

DOI <https://doi.org/10.30898/1684-1719.2020.12.3>

УДК 621.396. 6

## МЕТОД ОЦЕНИВАНИЯ ЧАСТОТНО-ВРЕМЕННЫХ ПАРАМЕТРОВ СИГНАЛОВ В СИСТЕМЕ ОДНОВРЕМЕННО И НЕЗАВИСИМО ФУНКЦИОНИРУЮЩИХ ГЕНЕРАТОРОВ

Д. Д. Габриэлян<sup>1</sup>, С. В. Лазаренко<sup>2</sup>, Б. Х. Кульбикаян<sup>3</sup>, О. А. Сафарьян<sup>2</sup>, И. А. Сахаров<sup>4</sup>

<sup>1</sup> Ростовский-на-Дону научно-исследовательский институт радиосвязи,  
344038, Ростов-на-Дону, ул. Нансена, 130

<sup>2</sup> Донской государственный технический университет,  
344002, Ростов-на-Дону, пл. Гагарина, 1

<sup>3</sup> Ростовский государственный университет путей сообщения,  
344038, Ростов-на-Дону, пл. Ростовского Стрелкового Полка Народного ополчения, 2

<sup>4</sup> Ростовский филиал Российской таможенной академии,  
344002, Ростов-на-Дону, пр. Буденовский, 20

Статья поступила в редакцию 4 декабря 2020 г.

**Аннотация.** Рассмотрены вопросы оценивания текущей частоты каждого из совокупности одновременно и независимо функционирующих генераторов в составе радиоэлектронной системы. Рассмотрен наиболее общий случай, при котором отклонение истинных значений номинальных параметров генераторов от предполагаемых значений указанных параметров имеет неизвестный законом распределения, а случайные отклонения частоты от истинного номинального значения подчиняются нормальному закону распределения с соответствующей дисперсией. Предлагаемый метод получения оценок параметров одновременно и независимо функционирующих генераторов (истинных значений номинальной частоты и долговременной нестабильности, случайного отклонения частоты, обусловленного кратковременной нестабильностью генератора) основан на измерении фаз сигналов каждого из генераторов в течении нескольких измерительных интервалов. Первым этапом получения оценок является линеаризация зависимости между отклонениями параметров генераторов от номинальных значений и случайного отклонения частоты генератора с отклонением измеряемого значения фазы от предполагаемого номинального значения. Это позволяет сформировать систему

линейных алгебраических уравнений относительно неизвестных значений отклонений номинального значения частоты и относительной нестабильности, случайного отклонения частоты. Минимально необходимое число измерительных интервалов оценено в материалах статьи. Предлагаемый в статье метод является дальнейшим обобщением ранее предложенного метода статистической стабилизации частоты системы одновременно и независимо функционирующих генераторов, в котором на основе нахождения экстремума многомерной функции правдоподобия, сформированной в предположении нормального закона распределения по каждому из аргументов, определялась текущая длительность временного интервала измерений, номинальная частота и относительная нестабильность каждого из генераторов. Предложенное обобщение заключается в следующем:

- формирование переопределенной системы уравнений, неизвестными в которой являются отклонение длительности временного интервала измерений от номинального значения, отклонения значений номинальных частот каждого из генераторов от соответствующих предполагаемых значений, отклонения значений относительных нестабильностей каждого из генераторов от соответствующих предполагаемых значений;

- формирование системы нормальных уравнений, по результатам решения которой проводится совместное оценивание длительности каждого из временных интервалов измерений, отклонений частот и относительных нестабильностей каждого из генераторов от соответствующих предполагаемых значений;

- проведение измерений фаз сигналов каждого из генераторов на каждом временном интервале измерения.

Предлагаемое обобщение позволяет отказаться от следующих допущений:

- о точно известных значениях номинальной частоты и относительной нестабильности каждого из генераторов;

- об известном законе распределения отклонении значений указанных параметров от предполагаемых значений.

В то же время использование предлагаемого метода приводит к необходимости проведения измерений фаз сигналов каждого из генераторов не на одном, а нескольких измерительных интервалах.

На основе численного моделирования проанализировано повышение точности оценивания длительности временных интервалов измерений и соответственно частоты генераторов. Показано, что уточнение значений относительной нестабильности частоты каждого из генераторов не приводит к практически значимому повышению точности оценок текущих значений частоты генераторов. Предложен переход к упрощенной функции правдоподобия, при которой проводится оценка только длительности временного интервала измерений и номинальной частоты каждого из генераторов.

**Ключевые слова:** генераторы высокочастотных колебаний, высокочастотные радиосигналы, статистический метод стабилизации частоты, стабильность частоты, метод наименьших квадратов.

**Abstract.** The issues of assessing the current frequency of each of the total of simultaneously and independently functioning generators within the electronic system are considered. The most common case is considered, in which the deviation of the true values of the nominal parameters of generators from the estimated values of these parameters has an unknown distribution law, and random deviations of frequency from the true nominal value are subject to the normal distribution law with the corresponding variance. The proposed method of obtaining parameters estimates of both independently functioning generators (true nominal frequency values and long-term instability, accidental deviation of frequency caused by short-term instability of the generator) is based on the measurement of the signals phases of each of the generators during several measuring intervals. The first step in obtaining estimates is to line the relationship between deviations of generator parameters from nominal values and the random deviation of the generator frequency by deviation of

the measured phase value from the intended nominal value. This allows the formation of a system of linear algebraic equations relative to unknown values of frequency par deviations and relative instability, random deviation of frequency. Minimally necessary number of measuring intervals estimated in the materials of the article. The method proposed in the article is a further generalization of the previously proposed method of statistical frequency stabilization of the system of simultaneously and independently functioning generators, in which, based on finding the extremum of the multidimensional likelihood function, formed under the assumption of a normal distribution law for each of the arguments, the current duration of the measurement time interval, the nominal frequency and the relative instability of each of the generators. The suggested generalization is as follows: formation of an overdetermined system of equations, the unknowns in which are the deviation of the duration of the measurement time interval from the nominal value, the deviation of the values of the nominal frequencies of each of the generators from the corresponding assumed values, the deviation of the values of the relative instabilities of each of the generators from the corresponding assumed values; formation of a system of normal equations, based on the results of the solution of which, a joint assessment of the duration of each of the measurement time intervals, frequency deviations and relative instabilities of each of the generators from the corresponding assumed values is carried out; measurements of the signal phases of each of the generators at each time interval of the measurement. The proposed generalization allows us to abandon the following assumptions: exactly known values of the nominal frequency and relative instability of each of the generators; about the known distribution law of the deviation of the values of the specified parameters from the assumed values. At the same time, the use of the proposed method leads to the need to measure the phases of the signals of each of the generators not in one, but in several measurement intervals. On the basis of numerical modeling, an increase in the accuracy of estimating the duration of time intervals of measurements and, accordingly, the frequency of generators is analyzed. It is shown that the refinement of the values of the relative frequency instability of each of the generators does not

lead to a practically significant increase in the accuracy of estimates of the current values of the generator frequency. A transition to a simplified likelihood function is proposed, in which only the duration of the measurement time interval and the nominal frequency of each of the generators are estimated.

**Key words:** high frequency oscillators, high frequency radio signals, statistical frequency stabilization, frequency stability, least squares.

## **Введение**

Современные радиоэлектронные системы (РЭС) строятся, как правило, на основе модульного принципа построения, что определяет использование функционально завершенных блоков и устройств, связанных между собой. Применение указанного подхода приводит к наличию в составе РЭС большого числа генераторов высокочастотных сигналов. Характерными примерами таких систем являются информационно-телекоммуникационные (информационно-измерительные) системы, в том числе и распределенные РЭС. При этом с учетом функциональной завершенности каждого из устройств, входящих в состав системы, генераторы высокочастотных сигналов указанных устройств можно считать одновременно и независимо функционирующими.

Несмотря на то, что генераторы сигналов в составе различных устройств имеют различные параметры, наличие совокупности большого числа одновременно и независимо функционирующих генераторов в составе РЭС позволяет путем измерения и последующей обработки фаз формируемых сигналов определять текущие частотно-временные параметры данных сигналов [1-6]. В свою очередь, полученные частотно-временные параметры сигналов связаны с параметрами формирующих их генераторов, что позволяет или стабилизировать частоту генераторов или учитывать ее текущее значение при последующей обработке сигналов [1-6]. Это, в свою очередь, дает возможность без значительного усложнения аппаратуры самой РЭС повысить стабильность и соответствие частотно-временных параметров формируемых сигналов номинальным значениям. В конечном итоге это определяет повышение эффективности применения РЭС (снижение вероятности битовой ошибки в

каналах связи, повышение точности определения радиолокационных и радионавигационных параметров и т.д.), в значительной степени связанной со стабильностью частоты и ее соответствием номинальному значению.

В работе [6] проанализировано влияние отклонения параметров генераторов на точность оценивания текущей частоты каждого генератора и длительности задаваемых ими временных интервалов. В статье [5] рассмотрен обобщенный метод оценивания параметров одновременно и независимо функционирующих генераторов на основе использования многомерной функции правдоподобия. Аргументами указанной функции являются отклонения длительностей временных интервалов измерений от номинальных значений, а также для каждого из генераторов - отклонения между истинными и предполагаемыми значениями номинальной частоты и отклонения между истинными и предполагаемыми значениями относительной нестабильности. Предложенный метод позволяет уточнять не только значения текущей частоты каждого генератора, но и значения их номинальной частоты и относительной нестабильности. Однако данный метод имеет ограничения, связанные с предположением о нормальном законе распределения отклонений частоты и относительной нестабильности каждого из генераторов от номинальных значений. Указанное допущение, как правило, может быть справедливым в случае совокупности генераторов одного типа, изготавливаемых в рамках одного технологического процесса. В случае совокупности генераторов различных типов указанное допущение не всегда выполняется на практике.

Таким образом, известные результаты должны быть обобщены на случай:

- действительные значения параметров генераторов из-за воздействия различных факторов отличаются от предполагаемых;
- значения параметров генераторов не связаны с конкретным законом распределения.

Это делает актуальным решение задачи оценивания не только текущего отклонения частоты от номинального значения, но и уточнения истинных

значений номинальной частоты и дисперсии сигналов генераторов при произвольном законе распределения их параметров.

Целью работы является развитие метода одновременного оценивания частотно-временных параметров сигналов (долговременной номинальной частоты, относительной нестабильности и текущего отклонения частоты от номинального значения), формируемых в системе одновременно и независимо функционирующих генераторов, при произвольном законе распределения отклонений долговременной номинальной частоты и относительной нестабильности частоты генераторов от предполагаемых значений.

## 1. Постановка задачи

Рассмотрим, как и в [3], систему  $N+1$  генераторов, каждый из которых формирует гармонические сигналы

$$s_n(t) = S_n^{(0)} \cos(\omega_n \cdot t + \varphi_n), n = 1, \dots, N, \quad (1)$$

где:  $S_n^{(0)}$  - амплитуда сигнала,

$\omega_n$  - частота сигнала,

$\varphi_n$  - начальная фаза сигнала.

Частота каждого генератора определяется предполагаемым номинальным значением  $\omega_n^{(0)}$  и предполагаемым значением дисперсии  $D_n^{(0)}$ , которые отличаются от истинных из-за влияния факторов технологического процесса и условий эксплуатации.

Сигнал  $(N+1)$ -го генератора используется для формирования  $M$  измерительных интервалов с номинальной длительностью  $t_0$ , в течение каждого из которых производится измерение фаз  $\Phi_{m,n}$  сигналов, формируемых  $n$ -м генератором ( $n = 1, \dots, N$ ).

Требуется по результатам измерений определить частотно-временные параметры сигнала (частоту на каждом из измерительных интервалов и долговременную относительную нестабильность формирующего данный сигнал генератора).

## 2. Разработка метода

Представим измеряемое на  $m$ -м ( $m=1, \dots, M$ ) измерительном интервале значение фазы сигнала  $n$ -го генератора ( $n=1, \dots, N$ ) следующим соотношением

$$\Phi_{m,n} = \left( \omega_n^{(0)} + \delta\omega_n + \Delta\omega_{m,n} \right) (t_0 + \Delta t_m), n=1, \dots, N, \quad (2)$$

где:  $\omega_n^{(0)}$  - предполагаемое значение номинальной частоты  $n$ -го генератора,

$\delta\omega_n$  - смещение номинальной частоты  $n$ -го генератора (систематическая составляющая), обусловленное воздействием различных факторов при производстве и эксплуатации,

$\Delta\omega_{m,n}$  - случайное отклонение частоты  $n$ -го генератора на  $m$ -м измерительном интервале,

$\Delta t_m$  - отклонение длительности  $m$ -го измерительного интервала от номинального значения, обусловленное нестабильностью  $N+1$ -го генератора.

Составляющие отклонения частоты каждого генератора удовлетворяют условиям:

-  $\delta\omega_n$  имеет постоянное значение на всех  $M$  интервалах измерения;

-  $\Delta\omega_{m,n}$  на каждом  $m$ -м измерительном интервале для каждого генератора  $n$ -го генератора подчиняется нормальному закону распределения с дисперсией  $D_n = D_n^{(0)} + \delta D_n$ , ( $n=1, \dots, N$ );

-  $\Delta t_m$  подчиняется нормальному закону распределения с дисперсией  $D_{N+1}$ , определяемой нестабильностью  $N+1$ -го генератора.

Из условия максимума функции правдоподобия, сформированной относительно  $\Delta t_m$ , аргументами которой являются действительные значения номинальной частоты и относительной нестабильности всех  $N$  генераторов, оценка  $\Delta t_m$  из соотношения (2) может быть по аналогии с [2, 3] получена в виде

$$\Delta t_m = \frac{\sum_{n=1}^N \left[ \left( \Phi_{m,n} - \Phi_n^{(0)} - \delta\omega_n \cdot t_0 \right) \cdot \omega_n^{(0)} \cdot (D_n)^{-1} \right]}{\sum_{n=1}^N \left[ \omega_n^{(0)} \cdot (D_n)^{-1} \right]}, (m=1, \dots, M), \quad (3)$$

где  $\Phi_n^{(0)} = \omega_n \cdot t_0$ .

С учетом того, что в современных высокочастотных генераторах  $\delta\omega_n \ll \omega_n^{(0)}$ ,  $\delta D_n \ll D_n^{(0)}$  соотношение (3) может быть линеаризовано и приведено к виду

$$\Delta t_m = \frac{\sum_{n=1}^N \left[ \left( \Phi_{m,n} - \Phi_n^{(0)} - \delta\omega_n \cdot t_0 \right) \cdot \omega_n^{(0)} \cdot \left( D_n^{(0)} \right)^{-1} \cdot \left( 1 - \frac{\delta D_n}{D_n^{(0)}} \right) \right]}{\sum_{n=1}^N \left[ \omega_n^{(0)} \cdot \left( D_n^{(0)} \right)^{-1} \cdot \left( 1 - \frac{\delta D_n}{D_n^{(0)}} \right) \right]}, (m = 1, \dots, M). \quad (4)$$

где:  $\Phi_n^{(0)} = \omega_n^{(0)} \cdot t_0$  - номинальное значение фазы сигнала, формируемого  $n$ -м генератором.

Последующие преобразования позволяют преобразовать соотношение (4) с удержанием только линейных членов относительно  $\delta\omega_n$ ,  $\delta D_n$  и  $\Delta t_m$

$$t_0 \cdot \sum_{n=1}^N \delta\omega_n \frac{\omega_n^{(0)}}{D_n^{(0)}} + 2 \sum_{n=1}^N \frac{\delta D_n \cdot \omega_n^{(0)}}{\left( D_n^{(0)} \right)^2} + \omega_n^{(0)} \Delta t_m = \left( \Phi_{m,n} - \Phi_n^{(0)} \right) \cdot \frac{\omega_n^{(0)}}{D_n^{(0)}}, m = 1, \dots, M. \quad (5)$$

Уравнение (5) позволяет сформировать систему линейных алгебраических уравнений (СЛАУ) с  $2N + M$  неизвестными, которыми являются  $\delta\omega_n$ ,  $\delta D_n$  ( $n = 1, \dots, N$ ) и  $\Delta t_m$  ( $m = 1, \dots, M$ ). Число уравнений  $N \cdot M$  в системе равно числу измеренных значений фаз сигналов  $\Phi_{m,n}$ .

Матричная форма записи данной системы уравнений имеет вид

$$\begin{pmatrix} \mathbf{A}_1 \\ \mathbf{A}_2 \\ \dots \\ \mathbf{A}_{M \cdot N} \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} \delta\omega \\ \delta\mathbf{D} \\ \Delta\mathbf{t} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \Delta\Phi_1 \\ \Delta\Phi_2 \\ \dots \\ \Delta\Phi_{M \cdot N} \end{pmatrix}, \quad (6)$$

где:  $\mathbf{A}_q$  - вектор, содержащий блоки  $\mathbf{a}_1$ ,  $\mathbf{a}_2$  размерности  $1 \times N$  с элементами:

$$\mathbf{a}_1 = \left\{ \frac{t_0 \cdot \omega_1^{(0)}}{D_1^{(0)}}, \frac{t_0 \cdot \omega_2^{(0)}}{D_2^{(0)}}, \dots, \frac{t_0 \cdot \omega_N^{(0)}}{D_N^{(0)}} \right\}, \quad \mathbf{a}_2 = \left\{ \frac{2\omega_1^{(0)}}{\left( D_1^{(0)} \right)^2}, \frac{2\omega_2^{(0)}}{\left( D_2^{(0)} \right)^2}, \dots, \frac{2\omega_N^{(0)}}{\left( D_N^{(0)} \right)^2} \right\}$$

соответственно и блок  $\mathbf{a}_3^{(q)} = \{0, \dots, 0, 1, 0, \dots, 0\}$  размерности  $1 \times M$ ,  $q$ -й элемент

которого равен  $\omega_q^{(0)}$ , а все остальные нули;

$$\delta\omega^T = \{\delta\omega_1, \delta\omega_2, \dots, \delta\omega_N\};$$

$$\delta D^T = \{\delta D_1, \delta D_2, \dots, \delta D_N\};$$

$$\Delta t^T = \{\delta t_1, \delta t_2, \dots, \delta t_M\}.$$

Для разрешимости СЛАУ должно выполняться условие  $N \cdot M \geq 2N + M$ , которое определяет минимально необходимое число измерительных интервалов  $M \geq 2N/(N-1)$ .

Возможность совместного оценивания не только нестабильности временного интервала измерений, но и действительных значений номинальной частоты и относительной нестабильности каждого из стабилизируемых генераторов и соответственно частотно-временных параметров формируемых ими сигналов без дополнительных предположений о характере распределения значений  $\delta\omega_n$  и  $\delta\omega_n$  возможность более широкого применения предлагаемого метода по сравнению с ранее рассмотренными в [1-6] результатами.

Решение системы уравнений (6) может быть получено при переходе к системе нормальных уравнений в виде [7]

$$\begin{pmatrix} \delta\omega \\ \delta D \\ \Delta t \end{pmatrix} = \begin{bmatrix} & & & & \\ & & & & \\ & & & & \\ & & & & \\ & & & & \end{bmatrix}^{-1} \begin{pmatrix} \mathbf{A}_1 \\ \mathbf{A}_2 \\ \dots \\ \mathbf{A}_{M \cdot N} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \mathbf{A}_1 & \mathbf{A}_2 & \dots & \mathbf{A}_{M \cdot N} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \Delta\Phi_1 \\ \Delta\Phi_2 \\ \dots \\ \Delta\Phi_{M \cdot N} \end{pmatrix}. \quad (7)$$

Диагональные элементы обратной матрицы определяют дисперсии оценок  $\delta\omega_n$ ,  $\delta D_n$ , ( $n=1, \dots, N$ ) и  $\Delta t_m$ , ( $m=1, \dots, M$ ), а элементы вне главной диагонали – ковариации среднеквадратических отклонений соответствующих параметров.

### 3. Результаты численного моделирования

Анализ получаемых с использованием предлагаемого метода проведем для случая системы, содержащей 101 генератор, из которых параметры  $N=100$  генераторов могут оцениваться с использованием предлагаемого метода. Предполагаемые значения параметров генераторов выбраны равными:  $\omega_n^{(0)} = 2\pi \cdot 10^8 \text{ c}^{-1}$ ,  $D_n^{(0)} = 10^{-8}$ , что соответствует значениям генераторов

высокочастотных сигналов с улучшенными параметрами [8]. Отклонения номинальных частот и относительных нестабильностей генераторов от предполагаемых значений подчиняются логарифмически-нормальному закону распределения [9], который с физической точки зрения более точно описывает возможные отклонения параметров, исключая появление отрицательных значений

$$p(x) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^{\ln x} \exp\left(-\frac{(\ln x - \ln a)^2}{2\sigma^2}\right) d(\ln x). \quad (8)$$

В соотношении (8)  $\sigma$  обозначает дисперсию распределения отклонений частоты или относительной нестабильности от предполагаемых значений,  $a$  - предполагаемые значения частоты  $\omega_n^{(0)}$  или относительной нестабильности  $D_n^{(0)}$ . Значения дисперсии отклонения параметров, как правило, составляет  $10^{-5}$  для частоты и  $10^{-3}$  для относительной нестабильности генераторов.

В качестве получаемых результатов рассматривались отношения среднеквадратических погрешностей (СКП) оценивания частотно-временных параметров сигналов (СКП отклонения оценок длительности временного интервала, номинальной частоты и относительной нестабильности) к соответствующим истинным значениям. Под истинными значениями понимаются значения, полученные при проведении численного моделирования. Результаты исследования приведены в таблице 1.

Таблица 1. Результаты моделирования оценивания частотно-временных параметров сигналов.

| Отношение СКП к истинному значению величины | Полученное на основе метода [4] | Полученное на основе предлагаемого метода |
|---|---------------------------------|---|
| Длительности временного интервала измерений | $2,13 \cdot 10^{-9}$            | $1,2 \cdot 10^{-9}$                       |
| Номинальной частоты сигнала генератора      | $4 \cdot 10^{-9}$               | $1,5 \cdot 10^{-9}$                       |
| Отношение нестабильности частоты сигнала    | $7 \cdot 10^{-9}$               | $2,7 \cdot 10^{-6}$                       |

В [4] было показано, что при увеличении числа генераторов, значения измеренных фаз которых использовались для оценивания частотно-временных параметров сигналов уменьшение СКП при нормальном законе распределений отклонений оценок имело зависимость, близкую к  $N^{-1/2}$ . Однако при законах распределения отклонений частотно-временных параметров сигнала от нормального получаемые оценки являются смещенными, что и определяет увеличение СКП по отношению к результатам, приведенным в [4]. Предлагаемый метод, свободный от данного ограничения, позволяет получить более точные оценки отклонений частотно-временных параметров сигналов и соответственно меньшие значения СКП.

### **Заключение**

Использование предлагаемого метода позволяет сформировать систему уравнений, аргументами которой являются отклонения длительностей временных интервалов измерений от номинальных значений, а также для каждого из генераторов отклонения между истинными и предполагаемыми значениями номинальной частоты и отклонения между истинными и предполагаемыми значениями относительной нестабильности позволяет получить более точные оценки текущей частоты генераторов. Проведенный численный эксперимент показал, что данный метод обеспечивает дальнейшее уменьшение СКП оценивания значений номинальной частоты и относительной нестабильности частоты генераторов.

Таким образом, можно отметить, что совместная обработка отклонений фаз сигналов в системе одновременно и независимо функционирующих генераторов при использовании предложенного метода, в соответствии с которым формируется система линейных алгебраических уравнений, неизвестными в которой являются длительности временных интервалов измерений, номинальной частоты и относительной нестабильности частоты генераторов, принципиально снимает ограничения на требования точного задания значений параметров генераторов.

## Благодарности

Работа выполнена при материальной поддержке РФФИ, грант № 19-01-00151/20.

## Литература

1. Пат. №2219654, RU, МПК7 Н 03 L 7/00, G 01 R 23/12, Способ стабилизации частот генераторов / Д.Д. Габриэльян, А.Г. Прыгунов, В.В. Хуторцев, В.В. Трепачев – опубл. 20.12.03 в Бюл. № 35.
2. Габриэльян Д.Д., Прыгунов А.А., Прыгунов А.Г., Сафарьян О.А. Метод оценки частот в системе генераторов // Физические основы приборостроения, 2012, Т. 1. № 2. - С. 72-77.
3. Д.Д. Габриэльян, О.А. Сафарьян. Проявление свойства эмерджентности в системе независимо функционирующих генераторов при использовании метода статистической стабилизации частоты. Журнал радиоэлектроники [электронный журнал]. 2019. № 8. <https://doi.org/10.30898/1684-1719.2019.8.2>
4. Д.Д. Габриэльян, О.А. Сафарьян. Обобщенный метод статистического оценивания частоты одновременно и независимо функционирующих генераторов. Журнал радиоэлектроники [электронный журнал]. 2020. № 5. <https://doi.org/10.30898/1684-1719.2020.5.5>
5. Сафарьян О.А. Моделирование процесса стабилизации частоты генераторов в инфокоммуникационных системах // Вестник ДГТУ, 2016, Т. 16, № 4 (87), Ч. 2. - С. 150-154.
6. Olga Safaryan, Ivan Sakharov, Nikolay Boldyrikhin, Irina Yengibaryan Method of Reducing Phase Noise in the System Simultaneously and Independently Operating the High-Frequency Signal Generators // Engineering Computations, No.8 (2). Volume 34. Emerald Group Publishing Ltd., 2017. P. 2586 – 2594.
7. Мазмишвили А.И. Теория ошибок и метод наименьших квадратов. – М.: Недра, 1978. – 310 с.

8. Morion, Inc. – companyprofile. Режим доступа: <http://www.morion.com.ru>  
(дата обращения 10.03.2020 г.).
9. Корн Г., Корн Т. Справочник по математике для научных работников и

**Для цитирования:**

Габриэльян Д.Д., Лазаренко С.В., Кульбикаян Б.Х., Сафарьян О.А., Сахаров И.А. Метод оценивания частотно-временных параметров сигналов в системе одновременно и независимо функционирующих генераторов. Журнал радиоэлектроники [электронный журнал]. 2020. №12. <https://doi.org/10.30898/1684-1719.2020.12.3>