погрешности измерительной системы имеет место шум (см. (1)), вносимый формирователем Ч7-317, который также может быть причиной отличия кривых 1 и 3 (см. рис. 2, 3).

Выводы. Представленные результаты подтверждают уменьшение долговременной нестабильности частоты в результате усреднения частот сигналов нескольких стандартов в группе с помощью Ч7-317. В ансамбле из четырех стандартов Ч1-1003М суточная нестабильность частоты группового сигнала составляет $3 \cdot 10^{-16}$ (см. рис. 3). Кратковременная нестабильность частоты формируемого сигнала не выше, чем у любого из стандартов в группе. Вероятно, что отсутствие заметного увеличения стабильности частоты для малых значений интервалов времени измерения обусловлено шумом, вносимым системой автоподстройки. Однако, чтобы сделать однозначный вывод, требуется проведение измерений с меньшей погрешностью, для чего можно использо-

вать дублирование измерений в нескольких каналах компаратора с последующей кросскорреляционной обработкой. Представленные экспериментальные оценки нестабильности частоты группового сигнала вычислены по формуле (6), полученной в предположении о некоррелированности флуктуаций частоты сигналов стандартов. Коррелированные изменения частот сигналов стандартов ансамбля незаметны при взаимных внутренних сличениях. Таким образом, оценка по (6), а также оценки по методу трех (или более) генераторов не чувствительны к одновременному одинаковому изменению частот всех стандартов, участвующих в измерениях. Такие оценки могут быть смещенными, но возможное смещение одинаково как для оценки нестабильности частоты группового сигнала, так и для оценок нестабильности частоты отдельных сигналов стандартов. Поэтому продемонстрированный эффект уменьшения нестабильности частоты группового сигнала остается корректным. Одним из главных факторов, определяющих коррелированность флуктуаций частоты стандартов в групповом эталоне, является чувствительность стандартов к изменению окружающей температуры. В представленных экспериментах первую группу стандартов исследовали в климатических камерах, температура в которых поддерживалась с точностью 0,1 °C; для второй группы стандартов температуру в помещении поддерживали с точностью 1 °C.

Отметим, что выражение (2), используемое для оценки минимально возможной дисперсии Аллана для сигнала средней взвешенной частоты группы стандартов на разных интервалах времени измерения, может быть рекомендовано для оценки интегральной характеристики качества групповых эталонов времени и частоты.

Работа выполнена при поддержке Министерства образования и науки РФ (соглашение от 27 августа 2013 г. № 02B.49.21.0003).

Л и т е р а т у р а

1. **Bauch A. e. a.** Generation of UTC(PTB) as a fountain-clock based time scale // *Metrologia*. 2012. V. 49. N. 3. P. 180—188.
2. **Breakiron L. A.** Timescale Algorithm Combining Cesium Clocks and Hydrogen Masers // *Proc. Precise Time and Time Interval (PTTI) Meeting*. 1991. V. 23. P. 297—302.

3. **Levine J.** The statistical modeling of atomic clocks and the design of time scales // *Rev. Sci. Instruments*. 2012. V. 83. N. 2. P. 021101-1-021101-28.

4. **Блинов И. Ю., Гончаров А. С.** Об оценке суммарной погрешности территориально распределенного группового эталона единиц времени и частоты // *Измерительная техника*. 2008. № 9. С. 24—26; **Blinov I. Yu., Goncharov A. S.** Estimating the total error for a distributed group standard for time and frequency // *Measurement Techniques*. 2008. V. 51. N. 6. P. 618—622.

5. **Bauch A. e. a.** Recent improvements to the stability of UTC(PTB) // *Scientific and Fundamental Aspects of the Galileo Programme: Proc. 3rd Intern. Colloquium*. Copenhagen, Denmark. 2011.

6. **Koshelyaevsky N. B., Pentin S. A.** Master clock for real time realization UTC(SU) paper clock // *24th Europ. Frequency and Time Forum*. Noordwijk, The Netherlands. 2010. P. 85—91.

7. **Мишагин К. Г. и др.** Алгоритм формирования резервированного сигнала группового эталона частоты // *Измерительная техника*. 2013. № 8. С. 34—39; **Mishagin K. G. e. a.** Algorithm for generating the output signal of a group frequency reference // *Measurement Techniques*. 2013. V. 56. N. 8. P. 887—893.

8. **Rutman J.** Characterization of phase and frequency instabilities in precision frequency sources: Fifteen years of progress // *Proc. IEEE*. 1978. V. 66. N. 9. P. 1048—1075.

9. **ГОСТ 8.567—99.** Измерения времени и частоты. Термины и определения.

10. **Чернышев И. Н., Беляев А. А., Мишагин К. Г.** Погрешность измерения нестабильности частоты методом трех генераторов // *Измерительная техника*. 2012. № 7. С. 37—41; **Chernyshev I. N., Belyaev A. A., Mishagin K. G.** Time and frequency measurements: error in measurement of frequency instability by method of three oscillators // *Measurement Techniques*. 2012. V. 55. N. 7. P. 792—799.

11. **Чернышев И. Н., Мишагин К. Г.** Оптимальное измерение нестабильности частоты в многоканальном компараторе // *Измерительная техника*. 2009. Т. 9. С. 13—17; **Chernyshev I. N., Mishagin K. G.** Optimal measurement of frequency instability in a multi-channel comparator // *Measurement Techniques*. 2009. V. 52. N. 9. P. 931—939.

12. **Ekstrom C. R., Koppang P. A.** Error bars for three-cornered hats // *IEEE Intern.* 2002. P. 721—724.

Дата принятия 22.04.2014 г.