



<http://dx.doi.org/10.35596/1729-7648-2020-18-5-9-16>

Оригинальная статья  
Original paper

УДК: 621.376.42:621.

## АНАЛИЗ ШУМОВЫХ ХАРАКТЕРИСТИК ДИОДНОГО ГЕНЕРАТОРА В МНОГОКОНТУРНОЙ СИСТЕМЕ

БЕЛЬСКИЙ А.Я., САЦУК С.М., ПУТИЛИН В.Н.

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

*Поступила в редакцию 11 марта 2019*

© Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники, 2020

**Аннотация.** В современной СВЧ электронике крайне актуальна оценка возможности эффективной генерации высокостабильных мод колебаний и создания малошумящих генераторов миллиметрового диапазона длин волн. Цель исследований заключалась в определении типа волны для наиболее эффективных мод колебаний и обеспечения работы различных мод в режиме взаимной синхронизации, которая становится возможной, поскольку в реальные конструкции генераторов могут входить ряд реактивных элементов, которые в диапазоне СВЧ формируют ряд резонансных частот. В данной работе показывается, как можно обеспечить условия генерации на той или иной частоте и одновременно получить высокую стабильность колебаний.

Основными методами исследований являлись: анализ и обобщение литературных данных и результатов собственных исследований особенностей генерирования колебаний в многоконтурной системе генератора на диоде Ганна и условий, при которых устанавливается высокая стабильность частоты; экспериментальные исследования с использованием СВЧ анализаторов спектра, микроволновых устройств. В работе рассчитаны возможные частоты генерации, проведены исследования режимов работы диодного генератора и экспериментально измерены их фазовые шумы. Показано, что при приближении частоты генерации к частоте отсечки волновода с помощью подстроечных элементов конструкции или изменением напряжения питания возникает режим взаимной синхронизации колебаний на высоких гармониках с использованием типа волны  $H_{102}$  в очень узком диапазоне частотных (фазовых) шумов.

Экспериментально исследован генератор с многоконтурной резонансной системой и получена небольшая величина фазовых шумов для обоих типов волн  $H_{101}$  и  $H_{102}$ . При этом наилучшие параметры и шумовые характеристики имели место на наиболее низких типах видов колебаний. Данные результаты обладают экспериментальной новизной, что позволяет надеяться на разработку конструктивных решений, обеспечивающих создание высокостабильных малошумящих генераторов миллиметрового диапазона длин волн с минимальными массогабаритными параметрами.

**Ключевые слова:** многоконтурные системы, генерирование колебаний, режим работы, тип волны, стабильность частоты, шумовые свойства, синхронизация гармоник, резонансные частоты.

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

**Для цитирования.** Бельский А.Я., Сацук С.М., Путилин В.Н. Анализ шумовых характеристик диодного генератора в многоконтурной системе. Доклады БГУИР. 2020; 18(5): 9-16.

## ANALYSIS OF NOISE CHARACTERISTICS OF A DIODE GENERATOR IN A MULTI-CIRCUIT SYSTEM

ALIAKSEI Y. BELSKI, SIARHEI M. SATSYK, ULADZIMIR N. PUTILIN

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

*Submitted 11 March 2019*

© Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics, 2020

**Abstract.** In modern microwave electronics, it is extremely important to evaluate the possibility of efficient generation of highly stable oscillation modes and the creation of low-noise generators with a millimeter wavelength range. The purpose of the research was to determine the type of wave for the most effective modes of oscillation and to ensure the operation of various modes in the mode of mutual synchronization, which becomes possible because the real design of generators can include a number of reactive elements that form a number of resonant frequencies in the microwave range. This paper shows how it is possible to provide conditions for generation at a particular frequency and simultaneously obtain high stability of vibrations.

The main research methods were: analysis and generalization of literature data and results of our own research on the peculiarities of oscillation generation in a multi-circuit system of a Gunn diode generator and conditions under which high frequency stability is established; experimental studies using microwave spectrum analyzers, microwave devices. In this paper, the possible generation frequencies are calculated, the operation modes of the diode generator are studied, and their phase noise is experimentally measured. It is shown that when the generation frequency approaches the cut-off frequency of the waveguide with the help of structural elements or by changing the supply voltage, a mode of mutual synchronization of vibrations at high harmonics occurs using the  $H_{102}$  wave type in a very narrow range of frequency (phase) noise. A generator with a multi-circuit resonant system was experimentally studied and a small amount of phase noise was obtained for both types of  $H_{101}$  and  $H_{102}$  waves. At the same time, the best parameters and noise characteristics occurred at the lowest types of vibration types.

These results have an experimental novelty, which allows us to hope for the development of constructive solutions that provide the creation of highly stable low-noise generators of millimeter wavelength range with the minimum mass dimensional parameters.

**Keywords:** multi-circuit systems, oscillation generation, operation mode, wave type, frequency stability, noise properties, harmonic synchronization, resonance frequencies.

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

**For citation.** Belski A.Y., Satsyk S.M., Putilin V.N. Analysis of noise characteristics of a diode generator in a multi-circuit system. Doklady BGUIR. 2020; 18(5): 9-16.

### Введение

Современное направление развития генераторов на диодах Ганна (ГДГ) связано с освоением высокочастотной части (выше 100 ГГц) миллиметрового диапазона длин волн и, соответственно, разработкой и внедрением в устройства более высокочастотных диодов Ганна на основе новых материалов группы АІІІВV: InP, GaN, SiC и др. Современные ГДГ традиционно используются как гетеродины приемопередающих модулей в верхней области СВЧ- и КВЧ-каналов передачи данных в радиорелейных линиях, а также автодинные и гомодинные модули систем ближней радиолокации с низким уровнем фазовых шумов  $-100...-110$  дБ/Гц при отстройках от несущей на 10–100 кГц.

Одно из направлений исследований и практического внедрения состоит в разработке многоконтурных конструкций диодов Ганна миллиметрового диапазона длин волн с низким уровнем шума, повышенной выходной мощностью и КПД.

При анализе работы генераторных устройств в большинстве случаев считается, что генерация возможна только на одной частоте, несмотря на то, что в эквивалентную его схему

могут входить ряд реактивных элементов, а в диапазоне СВЧ эти элементы создают много резонансных частот. В данной работе показывается, как можно обеспечить условия генерации на той или иной частоте и одновременно получить высокую стабильность колебаний.

Цель исследований состоит в выборе типа волны для наиболее эффективных мод колебаний и обеспечении работы различных мод в режиме взаимной синхронизации, которая происходит в очень узком диапазоне частотных (фазовых) шумов, что позволяет надеяться на разработку конструктивных решений, обеспечивающих создание высокостабильных малозумящих ГДГ миллиметрового диапазона длин волн с минимальными массогабаритными параметрами.

### Теоретический анализ

Простейший генератор может представлять собой отрезок короткозамкнутого прямоугольного волновода, внутри которого установлен диод, вольт-амперная характеристика которого имеет участок с отрицательным дифференциальным сопротивлением. Его модернизированная по сравнению с указанной в [1] эквивалентная схема представлена на рис. 1. На этой эквивалентной схеме:  $G_d$  и  $B_d$  – активная и реактивная проводимости диода,  $L_d$  – индуктивность выводов диода,  $C_{\Pi}$  – конструктивная емкость корпуса диода,  $L_{\Pi}$  – индуктивность токоподводящего стержня,  $B_s$  и  $G_s$  – реактивная и активная проводимости согласованного волновода.

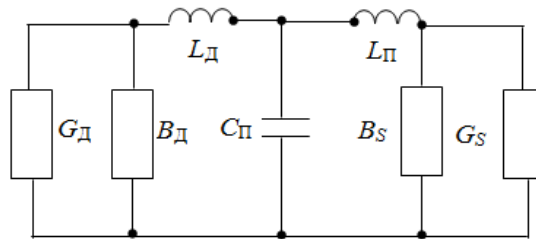


Рис. 1. Эквивалентная схема замещения генератора  
Fig. 1. Equivalent generator replacement scheme

Частота генерации на основном типе колебаний волны  $H_{101}$  может быть найдена через габаритные размеры волновода следующим образом:

$$f_{01} = c \sqrt{\frac{1}{l_{01}^2} + \frac{1}{4a^2}}, \quad (1)$$

где  $l_{01}$  – эквивалентная длина резонатора, близкая к длине волны в волноводе  $\lambda_B$ ;  
 $a$  – ширина волновода;  
 $c$  – скорость света.

Как известно, одним из условий генерации является баланс амплитуд

$$G_d + G_s = 0. \quad (2)$$

В последнем уравнении

$$G_s = G_0 \sqrt{1 - \frac{f_k^2}{f_0^2}}, \quad (3)$$

где  $G_0 = a/240\pi b$ ,  $b$  – высота волновода;  
 $f_k$  – критическая частота волновода.

Баланс фаз определяется следующим выражением:

$$B_d + B_s \operatorname{ctg} \beta l = 0, \quad (4)$$

где  $B_d$  – реактивная составляющая проводимости диода;

$\beta=2\pi l/\lambda_{\text{в}}$  – постоянная распространения;

$l$  – длина волноводного резонатора.

При перестройке частоты коротко замыкающим поршнем изменяются условия выполнения не только баланса фаз, но и амплитуд, поэтому требуется одновременное изменение величины напряжения питания, что не всегда возможно. Как показывают исследования, при неизменной величине уровня напряжения источника питания нарушается баланс амплитуд и происходит перескок на другую частоту. Такой перескок происходит чаще всего при приближении частоты генерации к частоте отсечки волновода, так как проводимость  $G_s$ , согласно (3), стремится к нулю, и выполнение баланса амплитуд становится невозможным. Новая частота генерации, как показывают расчеты и эксперименты, соответствует типу колебаний  $H_{102}$  короткозамкнутого отрезка волновода и поэтому является более высокой и соответствует большей величине проводимости  $G_s$ . При этом частоту генерации можно рассчитать, используя следующее выражение:

$$f_{02} = \sqrt{(2c/l_{02})^2 + f_k^2}, \quad (5)$$

где  $c$  – скорость света;

$l_{02}$  – длина волноводного резонатора, соответствующая частоте генерации  $f_{02}$ .

Однако если с помощью подстроечных элементов конструкции или изменением напряжения питания совместить генерируемую частоту с частотой настройки, определяемой не по типу волны  $H_{101}$ , а по типу волны  $H_{102}$ , таким образом, что выполняется условие

$$nf_{01} = kf_{02}, \quad (6)$$

то можно, согласно [4], осуществить взаимную синхронизацию обоих сигналов на гармониках. В последнем уравнении  $n$  и  $k$  – целые числа, показывающие номер гармоники. Например, если  $n = 10$ , а  $k = 9$ , то взаимная синхронизация может произойти на частоте 90 ГГц; если  $f_{01} = 9,0$ , а  $f_{02} = 10,0$  ГГц, т. е. на десятой и девятой гармониках соответственно.

## Экспериментальные исследования

Исследования проводились в сантиметровом диапазоне длин волн. В генераторную волноводную секцию устанавливались серийные диоды Ганна. Частота генерируемых колебаний, спектр и фазовые шумы наблюдались с помощью анализатора спектра (рис. 2).

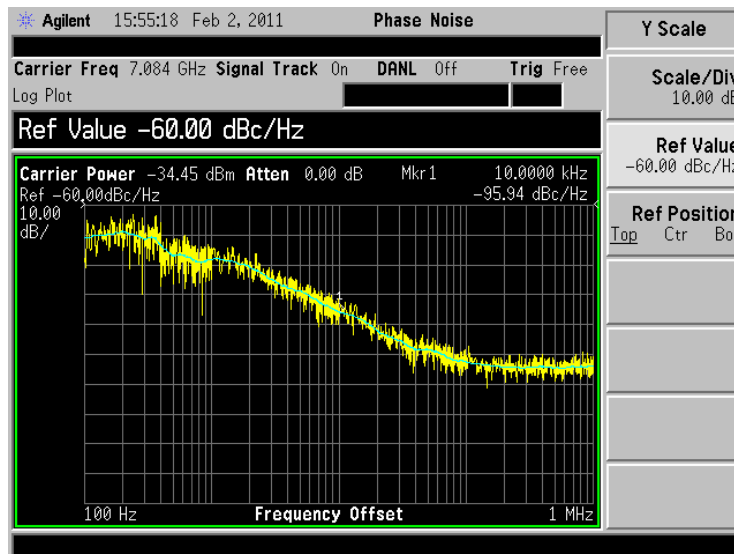


Рис. 2. Фазовые шумы генератора на частоте  $f_{01}$   
Fig. 2. Phase noise of the generator at the frequency  $f_{01}$

Наибольший интерес представляли уровни и спектры фазовых шумов, измеренные для двух случаев: для частоты вблизи частоты отсечки волновода ( $f_i/f_{01} = 0,90-0,99$ ) [2, 3] (рис. 2)

и после перескока на более высокую частоту ( $f_k/f_{02} = 0,80-0,88$ ) и подстройки на синхронизируемую гармонику (рис. 3). Видно, что спектры фазовых шумов на небольшом расстоянии от несущей (сотни герц – килоггерцы) отличаются незначительно, а при десятках – сотнях и более их уровень возрастает, что характерно для синхронизируемых генераторов [5, 6]. Взаимная синхронизация происходила на 8-й и 7-й гармониках соответственно, т. е. на частоте около 56 ГГц. Так как в колебательную систему генератора входят такие реактивные элементы, как индуктивность выводов диода и токоподводящего стержня, а также паразитные емкости корпуса диода, то не всегда перескок частоты происходит на тип волны  $H_{102}$  и не соответствует выражению (6), т. е. генератор переходит в режим взаимной синхронизации контуров.

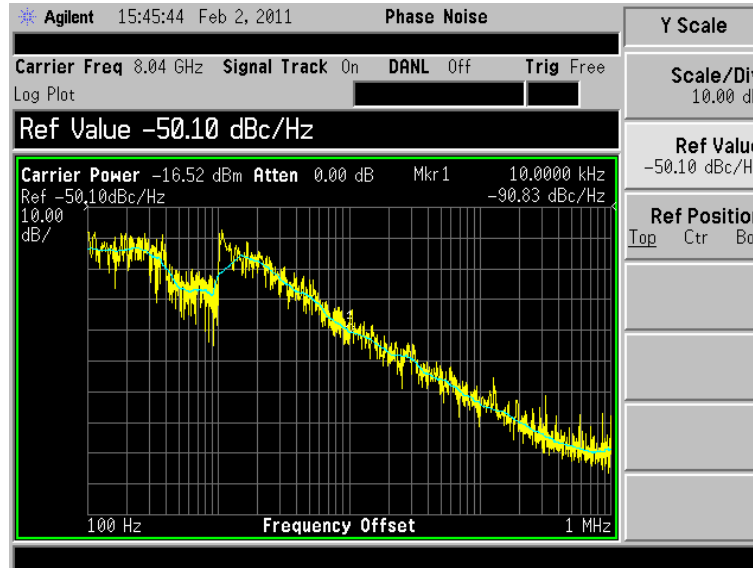


Рис. 3. Фазовые шумы генератора на частоте синхронизации  
Fig. 3. Phase noise of the generator at the synchronization frequency

В случае перескока частоты генерации на тип волны  $H_{102}$  имела место взаимная синхронизация в очень узком диапазоне частотных (фазовых) шумов (рис. 4, 5), так как взаимная синхронизация происходит на более высоких гармониках: примерно на 10-й и 9-й соответственно, т. е. на частоте около 92 ГГц. Частоты генерации соответствуют выражениям (1) и (5) соответственно.

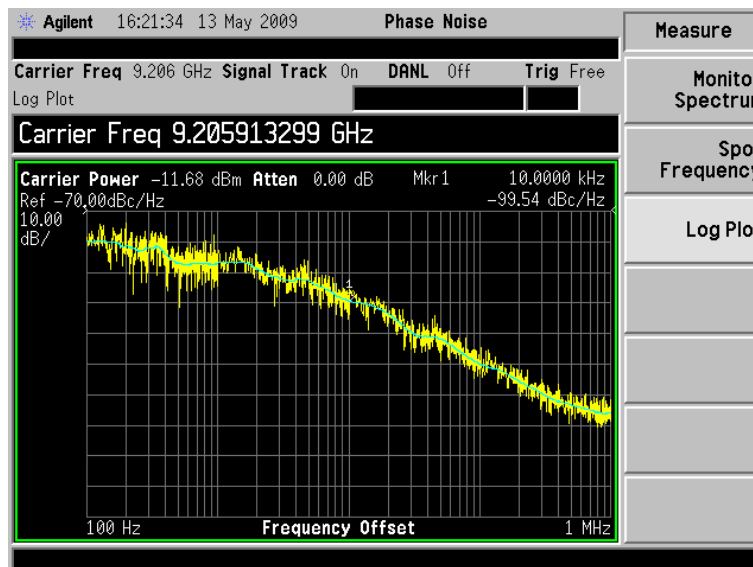
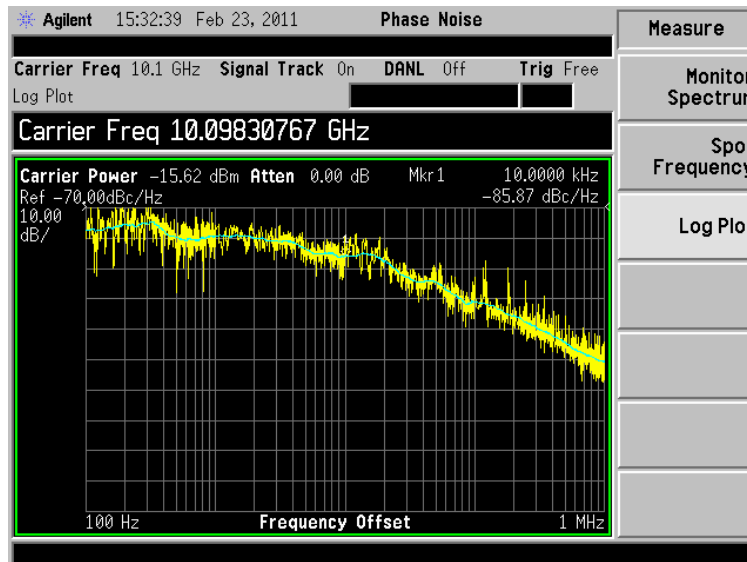
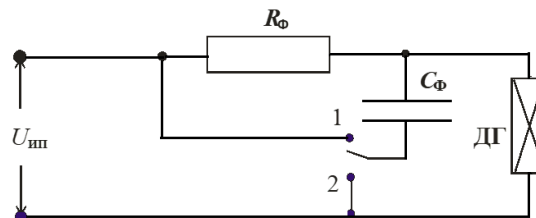


Рис. 4. Фазовые шумы генератора для типа волны  $H_{101}$   
Fig. 4. Phase noise of the generator for the  $H_{101}$ . wave type



**Рис. 5.** Фазовые шумы генератора для типа волны  $H_{102}$   
**Fig. 5.** Phase noise of the generator for the  $H_{102}$  wave type

Переход с частоты  $f_{01}$  на частоту  $f_{02}$  можно осуществить, используя цепочку  $R_{\Phi}C_{\Phi}$  (рис. 6).



**Рис. 6.** Схема переключения частот с  $f_{01}$  на  $f_{02}$   
**Fig. 6.** Frequency-switching circuit from  $f_{01}$  to  $f_{02}$

При нахождении переключателя в положении 1 и подаче напряжения, заранее установленного на источнике питания, форсирующая емкость дает скачок короткого импульса на диоде, что приводит к балансу амплитуд на частоте  $f_{01}$ . Если переключатель находится в положении 2, то  $R_{\Phi}C_{\Phi}$  цепочка работает как сглаживающий Г-образный фильтр в цепи питания диода и устанавливаются колебания на частоте  $f_{02}$ .

### Заключение

Исследованы режимы работы диодного генератора в случаях наличия нескольких видов резонансных частот в его колебательной системе. Показано, что наилучшие параметры и шумовые характеристики имели место на наиболее низких типах видов колебаний. Рассчитаны возможные частоты генерации и экспериментально измерены их фазовые шумы. Показана возможность взаимной синхронизации колебаний на высоких гармониках. При исследовании стандартного диода в режиме синхронизации высших гармоник получены уровни фазовых шумов, позволяющие получить практическое преимущество даже по сравнению с СВЧ транзисторами. При этом преимуществами применения ГДГ является также малый уровень амплитудных шумов (примерно минус 120 дБ), простота реализации конструкции генераторов в частотном диапазоне от 1 до 150 ГГц и высокая надежность (50–100 тыс. часов наработки на отказ).

Полученные в работе результаты исследований позволяют оптимизировать параметры генераторно-преобразовательных устройств в качестве генератора либо самогенерирующего смесителя (автодина) в таких востребованных применениях, как измерители скорости движущихся и вращающихся объектов, измерители параметров материалов, системы ближней радиолокации с низким уровнем фазовых шумов  $-100\dots-110$  дБ/Гц при отстройках от несущей на 10–100 кГц.

### Список литературы

1. Eisenhart R.L., Khan P.J. Some tuning characteristics and oscillation conditions of a waveguide – mounted transferred – electron diode oscillator. *IEEE Trans.* 1972; ED-19(9).
2. Муравьев В.В., Савельев В.Я., Бельский А.Я. Возможность значительного повышения стабильности частоты генераторов на диодах с отрицательным сопротивлением. *Известия ВУЗов СССР. Радиоэлектроника.* 1974;17(8):88-90.
3. Бельский А.Я., Дробот С.В., Зацепин Е.Н. Особенности расчета шумовых характеристик генераторов, стабилизированных дисперсионным резонатором. *Известия НАН Беларуси. Серия физико-технических наук.* 2011;3:107-110.
4. Уткин Г.М. *Автоколебательные системы и волновые усилители.* Москва: Сов. радио; 1978.
5. Бельский А.Я. Дробот С.В., Зацепин Е.Н. Некоторые особенности характеристик внешней синхронизации твердотельных генераторов. *Доклады БГУИР.* 2013;7(77):19-24.
6. Новоженин В.М. Исследование флюктуаций частоты генератора Ганна. *Известия ВУЗов СССР. Радиоэлектроника.* 1980;10:26-29.

### References

1. Eisenhart R.L., Khan P.J. Some tuning characteristics and oscillation conditions of a waveguide – mounted transferred – electron diode oscillator. *IEEE Trans.* 1972;19(9).
2. Muravev V.V., Savelyev V.Ya., Belsky A.Ya. [The possibility of a significant increase in the frequency stability of oscillators on diodes with a negative resistance]. *Izvestiya VUZov SSSR. Radioelektronika = Proceedings of the USSR Universities. Radio electronics.* 1974;17(8):88-90. (In Russ.)
3. Belski A.Ya., Drobot S.V., Zatsypin E.N. [Features of the calculation of the noise characteristics of oscillators stabilized by a dispersive resonator]. *Izvestiya NAN Belarusi. Seriya fiziko-tekhnicheskikh nauk = Proceedings of the NAS of Belarus. Physical-technical series.* 2011;3:107-110. (In Russ.)
4. Utkin G.M. [Auto-oscillatory systems and wave amplifiers]. Moscow: Sov. radio; 1978. (In Russ.)
5. Belski A.Ya., Drobot S.V., Zatsypin E.N. [Some features of the characteristics of external synchronization of solid-generators]. *Doklady BGUIR = Doklady BGUIR.* 2013;7(77):19-24. (In Russ.)
6. Novozhenin V.M. [The study of fluctuations in the frequency of the Gunn generator]. *Izvestiya VUZov SSSR. Radioelektronika = Proceedings of the USSR Universities. Radio electronics.* 1980;10:26-29. (In Russ.)

### Вклад авторов

Бельский А.Я. разработал методики исследований, принял участие в проведении исследований.

Сацук С.М. выполнил анализ и обобщение результатов.

Путилин В.Н. осуществил технический контроль и интерпретацию результатов исследований.

### Authors' contribution

Belski A.Ya. developed research techniques and participated in research.

Satsuk S.M. performed an analysis and synthesis of the results.

Putilin V.N. carried out technical control and interpretation of research results.

### Сведения об авторах

Бельский А.Я., к.т.н., доцент кафедры электроники Белорусского государственного университета информатики и радиоэлектроники.

Сацук С.М., к.т.н., доцент кафедры электроники Белорусского государственного университета информатики и радиоэлектроники.

Путилин В.Н., к.т.н., доцент кафедры электроники Белорусского государственного университета информатики и радиоэлектроники.

### Information about the authors

Belski A.Y., PhD, Associate Professor of the Electronics Department of the Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics.

Satsuk S.M., PhD, Associate Professor of the Electronics Department of the Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics.

Putilin V.N., PhD, Associate Professor of the Electronics 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. +375-17-293-86-10;  
e-mail: satsuk@bsuir.by  
Сацук Сергей Михайлович

**Address for correspondence**

220013, Republic of Belarus,  
Minsk, P. Brovki str., 6,  
Belarusian State University  
of Informatics and Radioelectronics  
tel. +375-17-293-86-10;  
e-mail: satsuk@bsuir.by  
Satsuk Sergei Michailovich