



<http://dx.doi.org/10.35596/1729-7648-2022-20-5-15-20>

*Оригинальная статья*  
*Original paper*

УДК 681.51.0.33

## ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ОПРЕДЕЛЕНИЕ МИНИМАЛЬНЫХ ФЛУКТУАЦИЙ ЧАСТОТЫ НА ВЫХОДЕ СИНХРОНИЗИРОВАННОГО ГЕНЕРАТОРА

С.М. ГОРОШКО, В.В. ПОЛЗУНОВ

*Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники  
(г. Минск, Республика Беларусь)*

*Поступила в редакцию 17 января 2021*

© Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники, 2022

**Аннотация.** Явление синхронизации используется во многих областях науки и техники и особенно в радиотехнике. С помощью синхронизации, например, можно решать задачу стабилизации частоты мощных автогенераторов. В работе экспериментально показано, что флуктуации частоты на выходе синхронизированного генератора непрерывного режима не всегда соответствуют флуктуациям частоты синхронизирующего колебания даже в середине полосы синхронизации. Минимально возможные флуктуации частоты на выходе синхронизированного генератора определяются флуктуациями разности фаз в синхронизируемом автогенераторе, которые, в свою очередь, зависят как от внутренних причин, связанных со сложными процессами, протекающими внутри прибора, так и от внешних причин, связанных с пульсациями питающих напряжений, механическими воздействиями и параметрами синхронизирующего колебания.

**Ключевые слова:** синхронизируемый автогенератор, синхронизирующий генератор, флуктуации частоты, флуктуации фазы, флуктуации разности фаз.

**Конфликт интересов.** Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

**Для цитирования.** Горошко С.М., Ползунов В.В. Экспериментальное определение минимальных флуктуаций частоты на выходе синхронизированного генератора. Доклады БГУИР. 2022; 20(5): 15-20.

## EXPERIMENTAL DETERMINATION OF THE MINIMUM FREQUENCY FLUCTUATIONS AT THE SYNCHRONIZED GENERATOR OUTPUT

SERGEY M. GOROSHKO, VLADIMIR V. POLZUNOV

*Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics (Minsk, Republic of Belarus)*

*Submitted 17 January 2022*

© Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics, 2022

**Abstract.** The phenomenon of synchronization is used in many fields of science and technology, and especially in radio engineering. With the help of synchronization, for example, it is possible to solve the problem

of stabilizing the frequency of powerful self-oscillators. The paper experimentally shows that frequency fluctuations at the output of a synchronized continuous mode generator do not always correspond to frequency fluctuations of the synchronizing oscillation even in the middle of the synchronization band. The minimum possible frequency fluctuations at the output of a synchronized oscillator are determined by fluctuations in the phase difference in a synchronized oscillator. The latter, in turn, depend both on internal causes associated with complex processes occurring inside the device, and on external causes associated with pulsations of supply voltages, mechanical influences and parameters of synchronizing oscillations.

**Keywords:** synchronized oscillator, synchronized generator, frequency fluctuations, phase fluctuations, phase difference fluctuations.

**Conflict of interests.** The authors declare no conflict of interests.

**For citation.** Goroshcko S.M., Polzunov V.V. Experimental Determination of the Minimum Frequency Fluctuations at the Synchronized Generator Output. Doklady BGUIR. 2022; 20(5): 15-20.

## Введение

Уровень шума выходного сигнала передатчика и флуктуации фазы в усилителе мощности являются одними из основных характеристик, определяющих технический потенциал радиоэлектронных систем. Существует множество факторов, приводящих к флуктуациям параметров сигнала на выходе электронного прибора. В настоящее время теория не всегда позволяет вычислить спектр выходного сигнала, поэтому при исследовании шумовых характеристик электронных приборов большое значение придается экспериментальным исследованиям.

Синхронизация автогенераторов внешним более стабильным, но менее мощным сигналом, позволяет уменьшить флуктуации частоты на выходе синхронизированного генератора [1–3]. Однако при этом возникает задача определения предельных возможностей уменьшения флуктуаций частоты за счет внешнего воздействия.

Целью данной работы являлось определение максимально возможного повышения стабильности частоты на выходе синхронизированного генератора при синхронизации его внешним сигналом.

## Результаты экспериментов

Задачей данной работы являлось экспериментальное определение минимально возможных флуктуаций частоты на выходе синхронизированного автогенератора, работающего в непрерывном режиме, а также определение причин, влияющих на минимальный уровень, который не всегда соответствует флуктуациям синхронизирующего колебания.

В качестве синхронизируемого автогенератора использовался магнетрон непрерывного режима типа М-857. Выбор в качестве объекта исследования магнетрона М-857 определялся двумя причинами. Первая – это достаточный уровень выходного сигнала, позволяющий проводить качественные измерения флуктуаций частоты, вторая – наличие у магнетрона второго реактивного высокочастотного вывода, позволяющего точно подстраивать частоту автогенератора под частоту синхронизирующего колебания. Питание магнетрона осуществлялось двумя способами (вариантами):

- от универсального стабилизированного источника питания;
- от источника питания с повышенными на 40 дБ флуктуациями напряжения, имеющими случайный характер.

Для удобства сравнения флуктуаций частоты на выходе синхронизированного генератора с флуктуациями разности фаз в синхронизируемом генераторе спектральная плотность флуктуаций частоты пересчитывалась в спектральную плотность флуктуаций фазы по формуле

$$W_{\varphi}(F_a) = \frac{W_f(F_a), \Gamma_{\text{Ц}}^2}{F_a^2, \Gamma_{\text{Ц}}}, \quad (1)$$

где  $F_a$  – частота анализа.

Структурная схема экспериментальной установки показана на рис. 1. В качестве задающего генератора (ЗГ) для исследуемого магнетрона использовался однотипный генератор с дополнительными фильтрами по цепям питания и специальными мерами по стабилизации частоты.

Использование однотипного генератора позволяло изменять в широких пределах входную мощность и кроме того изменять частоту синхронизирующего колебания в пределах 1,5 % относительно частоты синхронизируемого генератора практически без изменения выходной мощности входного сигнала.

Измерение флуктуаций частоты как выходного сигнала синхронизированного генератора, так и задающего генератора осуществлялось измерителем флуктуаций, подключаемым через волноводный переключатель либо к входному, либо к выходному тракту синхронизируемого генератора [4].

Для измерения флуктуаций разности фаз в синхронизируемом генераторе в установку включен фазовый детектор. Сигнал с выхода фазового детектора подавался на низкочастотный анализатор спектра типа СК4-13 при измерении разности фаз.

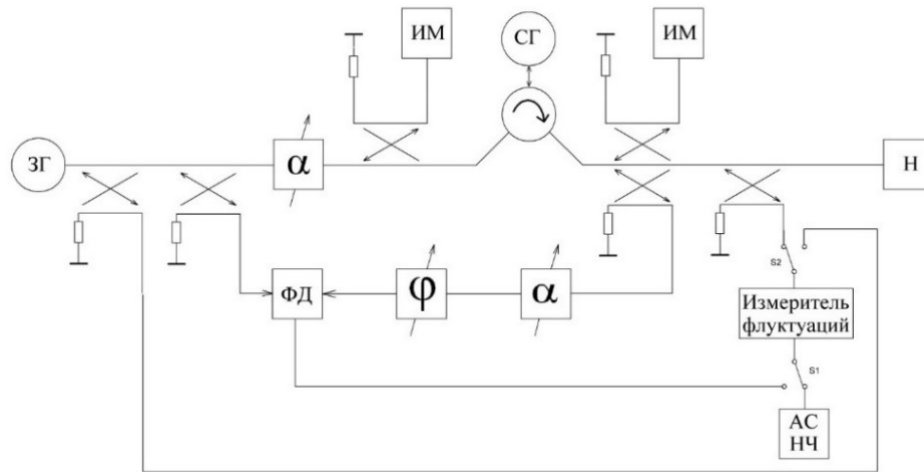


Рис. 1. Структурная схема экспериментальной установки  
Fig. 1. Block diagram of the experimental installation

Экспериментальные зависимости спектральной плотности флуктуаций частоты (фазы) на выходе автономного и синхронизированного генераторов при различных вариантах питания синхронизируемого магнетрона приведены на рис. 2.

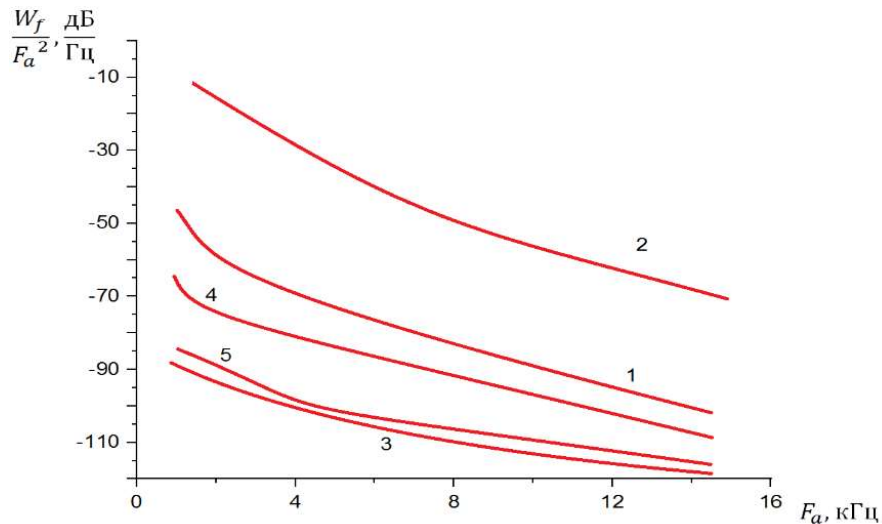
Из анализа приведенных зависимостей можно сделать следующие выводы:

– флуктуации частоты (фазы) автономного генератора при втором варианте питания (кривая 2, рис. 2) на 40 дБ выше, чем у автогенератора при первом варианте питания (кривая 1, рис. 2),

– флуктуации частоты (фазы) синхронизирующего генератора (кривая 5, рис. 2) на 40 дБ ниже, чем у синхронизируемого генератора при первом варианте питания, и составляют  $-90$  дБ/Гц на частоте анализа  $2$  кГц ( $4 \cdot 10^{(-3)} \text{ Гц}^2 / \text{Гц}$ );

– флуктуации частоты (фазы) синхронизированного генератора при первом варианте питания соответствуют флуктуациям частоты задающего генератора в исследуемом диапазоне (кривые 3 и 5, рис. 2), а при втором варианте питания они превышают флуктуации частоты задающего генератора, хотя их уровень ниже уровня флуктуаций частоты автономного генератора (кривые 2 и 4, рис. 2).

Таким образом, видно, что флуктуации частоты на выходе синхронизированного генератора определяются не только флуктуациями частоты синхронизирующего сигнала, но также зависят от флуктуаций частоты в автономном режиме [5].

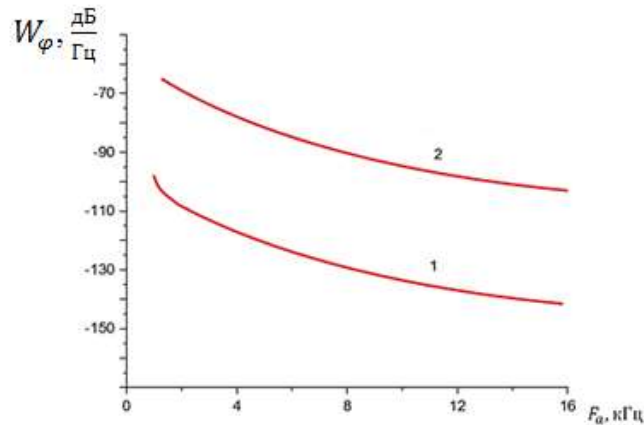


**Рис. 2.** Спектральные плотности флуктуаций частоты на выходе автономного и синхронизируемого генераторов: 1 – автономный генератор при первом варианте питания; 2 – автономный генератор при втором варианте питания; 3 – синхронизированный генератор при первом варианте питания; 4 – синхронизированный генератор при втором варианте питания; 5 – синхронизирующий (задающий) генератор

**Fig. 2.** Spectral densities of frequency fluctuations at the output of autonomous and synchronized generators: 1 – autonomous generator with the first power supply option; 2 – autonomous generator with the second power supply option; 3 – synchronized generator with the first power supply option; 4 – synchronized generator with the second power supply option; 5 – synchronizing (master) generator

Для определения минимально возможных флуктуаций частоты на выходе синхронизированного генератора были произведены измерения флуктуаций разности фаз в синхронизируемом генераторе при различных вариантах питания [6]. Уровень синхронизирующего сигнала был на 15 дБ ниже уровня мощности автономного генератора, а частота синхронизирующего сигнала равнялась частоте автономного генератора.

Зависимости спектральной плотности флуктуаций разности фаз в синхронизированном генераторе при различных вариантах питания показаны на рис. 3.



**Рис. 3.** Спектральные плотности флуктуаций разности фаз в синхронизированном генераторе: 1 – первый вариант питания; 2 – второй вариант питания

**Fig. 3.** Spectral densities of fluctuations of the phase difference in a synchronized generator: 1 – the first power option; 2 – the second power option

Из приведенных зависимостей видно, что при первом варианте питания флуктуации разности фаз в исследуемом частотном диапазоне ниже примерно на 40 дБ относительно флуктуаций разности фаз при втором варианте питания.

Сравнивая уровни флуктуаций частоты (фазы) на выходе синхронизированного генератора (рис. 2) с уровнем флуктуаций разности фаз в синхронизированном генераторе (рис. 3), можно отметить, что:

– при первом варианте питания флуктуации частоты на выходе синхронизированного генератора соответствуют флуктуациям частоты задающего генератора и значительно превышают флуктуации разности фаз в синхронизируемом генераторе (кривая 3, рис. 2 и кривая 1, рис. 3);

– при втором варианте питания флуктуации частоты (кривая 4, рис. 2) соответствуют флуктуациям разности фаз в синхронизированном генераторе (кривая 2, рис. 3) и превышают флуктуации частоты задающего генератора.

Из анализа приведенных зависимостей можно сделать вывод о том, что флуктуации частоты на выходе синхронизируемого генератора не всегда соответствуют флуктуациям частоты внешнего колебания. Уменьшение флуктуаций частоты на выходе синхронизированного генератора до уровня флуктуаций частоты задающего генератора возможно, если флуктуации разности фаз в синхронизируемом генераторе ниже флуктуаций частоты задающего генератора.

### Заключение

Таким образом, в работе экспериментально показано, что флуктуации разности фаз в синхронизированном генераторе определяют минимальный уровень флуктуаций частоты на его выходе при синхронизации внешним более стабильным сигналом. Для того чтобы флуктуации частоты на выходе синхронизированного генератора соответствовали флуктуациям частоты внешнего колебания, необходимо, чтобы флуктуации разности фаз в синхронизируемом генераторе были бы меньше флуктуаций задающего генератора. В противном случае флуктуации частоты на выходе синхронизированного генератора будут определяться флуктуациями разности фаз в синхронизированном генераторе и превышать флуктуации частоты синхронизирующего колебания. В свою очередь, флуктуации разности фаз зависят как от внутренних причин, связанных со сложными физическими процессами, протекающими внутри прибора, так и от внешних причин, связанных с пульсациями питающих напряжений, механическими воздействиями и параметрами синхронизирующего колебания. Для стабилизации фазового набега в синхронизированном генераторе возможно применение как схем автоматической подстройки фазы, так и схем, использующих различные компенсационные методы.

### Список литературы

1. Гоноровский И.С. *Радиотехнические цепи и сигналы*. М.: «Радио и связь», 4-е изд. 2006.
2. Хотунцев Ю.Л., Тамарчак Д.Я. *Синхронизированные генераторы и автодины на полупроводниковых приборах*. М.: Радио и связь; 1982.
3. Пиковский А., Розенблюм М., Куртс Ю. *Синхронизация: фундаментальное нелинейное явление*. М.: Техносфера; 2003.
4. Рен У. Синхронизация связанных гармонических генераторов с локальным взаимодействием. *Автоматика*. 2008;44(12):3195-3200.
5. Parks P.C., Hahn V. *Stability Theory*. Qrentice-Hall, NY, USA; 1993.
6. Емельянов В.В., Емельянова Ю.П. Взаимная синхронизация двух связанных генераторов с запаздыванием. *Изв. вузов «ПНД»*. 2013;21(3):52-60.

### References

1. Gonorovsky I.S. [*Radio engineering circuits and signals*]. M.; “Radio i Svyaz”, 4-e izd. 2006. (In Russ.)
2. Khotuntsev Yu.L., Tamarchak D.Ya. [*Synchronized generators and autodyne on semiconductor devices*]. M.: Radio and communications; 1982. (In Russ.)
3. Pikovskiy A., Rosenblum M., Kurts Yu. [*Synchronization: a fundamental non-linear phenomenon*]. M.: Technosfera; 2003. (In Russ.)
4. Ren W. [Synchronization of coupled harmonic oscillators with local interaction]. *Automatica*. 2008;44(12): 3195-3200. (In Russ.)
5. Parks P.C., Hahn V. *Stability Theory*. Qrentice-Hall, NY, USA; 1993.
6. Emelyanov V.V., Emelyanova Yu.P. [Mutual synchronization of two coupled generators with delay]. *Izv. universities “PND”*. 2013;21(3):52-60 (In Russ.)

### Вклад авторов

Ползунов В.В. осуществил постановку задачи для проведения исследования, подготовил рукопись статьи.

Горошко С.М. выполнил изготовление образцов и построение графиков, провел экспериментальные исследования.

### Authors' contribution

Polzunov V.V. carried out the formulation of the problem for the study, prepared the manuscript of the article.

Goroshko S.M. performed the production of samples and construction of graphs, conducted experimental studies.

### Сведения об авторах

**Горошко С.М.**, инженер-электроник кафедры информационных радиотехнологий Белорусского государственного университета информатики и радиоэлектроники.

**Ползунов В.В.**, к.т.н., доцент кафедры информационных радиотехнологий Белорусского государственного университета информатики и радиоэлектроники.

### Information about the authors

**Goroshcko S.M.**, Engineer at the Information Radiotechnologies Department of the Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics.

**Polzunov V.V.**, Cand. of Sci., Associate Professor at the Information Radiotechnologies Department of the Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics.

### Адрес для корреспонденции

220013, Республика Беларусь,  
г. Минск, ул. П. Бровки, 6,  
Белорусский государственный университет  
информатики и радиоэлектроники;  
тел. +375-29-377-38-74;  
e-mail: polzunov@gmail.com  
Ползунов Владимир Васильевич

### Address for correspondence

220013, Republic of Belarus,  
Minsk, P. Brovka St., 6,  
Belarusian State University  
of Informatics and Radioelectronics;  
tel. +375-29-377-38-74;  
e-mail: polzunov@gmail.com  
Polzunov Vladimir Vasil'evich