

Метод оценки частоты генераторов в условиях непрогнозируемого изменения длительности интервала измерений***О. А. Сафарьян**

Исследуется метод оценивания частот одновременно и независимо функционирующих генераторов в условиях непрогнозируемого изменения длительности интервала измерений. Рассматриваются погрешности, возникающие при использовании указанного метода из-за нестационарности частот генераторов на интервале оценивания частот. Первая составляющая ошибки связана с отклонением измеряемой фазы колебаний генератора из-за собственной неустойчивости частоты генератора, вторая определяется непрогнозируемым изменением частоты генератора на интервале измерений. Отмечено, что уменьшение каждой из составляющих предъявляет взаимоисключающие требования к длительности временного интервала. На основе известных соотношений, определяющих потенциально достижимое значение среднеквадратического отклонения частоты от номинального значения, получены выражения, показывающие оптимальную длительность временного интервала измерений. В качестве критерия при выборе длительности временного интервала рассматривается минимум суммы двух ошибок. Приводятся аналитические соотношения, определяющие потенциально достижимые точности оценок частот. Доказываются несмещенность, эффективность и состоятельность получаемых оценок.

Ключевые слова: частота генератора, оценка длительности временного интервала, оценка отклонения частоты от номинального значения, статистический метод стабилизации частот, интервал измерения.

Введение. На современном этапе развития инфокоммуникационных технологий повышение точности и стабильности формирования частоты генераторов является одной из важнейших задач. Эти вопросы актуальны для систем связи радиолокации, радионавигации и метрологии. Однако во многих случаях, например, в радиолокационных или радионавигационных системах, можно ограничиться только знанием частоты генераторов, чтобы учесть это значение при определении навигационных параметров объекта на местности и в пространстве или при поверке приборов [1–5].

В настоящее время для определения и стабилизации частоты генератора наиболее широко используется способ с применением фазовой автоматической подстройки частоты (ФАПЧ) [6–11]. Реализующее данный способ устройство включает эталонный и подстраиваемый генераторы, фазовый детектор и управляемый элемент. Однако высокостабильный генератор является сложным и дорогим техническим устройством. Это связано с построением высокочастотных контуров и формированием высокостабильных колебаний [12, 13]. В то же время в современных инфокоммуникационных системах для решения функциональных задач используется большое число независимых генераторов [14–16]. При отсутствии высокостабильного генератора частоты каждого из совместно и независимо функционирующих генераторов могут оцениваться так, как предложено в [17, 18]. Однако данный способ не позволяет учитывать изменения параметров генераторов при изменении внешних условий, что приводит к снижению точности оценок частот генераторов.

Целью статьи является разработка метода, обеспечивающего повышение точности оценивания частоты генераторов в процессе жизненного цикла радиоэлектронной системы с учетом неустойчивости температуры, напряжений и т. д. При этом предполагается, что отсутствует высокостабильный дополнительный генератор и с этим связано непрогнозируемое отклонение длительности временного интервала.

Теоретические основы метода оценивания частот генераторов в условиях непрогнозируемого изменения интервала измерений. Рассмотрим совокупность $K+1$ генераторов, объединенных в составе радиоэлектронной системы или комплекса. Номинальные значения частоты генераторов

* Работа выполнена в рамках инициативной НИР.

и их относительные нестабильности известны и равны соответственно f_{0k} и σ_k ($k = 1, \dots, K + 1$). Для каждого из данной совокупности K генераторов в течение интервала длительностью $T_{\text{и}}$ производится измерение полной фазы ϕ_k колебаний его выходного сигнала ($k = 1, \dots, K$). Это происходит при текущих условиях эксплуатации, одновременно, в течение одного и того же временного интервала измерений, задаваемого $(K + 1)$ -м генератором.

В результате воздействия внешних факторов (например, нестабильности температуры, напряжения), частоты всех генераторов отличаются от номинальных значений — на величину Δf_k ($k = 1, \dots, K + 1$), а длительность временного интервала — на величину $\delta T_{\text{и}} = -T_{\text{и}} \times \Delta f_{K+1} / f_{0K+1}$.

Чтобы оценить отклонение частоты каждого из совокупности K генераторов, измерим полную фазу его колебаний ϕ_k и определим отклонение $\Delta \phi_k$ полной фазы колебаний относительно ее номинального значения ϕ_{0k} :

$$\Delta \phi_k = \phi_k - \phi_{0k}, \quad k = 1, \dots, K. \quad (1)$$

Значение ϕ_{0k} соответствует полной фазе колебаний сигнала номинальной частоты f_{0k} за временной интервал измерений номинальной длительности $T_{\text{и}}$.

Отклонение $\Delta \phi_k$ после линеаризации (отбрасывания слагаемого $\Delta f_k \cdot \delta T_{\text{и}}$) определяется двумя слагаемыми:

— составляющей отклонения, определяемой отклонением частоты самого k -го генератора и равной $\Delta \phi'_k = \Delta f_k \cdot T_{\text{и}}$;

— составляющей отклонения, определяемой отклонением длительности временного интервала измерений от номинального значения и равной $\Delta \phi''_k = f_{0k} \cdot \delta T_{\text{и}}$.

При использовании метода ФАПЧ $(K + 1)$ -й генератор, применяемый для задания временного интервала измерений, является высокостабильным (его стабильность гораздо выше по сравнению с остальными K -генераторами). Поэтому $\Delta f_{K+1} \ll \Delta f_k$ ($k = 1, \dots, K$), и для всех K -генераторов можно считать $\Delta \phi''_k \ll \Delta \phi'_k$. С учетом последнего получаем, что $\Delta \phi'_k \cong \Delta \phi_k$, и определяем отклонение частоты k -го генератора ($k = 1, \dots, K$) по результатам измеренного отклонения фазы колебаний от номинального значения с использованием соотношения $\Delta f_k \cong \Delta \phi_k / T_{\text{и}}$. Однако в рассматриваемом случае отсутствует высокостабильный генератор, обе составляющие отклонения фазы являются соизмеримыми и по результатам одиночных измерений не могут быть разделены. Таким образом, возникает задача оценки частоты генераторов в условиях непрогнозируемого изменения интервала измерений.

Для разделения составляющих $\Delta \phi'_k$ и $\Delta \phi''_k$ необходимо получить оценку $\hat{\delta T}_{\text{и}}$ и затем определить частоту колебаний каждого генератора при данных условиях эксплуатации. Для этого используется соотношение:

$$f_k = \frac{\phi_k - f_{0k} \cdot \delta T_{\text{и}}}{T_{\text{и}}}, \quad k = 1, \dots, K. \quad (2)$$

Для определения $\delta T_{\text{и}}$ составим функцию правдоподобия [19]

$$L\{\delta T_{\text{и}}\} = \ln \left\{ \prod_{k=1}^K \left[(2\pi\sigma_k^2)^{-1/2} \exp \left(-\frac{(\Delta \phi_k)^2}{2\sigma_k^2} \right) \right]^{m_k} \right\}. \quad (3)$$

Коэффициенты m_k ($k = 1, \dots, K$) определяют степень влияния отклонения фазы каждого генератора на точность оценивания отклонения длительности интервала измерений от номинального зна-

чения. При записи соотношения (3) было учтено, что отклонения частот генераторов от номинальных значений Δf_k ($k=1, \dots, K$) определяются влиянием большого числа независимых и равнозначных факторов и, соответственно, подчиняются нормальному закону распределения.

С учетом выражения (2) функция правдоподобия (3) приводится к виду

$$L\{\delta T_{\text{и}}\} = \ln \left\{ \prod_{k=1}^K \left[(2\pi\sigma_k^2)^{-1/2} \exp \left(-\frac{(\Delta\phi_k - \phi_{0k}\delta\hat{f}/T_{\text{и}})^2}{2\sigma_k^2\phi_{0k}^2} \right) \right]^{m_k} \right\}. \quad (4)$$

В качестве искомой оценки $\hat{\delta T}_{\text{и}}$ выберем значение, при котором функция (4) достигает максимума. Соответствующее значение равно

$$\hat{\delta T}_{\text{и}} = T_{\text{и}} \frac{\sum_{k=1}^K (m_k \Delta\phi_k \sigma_k^{-2} f_{0k}^{-1})}{\sum_{k=1}^K m_k \sigma_k^{-2}}. \quad (5)$$

Доказательство, что найденная в (5) оценка отклонения длительности временного интервала измерений обеспечивает максимум функции правдоподобия, легко получается из исследования второй производной функции (4).

Значение $\hat{\delta T}_{\text{и}}$ после подстановки в (2) позволяет получить оценку частоты k -го генератора ($k=1, \dots, K$) с использованием выражения

$$\hat{f}_k = \frac{\phi_k - f_{0k} \cdot \hat{\delta T}_{\text{и}}}{T_{\text{и}}}. \quad (6)$$

Данное соотношение полностью решает поставленную задачу получения оценки частоты каждого из совокупности одновременно и независимо функционирующих генераторов в условиях непрогнозируемого изменения интервала измерений.

Введение коэффициентов m_k позволяет увеличить число степеней свободы в управлении величиной получаемой оценки и компенсации воздействия различных факторов. В частности, как отмечалось выше, в течение жизненного цикла происходит изменение параметров отдельных генераторов, изменяется их нестабильность σ_k^2 . Для компенсации указанных эффектов необходимо изменять параметры вычислительного алгоритма, на основе которых получается оценка $\hat{\delta T}_{\text{и}}$ в (5). При этом достаточно обеспечить выполнение условия $m_k \cdot \sigma_k^{-2} = \text{const}$. Это технически значительно проще, чем использование, например, систем термостабилизации, чтобы в течение всего цикла работы системы обеспечить стабильность частот генераторов.

Свойства получаемых оценок. Исследуем свойства получаемых оценок. Для определения математического ожидания получаемой оценки $\hat{f}_k$ используем выражение

$$M[\hat{f}_k] = M \left[\frac{\phi_k - f_{0k} \cdot \hat{\delta T}_{\text{и}}}{T_{\text{и}}} \right]. \quad (7)$$

С учетом свойств математического ожидания преобразуем выражение (7) к виду

$$M[\hat{f}_k] = \frac{M[\phi_k] - f_{0k} \cdot M[\hat{\delta T}_{\text{и}}]}{T_{\text{и}}}. \quad (8)$$

Для дальнейших преобразований используем выражения (2) и (5). В частности, для $M[\phi_k]$ можно записать

$$M[\phi_k] = \phi_{0k} + M[\Delta f_k] \cdot T_{\text{и}} - \frac{f_{0k} \cdot T_{\text{и}} \cdot M[\Delta f_{K+1}]}{f_{0K+1}}. \quad (9)$$

Из выражения (9) с учетом сделанных предположений о характере статистического распределения отклонений частот генераторов непосредственно следует, что $M[\phi_k] = \phi_{0k}$. Аналогично можно показать, что $M[\hat{\delta} T_{\text{и}}] = 0$. Таким образом, из (8) следует, что математическое ожидание оценки частоты k -го генератора равно f_{0k} , $k = 1, \dots, K$, т. е. получаемая оценка частоты генератора является несмещенной [20].

Вычислим дисперсию получаемой оценки. Воспользуемся выражением (6), в котором случайной величиной является только оценка отклонения длительности временного интервала от номинального значения. В этом случае, основываясь на результатах [19], получим

$$D[\hat{f}_k] = \frac{f_{0k}^2}{T_{\text{и}}^2} D\{\hat{\delta} T_{\text{и}}\}, \quad k = 1, \dots, K. \quad (10)$$

Чтобы найти $D\{\hat{\delta} T_{\text{и}}\}$, основываясь на (5) и учитывая, что первый начальный момент случайной величины $\hat{\delta} T_{\text{и}}$ равен нулю, запишем выражение для второго центрального момента (дисперсии) оценки $\hat{\delta} T_{\text{и}}$:

$$D\{\hat{\delta} T_{\text{и}}\} = M \left\{ \left(\frac{\sum_{k=1}^K m_k \Delta \phi_k (\sigma_k^2 f_{0k})^{-1}}{2\pi \sum_{k=1}^K m_k \sigma_k^{-2}} \right)^2 \right\}. \quad (11)$$

Выполняя последовательно преобразования в (10), получим

$$D\{\hat{\delta} T_{\text{и}}\} = M \left\{ \sum_{k=1}^K \sum_{p=1}^K m_k m_p \Delta \phi_k \Delta \phi_p \sigma_k^{-2} \sigma_p^{-2} f_{0k}^{-1} f_{0p}^{-1} \right\} \left(\sum_{k=1}^K \sum_{p=1}^K m_k m_p \sigma_k^{-2} \sigma_p^{-2} \right)^{-1}. \quad (12)$$

Учитывая, что отклонения частот генераторов являются некоррелированными, получаем

$$M\{\Delta \phi_k \cdot \Delta \phi_p\} = \begin{cases} D\{\Delta \phi_k\}, & k = p, \\ 0, & k \neq p. \end{cases} \quad (13)$$

Тогда представление для дисперсии $\hat{\delta} T_{\text{и}}$ имеет вид

$$D\{\hat{\delta} T_{\text{и}}\} = \sum_{k=1}^K M\{(m_k \Delta \phi_k)^2\} (\sigma_k^4 f_{0k}^2)^{-1} \left(\sum_{k=1}^K \sum_{p=1}^K m_k m_p \sigma_k^{-2} \sigma_p^{-2} \right)^{-1}. \quad (14)$$

Принимая во внимание представление $\Delta \phi_k = \Delta \phi'_k + \Delta \phi''_k$ из (1), получаем

$$M\{(\Delta \phi_k)^2\} = t_0^2 (f_{0k}^2 \sigma_k^2 + f_{0K+1}^2 \sigma_{K+1}^2). \quad (15)$$

Следовательно, окончательное выражение для дисперсии оценки временного интервала имеет вид:

$$D\{\hat{\delta} T_{\text{и}}\} = \frac{t_0^2 \sum_{k=1}^K m_k^2 (f_{0k}^2 \sigma_k^2 + f_{0K+1}^2 \sigma_{K+1}^2) (\sigma_k^4 f_{0k}^2)^{-1}}{\left(\sum_{k=1}^K \sum_{p=1}^K m_k m_p \sigma_k^{-2} \sigma_p^{-2} \right)}. \quad (16)$$

Таким образом, дисперсия оценки частоты генератора определяется формулой:

$$D\{\hat{f}_k\} = \frac{f_{0k}^2 t_0^2 \sum_{k=1}^K m_k^2 (f_{0k}^2 \sigma_k^2 + f_{0K+1}^2 \sigma_{K+1}^2) (\sigma_k^4 f_{0k}^2)^{-1}}{T_{\mu}^2 \cdot \left(\sum_{k=1}^K \sum_{p=1}^K m_k m_p \sigma_k^{-2} \sigma_p^{-2} \right)}. \quad (17)$$

Рассмотрим частный случай, при котором все генераторы работают на различных частотах $f_{0k} \neq f_0$ ($k = 1, \dots, K+1$) и имеют одинаковые относительные нестабильности $\sigma_k = \sigma$ ($k = 1, \dots, K$). Исследуем характеристики распределения отклонений частот генераторов от номинальных значений для данного случая. Исходя из того, что первый начальный момент случайной величины $\Delta\phi_k$ равен нулю, на основании соотношения (16) запишем выражение для второго центрального момента (дисперсии):

$$D\{\hat{f}_k\} = \frac{f_{0k}^2 t_0^2 \sigma^2 \sum_{k=1}^K m_k^2 (f_{0k}^2 + f_{0K+1}^2)}{T_{\mu}^2 \sum_{k=1}^K \sum_{p=1}^K m_k m_p}. \quad (18)$$

В случае одинаковых значений весовых коэффициентов m_k ($k = 1, \dots, K$) величина дисперсии определяется выражением

$$D\{\hat{f}_k\} = \frac{f_{0k}^2 t_0^2 \sigma^2 \sum_{k=1}^K (f_{0k}^2 + f_{0K+1}^2)}{T_{\mu}^2 K^2}. \quad (19)$$

Как следует из (18)

$$\lim_{K \rightarrow \infty} D\{\hat{f}_k\} = 0, \quad (20)$$

следовательно, данная оценка является асимптотически эффективной [20].

Для проверки свойства состоятельности получаемой оценки воспользуемся неравенством Чебышева. В соответствии с последним условием, для любого положительного числа ε вероятность отклонения оценки частоты генератора $\hat{f}_k$ от его математического ожидания не меньше чем на ε ограничена сверху величиной $D\{\hat{f}_k\}/\varepsilon^2$.

В рассматриваемом случае получаем

$$P(|\hat{f}_k| \geq \varepsilon) \leq \frac{D\{\hat{f}_k\}}{\varepsilon^2}. \quad (21)$$

С учетом формулы (18) последнее выражение преобразуется следующим образом:

$$P(|\hat{f}_k| \geq \varepsilon) \leq \frac{f_{0k}^2 t_0^2 \sigma^2 \sum_{k=1}^K (f_{0k}^2 + f_{0K+1}^2)}{\varepsilon T_{\mu}^2 K^2}, \quad (22)$$

откуда следует, что оценка является состоятельной [20].

Выводы.

1. Предложенный метод статистической обработки результатов измерений фаз колебаний одновременно и независимо функционирующих генераторов в условиях непрогнозируемого изменения длительности интервала измерений позволяет получать оценки частот генераторов. При этом на параметры генераторов (частоту и стабильность частоты колебаний) не накладываются никакие ограничения. Метод позволяет значительно упростить построение систем, обеспечивающих стабильность параметров генераторов, путем применения весовых коэффициентов, используемых при получении оценок частот генераторов.

2. Как показали результаты исследований, получаемые с использованием данного метода оценки частот генераторов являются несмещенными, состоятельными и эффективными.

Библиографический список

1. Деундяк, В. М. Имитационная модель цифрового канала передачи данных и алгебраические методы помехоустойчивого кодирования / В. М. Деундяк, Н. С. Могилевская // Вестник Дон. гос. техн. ун-та. — 2001. — № 1. — С. 98–105.
2. Сумбатян, М. А. Алгоритм цифровой обработки акустических сигналов аудиофайлов и их распознавание на основе объективных критериев / М. А. Сумбатян, С. Е. Шевцов // Вестник Дон. гос. техн. ун-та. — 2008. — № 3. — С. 238–245.
3. Васильев, А. Ф. Программируемый цифровой преселектор для систем радиосвязи двойного назначения / А. Ф. Васильев, Е. А. Меркулов // Вестник Дон. гос. техн. ун-та. — 2012. — № 2. — С. 5–11.
4. Enhancements to GPS Operations and Clock Evaluations Using a Total Hadamard Deviation / D. A. Howe [et al.] // IEEE Ultrasonics, Ferroelectrics and Frequency Control. — Vol. 52, № 8. — P. 1253–1261.
5. Bregni, S. Generation of Pseudo-Random Power-Law Noise Sequences by Spectral Shaping / S. Bregni // Communications World. — Pasadena : WSES Press, 2004. — P. 173–178.
6. Романов, С. К. Системы импульсно-фазовой автоподстройки в устройствах синтеза и стабилизации частот / С. К. Романов, Н. М. Тихомиров, А. В. Леньшин. — Москва : Радио и связь, 2010. — 328 с.
7. Белов, Л. А. Современные синтезаторы частот и сигналов / Л. А. Белов // Радиотехника. — 2007. — № 3. — С. 21–25.
8. Riley, W.-J. Handbook of Frequencies Stability Analysis / W.-J. Riley ; National Institute of Standards and Technology ; US Department of Commerce. — Washington : U. S. Government printing office, 2008. — 124 p.
9. Allan, D.-W. Characterization of Precision Clocks and Oscillators / D.-W. Allan // Proc. 5th European Frequency and Time Forum. — London, 1991. — P. 1–9.
10. Riley, W.-J. Techniques for Frequency Stability Analysis / W.-J. Riley // Tutorial at the 2003 Intelligence Frequency Control Symposium. — Canberra, 2003. — P. 496–508.
11. Howe, D.-A. Interpreting Oscillatory Frequency Stability Plots / D.-A. Howe // Proceedings IEEE Frequency Control Symposium. — Canberra, 2002. — P. 725–732.
12. Черкесова, Л. В. Аппроксимация характеристик нелинейных элементов параметрических преобразователей в высших зонах неустойчивости колебаний / Л. В. Черкесова // Вестник Дон. гос. техн. ун-та. — 2009. — № 4. — С. 599–613.
13. Howe, D.-A. TeoH Bias-Removal Method / D.-A. Howe, J. McGee-Taylor, T. Tasset // IEEE Ultrasonics, Ferroelectrics and Frequency Control Symposium. — Pasadena, 2006. — Vol. 56, № 7. — P. 788–792.
14. Марарескул, Т. А. Эксперимент по синхронизации бортовых шкал времени навигационных космических аппаратов ГЛОНАСС по взаимным межспутниковым измерениям / Т. А. Марарескул, А. К. Гречкосеев, А. В. Василенко // Радиотехника. — 2013. — № 6. — С. 16–21.
15. McGee-Taylor, J. TeoH and Allan Deviation as Power-Law Noise Estimators / J. McGee-Taylor, D.-A. Howe // IEEE Ultrasonics, Ferroelectrics and Frequency Control Symposium. — 2007. — Vol. 57, № 2. — P. 714–722.
16. McGee-Taylor, J. Fast TeoBR: A method for long data set stability analysis / J. McGee-Taylor, D.-A. Howe // IEEE Ultrasonics, Ferroelectrics and Frequency Control Symposium. — 2008. — Vol. 58, № 3. — P. 731–840.

17. Способ стабилизации частот генераторов : патент 2197060 Рос. Федерация, МПК⁷H03L7/00, G01R23/12 / Д. Д. Габриэльян [и др.]. — № 2219654 ; опубл. 20.12.2003, Бюл. № 35. — 5 с.
18. Методы высокоточных измерений и воспроизведения физических величин / Д. Д. Габриэльян [и др.] // Физические основы приборостроения. — 2012. — Т. 1, №2. — С. 72–77.
19. Венцель, Е. С. Теория вероятностей : учебник для вузов / Е. С. Венцель. — 5-е. изд., стер. — Москва : Высшая школа, 1998. — 576 с.
20. Кобзарь, А. И. Прикладная математическая статистика / А. И. Кобзарь. — Москва : Физматлит, 2006. — 816 с.

Материал поступил в редакцию 17.11.2014.

References

1. Deundyak, V. M., Mogilevskaya, N. S. Imitatsionnaya model' tsifrovogo kanala peredachi dannykh i algebraicheskie metody pomekhoustoychivogo kodirovaniya. [Simulation model of digital data transmission channel and algebraic methods for error control coding.] Vestnik of DSTU, 2001, no. 1, pp. 98–105 (in Russian).
2. Sumbatyan, M. A., Shevtsov, S. E. Algoritm tsifrovoy obrabotki akusticheskikh signalov audiofaylov i ikh raspoznavanie na osnove ob'ektivnykh kriteriev. [Algorithm of digital processing of audio file acoustic signals and their recognition on the basis of objective criteria.] Vestnik of DSTU, 2008, no. 3, pp. 238–245 (in Russian).
3. Vasilyev, A. F., Merkulov, E. A. Programmiruemyy tsifrovoy preselektor dlya sistem radiosvyazi dvoynogo naznacheniya. [Programmable digital preselector for radio communication systems of dual purpose.] Vestnik of DSTU, 2012, no. 2, pp. 5–11 (in Russian).
4. Howe, D. A., et al. Enhancements to GPS Operations and Clock Evaluations Using a Total Hada-mard Deviation. IEEE Ultrasonics, Ferroelectrics and Frequency Control, vol. 52, no. 8, pp. 1253–1261.
5. Bregni, S. Generation of Pseudo-Random Power-Law Noise Sequences by Spectral Shaping. Communications World. Pasadena : WSES Press, 2004, pp. 173–178.
6. Romanov, S. K., Tikhomirov, N. M., Lenshin, A. V. Sistemy impul'sno-fazovoy avtopodstroyki v ustroystvakh sinteza i stabilizatsii chastot. [Pulse-system PLL in devices of synthesis and frequency control.] Moscow : Radio i svyaz', 2010, 328 p. (in Russian).
7. Belov, L. A. Sovremennyye sintezatory chastot i signalov. [Modern frequency synthesizers and signals.] Radiotekhnika, 2007, no. 3, pp. 21–25 (in Russian).
8. Riley, W.-J. Handbook of Frequencies Stability Analysis. National Institute of Standards and Technology ; US Department of Commerce. Washington : U. S. Government printing office, 2008, 124p.
9. Allan, D.-W. Characterization of Precision Clocks and Oscillators. Proc. 5th European Frequency and Time Forum. London, 1991, pp. 1–9.
10. Riley, W.-J. Techniques for Frequency Stability Analysis. Tutorial at the 2003 Intelligence Frequency Control Symposium. Canberra, 2003, pp. 496–508.
11. Howe, D.-A. Interpreting Oscillatory Frequency Stability Plots. Proc. IEEE Frequency Control Symposium. Canberra, 2002, pp. 725–732.
12. Cherkesova, L. V. Approksimatsiya kharakteristik nelineynykh elementov parametricheskikh preobrazovateley v vysshikh zonakh neustoychivosti kolebaniy. [Approximation of characteristics of nonlinear elements of parametric transducers in higher zones of oscillation instability.] Vestnik of DSTU, 2009, no. 4, pp. 599–613 (in Russian).
13. Howe, D.-A., McGee-Taylor, J., Tasset, T. TeoH Bias-Removal Method. IEEE Ultrasonics, Ferroelectrics and Frequency Control Symposium. Pasadena, 2006, vol. 56, no. 7, pp. 788–792.

14. Marareskul, T. A., Grechkoseyev, A. K., Vasilenko, A. V. Eksperiment po sinkhronizatsii bortovykh shkal vremeni navigatsionnykh kosmicheskikh apparatov GLONASS po vzaimnym mezhsputnikovym izmereniyam. [Experiment on synchronization of board time scales of GLONASS navigation satellites on mutual intersatellite measurements.] Radiotekhnika, 2013, no. 6, pp. 16–21 (in Russian).
15. McGee-Taylor, J., Howe, D.-A. TeoH and Allan Deviation as Power-Law Noise Estimators. IEEE Ultrasonics, Ferroelectrics and Frequency Control Symposium, 2007, vol. 57, no. 2, pp. 714–722.
16. McGee-Taylor, J., Howe, D.-A. Fast TeoBR: A method for long data set stability analysis. IEEE Ultrasonics, Ferroelectrics and Frequency Control Symposium, 2008, vol. 58, no. 3, pp. 731–840.
17. Gabrielyan, D. D., et al. Sposob stabilizatsii chastot generatorov : patent 2197060 Ros. Federatsiya, MPK7H03L7/00, G01R23/12 . [Method for stabilizing the oscillator frequencies: Patent 2197060 RF. MPK7H03L7/00, G01R23/12] Patent RF, no. 2219654, 2003 (in Russian).
18. Gabrielyan, D. D., et al. Metody vysokotochnykh izmereniy i vosproizvedeniya fizicheskikh velichin. [Methods for high-precision measurements and reproduction of physical quantities.] Physical Bases of Instrumentation, 2012, vol. 1, no. 2, pp. 72–77 (in Russian).
19. Ventsel, E. S. Teoriya veroyatnostey : uchebnik dlya vuzov. [Probability theory: textbook for high schools.] 5th ed. Moscow : Vysshaya shkola, 1998, 576 p. (in Russian).
20. Kobzar, A. I. Prikladnaya matematicheskaya statistika. [Applied Mathematical Statistics.] Moscow : Fizmatlit, 2006, 816 p. (in Russian).

METHOD FOR GENERATOR FREQUENCY EVALUATION UNDER UNPREDICTABLE CHANGES IN MEASUREMENT INTERVAL SIZE*

O. A. Safaryan

The method of frequency estimation of the simultaneously and independently operating generators under unpredictable changes in the measurement interval size is studied. Errors arising under the method application due to the transiency of the oscillator frequencies on the frequency estimation interval are considered. The first error component is related to the deviation of the measurable generator phase due to the inherent generator frequency instability; and the second one is determined by the unpredictable changes in the oscillator frequency on the measurement interval. It is noted that the decrease of each of the components imposes incompatible requirements on the duration of the time length. On the basis of the known relations identifying the potentially reachable value of the root-mean-square frequency deviation from the nominal value, the expressions determining the optimum time length are obtained. As a criterion when choosing the time length, the minimum of two errors sum is considered. The analytical relations determining potentially reachable accuracy of the frequency estimates are presented. The unbiasedness, efficiency, and consistency of the estimates obtained are proved.

Keywords: generator frequency, time length estimation, evaluation of frequency deviation from the nominal value, statistical method of frequencies stabilization, measurement interval.

* The research is done within the frame of the independent R&D.