

УДК 621.396.6

ПРОЯВЛЕНИЕ СВОЙСТВА ЭМЕРДЖЕНТНОСТИ В СИСТЕМЕ НЕЗАВИСИМО ФУНКЦИОНИРУЮЩИХ ГЕНЕРАТОРОВ ПРИ ИСПОЛЬЗОВАНИИ МЕТОДА СТАТИСТИЧЕСКОЙ СТАБИЛИЗАЦИИ ЧАСТОТЫ

Д. Д. Габриэльян¹, О. А. Сафарьян²¹ФГУП «Ростовский-на-Дону научно-исследовательский институт радиосвязи»,
344038, г. Ростов-на-Дону, ул. Нансена, 130²ФГБОУ ВО «Донской государственный технический университет»,
344002, г. Ростов-на-Дону, пл. Гагарина, 1

Статья поступила в редакцию 30 июля 2019 г.

Аннотация. Рассмотрены условие возникновения и проявление свойства эмерджентности в системе одновременно и независимо функционирующих генераторов при использовании метода статистической стабилизации частоты. Показано, что свойство эмерджентности в такой системе заключается в появлении устойчивости системы (уменьшении, а при большом числе генераторов и практически к полному исключению) при воздействии внешних факторов. Свойство эмерджентности для рассматриваемой системы генераторов состоит, прежде всего, в уменьшении изменения частоты каждого из генераторов из-за влияния внешних факторов и соответственно сохранении потенциально достижимых значений стабильности частоты при заданных характеристиках генераторов. Выполнены исследования с использованием численного моделирования и проанализированы полученные результаты.

Ключевые слова: генераторы высокочастотных колебаний, статистический метод стабилизации частоты, синергичность, эмерджентность, стабильность частоты.

Abstract. The method of statistical frequency stabilization, based on the results of simultaneous measurements and statistical processing of phase deviations independently functioning N oscillators as part of a signal generator system, provides to achieve a significant increase in frequency stability. The marked increase in frequency stability is displaying of the synergy property of a system of N

simultaneously and independently functioning oscillators. At the same time, in such and analogy systems, when certain conditions are occurred, the emergence property of emergence is possible.

This paper discusses the conditions for displaying emergence property in a system of simultaneously and independently functioning oscillators. It is shown that the emergence properties in this case determines:

- by elimination of the biasedness of the obtained estimates, eliminate the change in the average frequency of the oscillators from the nominal value;
- due to the preservation of the asymptotic efficiency and consistency of the obtained estimates to ensure close to the potentially achievable frequency stability.

The results of numerical simulation confirm the results of theoretical studies.

The results of the research allow us to conclude that the joint processing of phase deviations of signals in the system simultaneously and independently functioning generators can reduce the frequency deviation and relative instability of the generators under the influence of external factors (temperature, voltage and other influences).

Keywords: high-frequency oscillators, statistical method of frequency stabilization, synergy, emergence, frequency stability.

Введение

Современные информационно-измерительные системы представляют собой кластеры, объединяющие абонентов, радиоэлектронная аппаратура которых включает большое количество одновременно и независимо функционирующих генераторов высокочастотных колебаний (СВЧ-генераторов). Важную роль в устойчивом обмене информацией между абонентами таких систем играет стабильность формируемых несущих частот, что связано со стабильностью используемых СВЧ-генераторов. В настоящее время для повышения стабильности частоты широко используются методы, представляющие собой различную реализацию метода фазовой автоподстройки частоты (ФАПЧ) [1]. Однако при большом числе одновременно и независимо

функционирующих генераторов высокая стабильность может быть обеспечена не только на основе ФАПЧ, требующей наличия технически сложных с высокой стоимостью изготовления и эксплуатации СВЧ-генераторов, но и на основе метода статистической стабилизации частоты [2-4].

В работе [5] отмечено, что способ статистической стабилизации частоты связан с проявлением свойства синергичности в системе генераторов. Однако еще одним свойством любой системы является эмерджентность, условие возникновения которой в системе одновременно и независимо функционирующих генераторов не рассматривалось.

Цель работы – изучить условия возникновения и степень проявления свойства эмерджентности в системе одновременно и независимо функционирующих генераторов при использовании метода статистической стабилизации частоты.

1. Теоретический анализ

Рассмотрим систему $N+1$ генераторов, каждый из которых должен формировать гармонические сигналы с номинальной частотой и относительной нестабильностью (вариацией Аллана), определяемыми функциональным назначением устройства в информационно-измерительной системе. Указанные сигналы поступают в соответствии с функциональными взаимосвязями в блоки формирования информационных сигналов и, кроме того, одновременно в устройство определения оценок текущих значений частоты и формирования управляющих сигналов для стабилизации частоты генераторов, как показано на рис. 1.

Система стабилизации частоты в этом случае включает генератор G_0 , формирующий измерительный интервал, измерительное и вычислительное устройства, формирующие оценки длительности измерительного интервала и текущих значений частоты СГ. Измеренные значения фаз N генераторов поступают на вход вычислительного устройства (Выч.), где определяются текущие значения частоты генератора. В соответствии с этими значениями формируются сигналы управления генераторами, обеспечивающие

приближение текущего значения частоты каждого из N генераторов к номинальному значению.

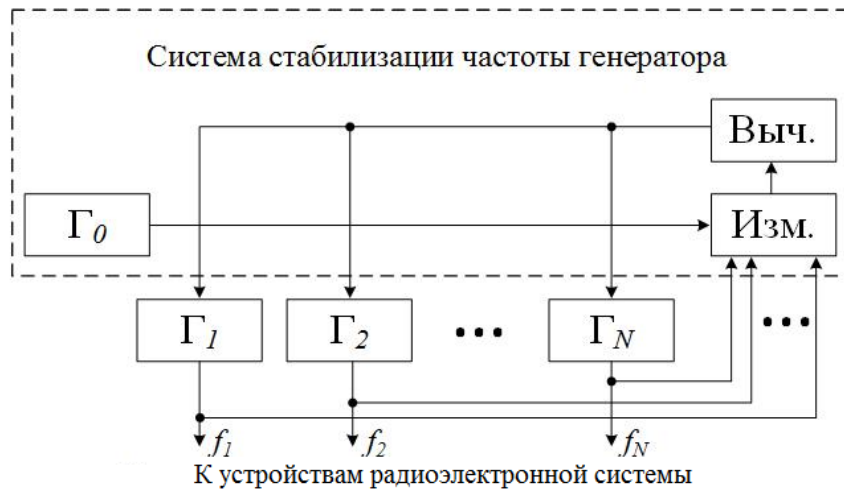


Рис. 1. Система стабилизации частоты на основе статистического метода

Рассматриваемый метод статистической стабилизации частоты заключается в одновременном измерении в течение некоторого измерительного интервала с номинальной длительностью t_0 , задаваемого одним из генераторов, фаз сигналов остальных N генераторов и формировании по результатам измерений оценки отклонения частоты каждого из N генераторов от номинального значения. Полученная оценка может использоваться либо для непосредственной стабилизации частоты генератора, либо учитываться при получении оценок других величин, например, дальности и радиальной скорости в радиолокационных системах [2-4]. В дальнейшем генератору, используемому для задания измерительного интервала, присвоим номер $n = 0$.

Основными соотношениями, определяющими метод стабилизации частоты, являются следующие [2-4]:

- соотношение для оценки отклонения длительности временного интервала измерений от номинального значения, обусловленная нестабильностью задающего временной интервал измерений генератора

$$\Delta \hat{t}_0 = \frac{\sum_{n=1}^N (\Delta \varphi_n - 2\pi \cdot f_n^{(0)} \cdot t_0) \cdot (\sigma_n^{(0)})^{-2} \cdot (f_n^{(0)})^{-1}}{\sum_{n=1}^N (\sigma_n^{(0)})^{-2}}, \quad (1)$$

- оценка отклонения частоты генератора на интервале измерений от соответствующего номинального значения [2-4]

$$\Delta \hat{f}_n = \left\{ \frac{\Delta \varphi_n - 2\pi \cdot f_n^{(0)} \cdot \sum_{p=1}^N (\Delta \varphi_p - 2\pi \cdot f_p^{(0)} \cdot t_0) \cdot (\sigma_p^{(0)})^{-2} \cdot (f_p^{(0)})^{-1}}{\sum_{p=1}^N (\sigma_p^{(0)})^{-2}} \right\} \cdot (2\pi \cdot t_0)^{-1}, \quad (2)$$

где $\Delta \varphi_n = f_n \cdot t - f_n^{(0)} \cdot t_0$ - отклонение измеренного значения фазы n -го генератора от номинального значения, обусловленное отклонениями как частоты f_n собственно n -го генератора, так и длительности t измерительного интервала, задаваемого генератором с $n=0$, связанных с воздействием различных факторов, от соответствующих номинальных значений ($n=1, \dots, N$).

В случае если один из генераторов имеет стабильность значительно более высокую по сравнению с остальными, этот генератор, как показано в [2-4], следует использовать для задания длительности временного интервала измерений, и метод статистической стабилизации частоты, фактически, преобразуется в метод ФАПЧ.

Выражения (1) и (2) устанавливают погрешность оценки длительности временного интервала измерений и отклонения частоты каждого генератора от номинальных значений, обусловленную воздействием внешних факторов, имеющих случайный характер с нормальным законом распределения и нулевым математическим ожиданием. При этом указанные оценки являются несмещенными, асимптотически эффективными и состоятельными [3, 4]. Параметры $f_n^{(0)}$ и $\sigma_n^{(0)}$ в выражениях (1) и (2) для каждого из N стабилизируемых генераторов ($n=1, \dots, N$) считаются известными на основе разработки и проводимых, как правило, статистических испытаний [6].

Однако на практике отклонение и стабильность частоты генератора по характеру изменения определяется двумя группами факторов [6]:

- внешние случайные воздействия, обуславливающие отклонение частоты f_n и стабильности σ_n n -го генератора от номинального значения, первое из

которых учитывается в соотношениях (1), (2);

- технологические факторы, а также факторы, связанные с изменением внешних условий (температуры, напряжения и т.д.) на протяжении длительного периода, приводящие к тому, что номинальные частоты генераторов f_{0n} и стабильности частоты σ_{0n} n -го генератора отличаются от соответствующих значений $f_n^{(0)}$ и $\sigma_n^{(0)}$, полученных по результатам, как правило, выборочных испытаний ($n = 1, \dots, N$), что не учитывается в соотношениях (1), (2).

Последняя группа факторов приводит к появлению смещения получаемых оценок отклонений частоты генераторов от номинального значения и увеличению погрешности оценок и, как следствие, снижению стабильности формируемых сигналов. В то же время можно считать, что значения f_{0n} и σ_{0n} , в свою очередь, подчиняются нормальному закону распределения с математическими ожиданиями $f_n^{(0)}$ и $\sigma_n^{(0)}$ соответственно, а значения дисперсии определяются конструкцией генераторов и технологией их производства.

Проанализируем влияние на изменение достигаемой стабильности частоты при использовании рассматриваемого статистического метода стабилизации частоты расхождения реальных значений номинальной частоты f_{0n} и относительной нестабильности генераторов σ_{0n} , обусловленных факторами второй группы, и предполагаемых соответствующих значений $f_n^{(0)}$ и $\sigma_n^{(0)}$.

С учетом выполняющихся, как правило, на практике условий $(f_{0n} - f_n^{(0)})/f_{0n} \ll 1$ и $(\sigma_{0n} - \sigma_n^{(0)})/\sigma_{0n} \ll 1$ запишем

$$\Delta\hat{t} = \Delta\hat{t}_0 + \sum_{n=1}^N \frac{\partial\Delta\hat{t}}{\partial f_{0n}} (f_{0n} - f_n^{(0)}) + \sum_{n=1}^N \frac{\partial\Delta\hat{t}}{\partial\sigma_{0n}} (\sigma_{0n} - \sigma_n^{(0)}). \quad (3)$$

Частные производные во втором и третьем слагаемых в правой части (3) легко вычисляются из (1) и имеют вид

$$\frac{\partial \Delta \hat{t}}{\partial f_{0n}} = - \left(2\pi \sum_{p=1}^N (\sigma_p^{(0)})^{-2} \right)^{-1} \left\{ \Delta \varphi_n \cdot (\sigma_n^{(0)} \cdot f_{0n})^{-2} \right\}, \quad (4)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial \Delta \hat{t}}{\partial \sigma_n^{(0)}} = & 2 \left[\sum_{p=1}^N (\sigma_n^{(0)})^{-2} \right]^{-2} \sum_{\substack{p=1 \\ p \neq n}}^N \left\{ (\sigma_n^{(0)})^{-2} (\sigma_p^{(0)})^{-3} (f_p^{(0)})^{-1} (\Delta \varphi_p - 2\pi \cdot f_p^{(0)} \cdot t_0) - \right. \\ & \left. - (\sigma_p^{(0)})^{-2} (\sigma_n^{(0)})^{-3} (f_n^{(0)})^{-1} (\Delta \varphi_n - 2\pi \cdot f_n^{(0)} \cdot t_0) \right\} \end{aligned} \quad (5)$$

Соотношение (3) принципиально определяет условие проявления свойства эмерджентности в системе генераторов, стабилизируемых с использованием метода статистической стабилизации частоты.

Возникающее смещение оценки длительности временного интервала приводит к появлению соответствующего смещения оценки частоты генератора, которое может быть представлено в виде

$$\Delta f' \approx \frac{f_n^{(0)} \cdot \Delta \hat{t}}{t_0}. \quad (6)$$

Под проявлением эмерджентности в данном случае понимается:

- с физической точки зрения появление устойчивости системы (уменьшения), а при большом числе генераторов и практически к полному исключению воздействия внешних факторов на частоту генераторов;
- с математической точки зрения к сохранению несмещенности, асимптотической эффективности и состоятельности оценки нестабильности временного интервала измерений при отличии реальных параметров f_{0n} и σ_{0n} каждого генератора от полученных по результатам статистических испытаний значений $f_n^{(0)}$ и $\sigma_n^{(0)}$ ($n = 1, \dots, N$).

Проявление данного свойства определяется условием

$$\sum_{n=1}^N \frac{\partial \Delta \hat{t}}{\partial f_{0n}} (f_{0n} - f_n^{(0)}) + \sum_{n=1}^N \frac{\partial \Delta \hat{t}}{\partial \sigma_{0n}} (\sigma_{0n} - \sigma_n^{(0)}) \approx 0. \quad (7)$$

Для оценки степени проявления свойства эмерджентности используем формулу, устанавливающую взаимосвязь отклонения частоты каждого из

генераторов от числа N входящих в систему генераторов при изменении их параметров

$$\varepsilon_n(N) = \frac{\left| \sum_{n=1}^N \frac{\partial \Delta \hat{t}}{\partial f_{0n}} (f_{0n} - f_n^{(0)}) + \sum_{n=1}^N \frac{\partial \Delta \hat{t}}{\partial \sigma_{0n}} (\sigma_{0n} - \sigma_n^{(0)}) \right|}{D_n}, \quad (8)$$

где D_n - потенциально достижимая в методе статистической стабилизации частоты относительная нестабильность генераторов.

Соотношения (1)-(8) определяют математическую модель исследования свойств эмерджентности в системе одновременно и независимо работающих генераторов.

2. Результаты численного моделирования

Исследование основных закономерностей проявления свойства эмерджентности проведем для случая системы N генераторов с одинаковыми предполагаемыми номинальными значениями параметров $f_n^{(0)} = f^{(0)}$ и $\sigma_n^{(0)} = \sigma^{(0)}$ ($n = 1, \dots, N$). При этом к параметрам генератора, задающего временной интервал измерений, специальные требования не предъявляются, и они могут быть выбраны такими же, как и параметры остальных N генераторов. Необходимо отметить, что в данном случае в соответствии с [2-4] значение D_n из (8) равно $D_n = \sigma^{(0)} / \sqrt{N}$.

С учетом выше сказанного, номинальные значения частоты f_{0n} стабилизируемых генераторов определяются соотношениями

$$f_{0n} = \frac{1}{\sqrt{2\pi \cdot D_n^{(f)}}} \exp \left[-\frac{(f_{0n} - f_n^{(0)})^2}{2D_n^{(f)}} \right], \quad (n = 1, \dots, N), \quad (8)$$

$$\sigma_{0n} = \frac{1}{\sqrt{2\pi \cdot D_n^{(\sigma)}}} \exp \left[-\frac{(\sigma_{0n} - \sigma_n^{(0)})^2}{2D_n^{(\sigma)}} \right], \quad (n = 1, \dots, N), \quad (9)$$

где $D_n^{(f)}$ и $D_n^{(\sigma)}$ - дисперсии распределения номинальных значений частоты и относительной нестабильности генераторов, определяемые технологическими процессами изготовления.

На рис. 2, 3 приведены зависимости среднего значения и дисперсии $\varepsilon_n(N)$ для 10 последовательных интервалов измерений номинальной длительностью 10^{-3} с, полученного при усреднении по всей совокупности N стабилизируемых генераторов.

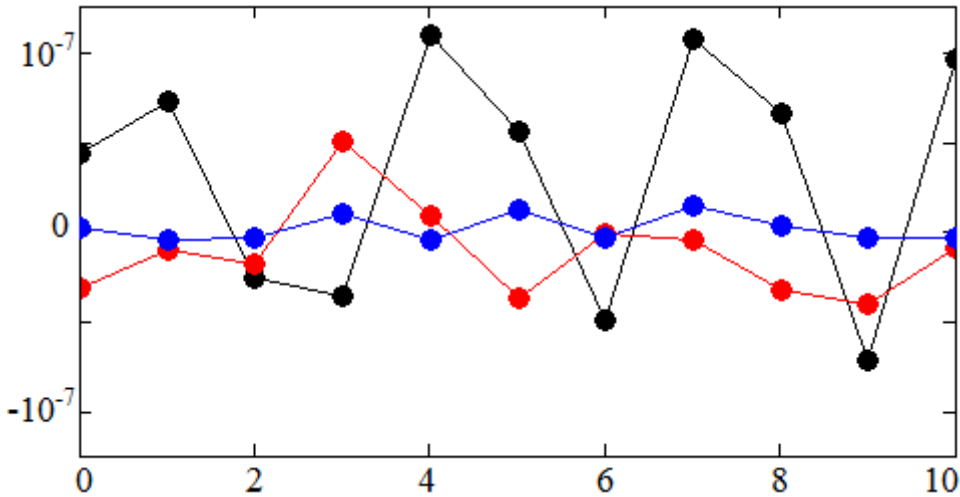


Рис. 2. Зависимость среднего значения $\varepsilon_n(N)$ от числа стабилизируемых генераторов: $N = 10$ - черная линия; $N = 100$ - красная линия; $N = 1000$ - синяя линия

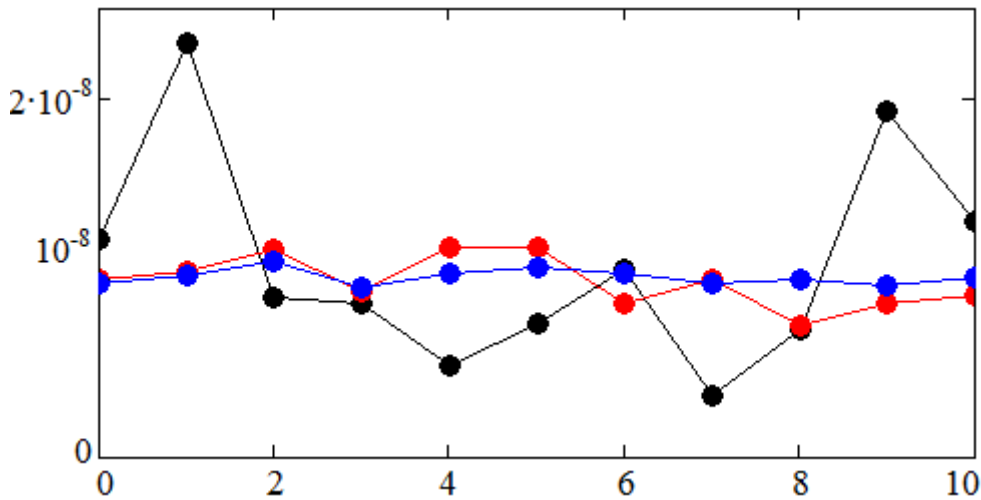


Рис. 3. Зависимость дисперсии $\varepsilon_n(N)$ от числа стабилизируемых генераторов: $N = 10$ - черная линия; $N = 100$ - красная линия; $N = 1000$ - синяя линия

Приведенные результаты показывают, что с увеличением N среднее значение $\varepsilon_n(N)$ стремится к нулю, что является следствием уменьшения отклонения частоты n -го генератора от номинального значения $f_n^{(0)}$.

Заключение

Проявление свойства эмерджентности в системе генераторов, как следует из приведенных зависимостей, заключается в уменьшении отклонения частоты f_n каждого генератора от соответствующего номинального значения $f_n^{(0)}$ при внешних воздействиях, что определяет снижение влияния технологических факторов производства и воздействия внешних факторов, таких как изменение температуры, напряжения, давления, вибрации и т.д. Появление указанного свойства принципиально отличает метод статистической стабилизации частоты от метода ФАПЧ.

Таким образом, можно отметить, что совместная обработка отклонений фаз сигналов в системе одновременно и независимо функционирующих генераторов позволяет уменьшить отклонение частоты и относительной нестабильности генераторов при воздействии внешних факторов (изменение температуры, напряжения и ряда других воздействий).

Благодарности

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

Литература

1. Стариков О. Метод ФАПЧ и принципы синтезирования высокочастотных сигналов // Chip News. Инженерная микроэлектроника. 2001. №6.
2. 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 – опубли. 20.12.03 в Бюл. № 35.
3. 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.
4. Сафарьян О.А. Моделирование процесса стабилизации частоты генераторов в инфокоммуникационных системах // Вестник ДГТУ, 2016, Т. 16, № 4 (87), Ч. 2. С. 150-154.

5. 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 (Emerald Group Publishing Ltd), 2017. Vol.34. No.8 (2). P. 2586 – 2594.

6. Никитин Л.Н. Испытания и диагностика телевизионных систем: испытания радиоэлектронной аппаратуры: учеб пособие / Л.Н. Никитин. Воронеж: ГОУ ВПО «Воронежский государственный технический университет», 2009.

Для цитирования:

Д. Д. Габриэлян, О. А. Сафарьян. Проявление свойства эмерджентности в системе независимо функционирующих генераторов при использовании метода статистической стабилизации частоты. Журнал радиоэлектроники [электронный журнал]. 2019. № 8. Режим доступа: <http://jre.cplire.ru/jre/aug19/2/text.pdf>
DOI 10.30898/1684-1719.2019.8.2