

УДК 621.389

**ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ  
ОПТИЧЕСКОГО ОТКЛИКА АКУСТООПТИЧЕСКОЙ  
ЯЧЕЙКИ НА ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНОСТЬ  
РАДИОИМПУЛЬСОВ С РАЗЛИЧНЫМ ПЕРИОДОМ  
ПОВТОРЕНИЯ**

**А. М. Бобрешов, И. С. Коровченко, А. В. Олейников,  
К. А. Прохоров, В. А. Степкин**

*Воронежский государственный университет*

Поступила в редакцию 23.04.2019 г.

**Аннотация.** Рассматривается вопрос измерения параметров радиоприёмника импульсных сигналов на основе акустооптической ячейки. Построены теоретические и экспериментальные кривые, позволяющие определить на этапе проектирования параметры радиоприёмника импульсных сигналов. Сделаны выводы относительно зависимости параметров радиоприёмного устройства импульсных сигналов от конфигурации системы и свойств исследуемого сигнала. Описаны границы применимости методов оценки параметров импульсных сигналов, а также описаны возможности учета погрешностей при анализе длительности импульса рассматриваемыми методами.

**Ключевые слова:** широкополосные сигналы, ШПС, дифракция Брэгга, акустооптическое взаимодействие, акустооптическая ячейка, приёмник.

**EXPERIMENTAL STUDY OF THE OPTICAL RESPONSE OF  
AN ACOUSTO-OPTICAL CELL TO A SEQUENCE OF RADIO  
PULSES WITH A DIFFERENT REPETITION PERIOD**

**A. M. Bobreshov, I. S. Korovchenko, A. V. Oleynikov,  
K. A. Prokhorov, V. A. Stepkin**

**Abstract.** The question of measuring parameters of a radio receiver of pulse signals based on an acousto-optic cell is considered. The theoretical and experimental curves were constructed, which allow to determine the parameters of the radio receiver of pulse signals at the design stage. Conclusions have been made regarding the dependence of the parameters of the receiving device of pulse signals on the system configuration and properties of the signal under study. The limits of applicability of the methods for estimating the parameters of pulsed signals are described, as well as the possibilities of taking into account errors when analyzing the pulse duration by the methods considered are described.

**Keywords:** broadband signals, PSS, Bragg diffraction, acousto-optic interaction, acousto-optic cell, receiver.

## ВВЕДЕНИЕ

Широкополосные сигналы (ШПС) находят все более широкое применение в современной радиоаппаратуре [1, 2]. Такие сигналы чаще всего являются импульсными, а полезная информация передается с использованием временной или амплитудной модуляции, а также различных видов манипуляций импульсными последовательностями. В работе [3] поднимается вопрос об использовании технических решений, альтернативных традиционным аналоговым или цифровым схемотехническим подходам. В частности, приводится обоснование использования устройств акустооптики при создании приемников ШПС, обладающих высокой скоростью демодуляции сигналов и малым количеством ошибок. В большей части описываемых в [3] методов приема ШПС предполагается использование последовательности импульсов с периодом повторения больше постоянной времени ячейки. В реальных условиях выполнение этого условия зависит от двух факторов: параметров сигнала и физических свойств материалов, из которых изготовлена акустооптическая ячейка. В работах [3, 4] проведен анализ влияния свойств материалов акустооптической ячейки на конечные технические характеристики приемников ШПС, а также предложена методика измерения этих свойств. Влияние же параметров сигналов на сегодняшний день изучено недостаточно. Среди видов модуляции импульсной последовательности можно выделить следующие: изменение периода повторения импульсов, манипуляция фазой прихода импульса, манипуляция длительностью импульсов. Последний метод, как наиболее сложный с точки зрения реализации приемного устройства ШПС, подробно рассмотрен в работе [3]. Однако границы применимости данного метода в [3] исследованы недостаточно. Также практический интерес представляет реализация приемного устройства с изменяющимся периодом следования импульсов.

Целью данной работы является экспериментальное исследование отклика радиоприемного устройства на основе акустооптической ячейки на последовательность радиоимпульсов с различным периодом повторения.

### 1. ОПИСАНИЕ ЭКСПЕРИМЕНТА

Описанное в [3] радиоприемное устройство работает по следующей схеме. После входного радиоприемного тракта (антенны и входного усилителя) ШПС подается на электроды пьезопреобразователя, непосредственно присоединенного к акустооптическому кристаллу. Сформированная посредством обратного пьезоэлектрического эффекта акустическая волна распространяется в акустооптическом кристалле и взаимодействует с лазерным излучением. Акустооптическое взаимодействие при этом можно охарактеризовать набором параметров: частотой акустических колебаний, поляризацией и направлением распространения оптического излучения. Изменение диэлектрической проницаемости, а следовательно, показателя преломления под действием механических напряжений и деформаций (акустических волн) в кристалле приводит к возникновению дифракции оптического излучения двух типов: Рамана-Ната (в интерференционной картине множество дифракционных максимумов) и Брэгга (в интерференционной картине только один боковой максимум). Радиоприемное устройство работает в режиме дифракции Брэгга, что обеспечивает возможность получения в выходной плоскости пространственно-распределенного оконного преобразования Фурье от входного сигнала [5]. Длительность окна равняется постоянной акустооптической ячейки и определяется из соотношения:

$$\tau = l/v,$$

где  $l$  — длина области взаимодействия,  $v$  — скорость акустической волны,  $\tau$  — постоянная ячейки.

Блок-схема измерительной установки представлена на рисунке 1. В качестве ШПС в экс-

перименте используется последовательность радиоимпульсов (РИ). На модулирующий вход векторного генератора 2, в котором устанавливается частота несущей РИ, подается сигнал с генератора импульсов 1, определяющий длительность РИ. Сформированная последовательность РИс векторного генератора 2 подается на образец 4. Параметры импульсной последовательности определяются по соответствующему ей пространственному спектру, находящемуся в прямой зависимости от углового распределения интенсивности излучения лазера 3. В качестве интегрирующей схемы, производящей пространственную свертку интенсивности, выступают собирающая линза и фотодиод ВРW24R, размещенный в ее фокальной плоскости. Следует отметить, что физические размеры линзы выбираются, исходя из дальности расположения экрана и минимальной длительности РИ. Это связано с тем, что при уменьшении длительности модулирующего импульса будет расширяться полоса сигнала, что приведет к перераспределению мощности последовательности РИ по спектру.

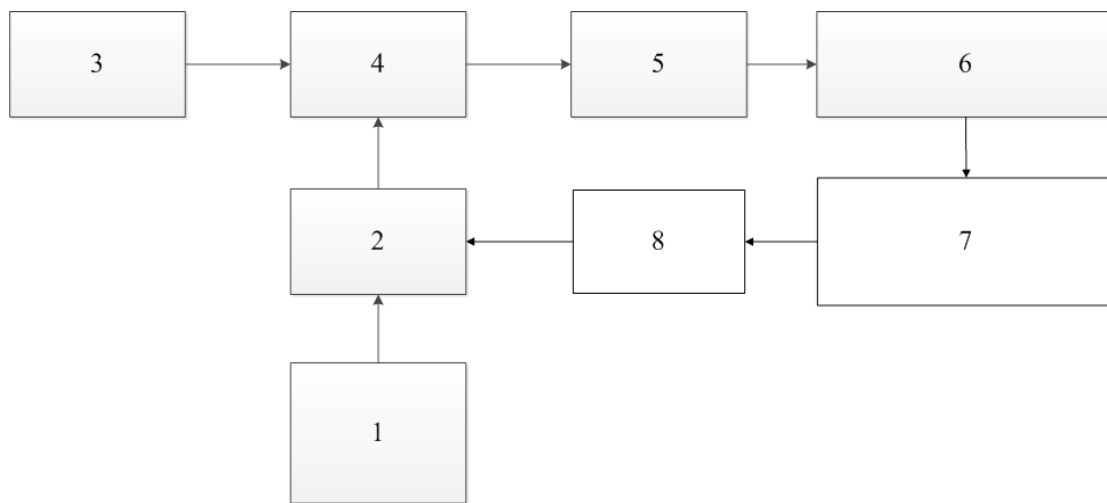


Рис. 1. Блок-схема установки для измерения акустического затухания: 1) генератор импульсов, 2) векторный генератор, 3) лазер, 4) акустооптическая ячейка, 5) линза, 6) регистрирующее устройство, 7) осциллограф, 8) автоматизированная система научных исследований.

На рисунке 2 представлена электрическая схема регистрирующего устройства. С увеличением пройденного акустической волной пути внутри акустооптического кристалла интенсивность оптического излучения лазера, падающего на фотодиод, увеличивается. Сигнал с фотодиода проходит через конденсатор  $C_1$ , затем усилитель и попадает на конденсатор  $C_5$ . Во время распространения одного или нескольких импульсов в среде интенсивность на диоде стабилизируется и в случае равномерного распределения интенсивности лазера ток через конденсатор  $C_1$  становится равным нулю. В противном случае, полученная нестабильность интенсивности изменяет напряжение на конденсаторе  $C_5$ . После того как акустическая волна полностью проходит через акустооптический кристалл, интенсивность на фотодиоде начинает падать и конденсатор  $C_5$  разряжается. Полученный сигнал усиливается операционным усилителем AD8055 и подается на вход осциллографа. Осциллограммы для различных сигналов сохраняются при помощи автоматизированной системы, выполненной на платформе PXI компании NationalInstruments и пакета LabView. Далее результаты измерений импортируются в среду Matlab, где в соответствии с разработанным алгоритмом производится сравнение полученных зависимостей отклика регистрирующего устройства с кривой разряда конденсатора.

На этом этапе определяются следующие параметры отклика:

- а) время релаксации, которое пропорционально длительности РИ;

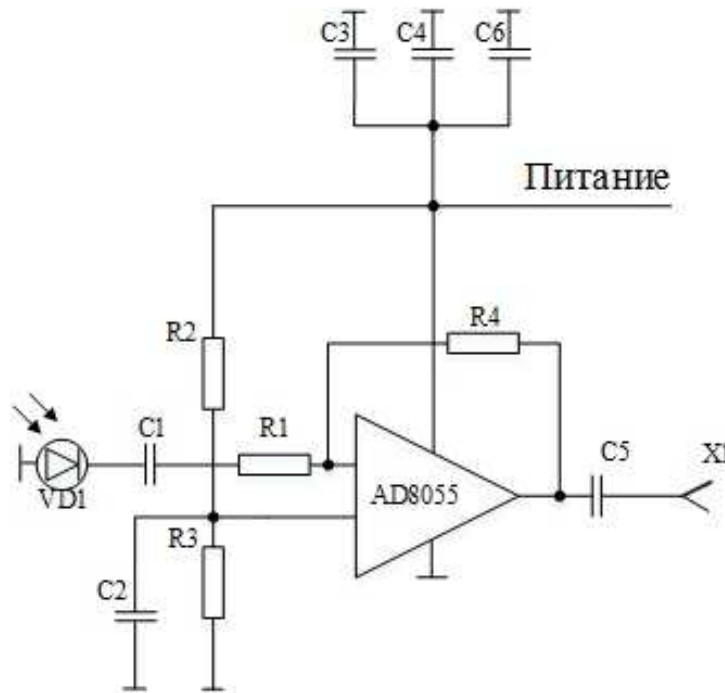


Рис. 2. Электрическая схема регистрирующего устройства.

- б) когерентность оптического излучения и пространственная структура лазерного пучка, которые связаны с формой сигнала в области максимума отклика;
- в) коэффициент затухания акустического сигнала в акустооптическом кристалле;

## 2. ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ ЭКСПЕРИМЕНТА

На рисунках 3 и 4 представлены типовые осциллограммы на выходе регистрирующего устройства для последовательностей РИ с различным периодом повторения  $T$ . В зависимости от соотношения  $T$  и  $\tau$  отклик системы представляет собой последовательность видеоимпульсов или одиночный видеоимпульс. В первом случае, когда период повторения больше постоянной ячейки, на выходе наблюдается одиночный видеоимпульс. Максимальное напряжение этого видеоимпульса  $V_{max}$  остается постоянным не зависит от значения  $T$  (рис. 3). Если период повторения РИ уменьшается, и выполняется условие  $\tau > T$ , на выходе регистрирующего устройства наблюдается последовательность видеоимпульсов (рис. 4). Среднее значение  $V_{max}$  по всем видеоимпульсам при этом меньше по сравнению с первым случаем. Данный факт обусловлен тем, что в кристалле постоянно присутствует акустическая волна, соответствующая РИ на входе пьезопреобразователя, что увеличивает средний фоновый уровень оптического излучения на фотодиоде и приводит к фильтрации большей части энергии

При анализе полной энергии оптического сигнала физические размеры линзы должны быть больше, чем размер дифракционного максимума в пространстве. В связи с данным ограничением и измеренными параметрами было принято решение использовать РИ с длительностью 100нс.

Согласно [5], зависимость максимальных значений напряжений видеоимпульсов ( $V_{max}$ ), полученных на выходе регистрирующего устройства, от изменения периода повторения РИ является нелинейной. На рисунке 5 данная зависимость получена как результат моделирования методом, описанным в [6]. Очевидно, что изменение частоты повторения приводит к изменению количества импульсов в среде. Следовательно, уменьшается и среднее значение

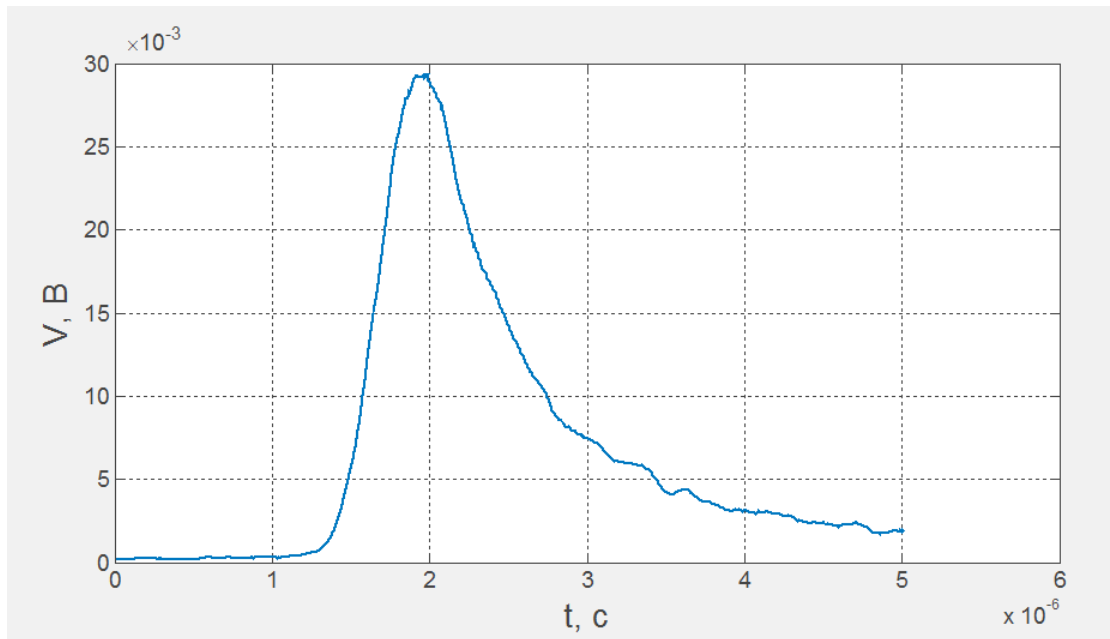


Рис. 3. Осциллограмма сигнала на выходе регистрирующего устройства при анализе последовательности РИ с длительностью 630нс и периодом повторения больше постоянной ячейки.

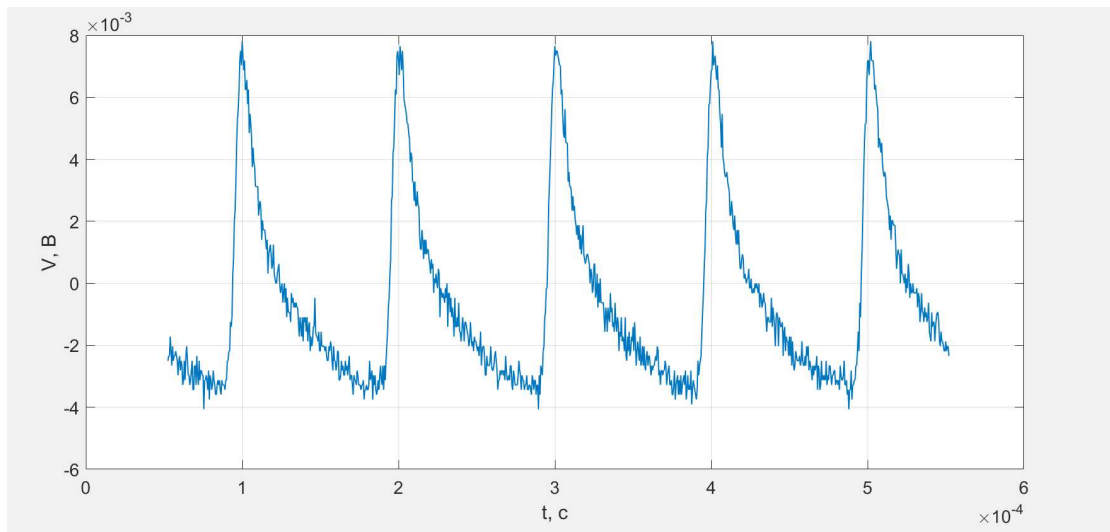


Рис. 4. Осциллограмма сигнала на выходе регистрирующего устройства при анализе последовательности РИ с длительностью 100нс и периодом повторения меньше постоянной ячейки.

$V_{max}$ , так как средний уровень интенсивности света на входе диода увеличивается, в связи с чем конденсатор начинает отфильтровывать всё больше и больше входной мощности. С увеличением частоты повторения радиоимпульсов среднее значение  $V_{max}$  уменьшается.

С помощью описанной выше экспериментальной установки была получена зависимость максимального отклика регистрирующего устройства от частоты повторения РИ. Видно хорошее соответствие результатам моделирования (сплошная линия) полученным экспериментальным результатам (пунктирная линия) изображённых на рис. 5. С помощью данных зависимостей, можно определить предельную частоту повторения РИ, при которой определение длительности импульса будет осуществляться с ошибкой.

Таким образом, на графиках зависимостей  $V_{max}(T)$  можно выделить три области. В первой области, период повторения импульса больше постоянной акустооптической ячейки  $\tau$ , максимальный отклик регистрирующего устройства не зависит от  $T$ , в связи с чем невозможно определить период повторения импульса, исходя из анализа интенсивности дифракционной картины. В то же время метод определения длительности РИ, изложенный в [3], дает наиболее точные результаты. Для акустооптической ячейки и сигналов, используемых в эксперименте, предельный период повторений РИ для данной области составляет 20 кГц.



Рис. 5. Зависимость  $V_{max}$  на выходе регистрирующего устройства от периода повторения последовательности РИ ( $T$ ).

Во второй области  $V_{max}$  напрямую зависит от соотношения периода повторения и длительности РИ (скважности). В этом случае становится возможным определить период повторения импульса на основе анализа дифракционной картины. В связи с тем, что отклик регистрирующего устройства начинает зависеть еще и от периода повторения импульса, при оценке длительности импульса требуется учитывать возникающие погрешности. Для этого требуется анализировать кроме выхода конденсатора  $C_5$  еще и средний уровень сигнала на его входе. Исходя из соотношения между  $V_{max}$  и полученным средним значением становится возможным учесть периодичность сигнала, которая в данной области квазилинейно зависит от этого соотношения.

При дальнейшем увеличении частоты повторения происходит переход в третью область, в которой зависимость  $V_{max}$  от времени представляет собой синус с частотой равной частоте повторения импульсов. В данном режиме работы невозможно определить длительность импульсов на основе дифракционной картины, однако, становится возможным выделить ча-

стоту повторения импульсного сигнала. В исследуемой системе точка перехода между этими режимами была обнаружена в районе 200-300 кГц.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Полученные результаты позволяют оценить границы применимости методов оценки параметров импульсных сигналов, а также дают возможность учесть погрешности при анализе длительности импульса на основе [3]. Кроме того, на основе теоретической модели становится возможным определить параметры приемных устройств импульсных сигналов. При этом показано, как зависят параметры и назначение приемного устройства от конфигурации системы и свойств исследуемого сигнала.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Лазоренко, О. В. Сверхширокополосные сигналы и физические процессы. Основные понятия, модели и методы описания / О. В. Лазоренко, Л. Ф. Черногор // Радиофизика и радиоастрономия. — 2008. — Т. 13. — С. 166–194.
2. Лазоренко, О. В. Сверхширокополосные сигналы и физические процессы. Методы анализа и применение / О. В. Лазоренко, Л. Ф. Черногор // Радиофизика и радиоастрономия. — 2008. — Т. 13. — С. 270–322.
3. Приемник импульсных сигналов на основе акустооптической ячейки / А. М. Бобрешов, И. С. Коровченко, А. В. Олейников, К. А. Прохоров // Радиотехника. — 2019. — № 3. — С. 58–62.
4. Бобрешов, А. М. Экспериментальное определение параметров акустооптических устройств / А. М. Бобрешов, И. С. Коровченко, А. В. Олейников // Труды 14 международной научно-технической конф. “Физика и технические приложения волновых процессов”. — 2017. — С. 121–122.
5. Балакший, В. И. Физические основы акустооптики / В. И. Балакший, В. Н. Парыгин, Л. И. Чирков. — М. : Радио и связь, 1985. — 278 с.
6. Широкополосная модель расчёта дифракционной картины изотропного акустооптического преобразователя / А. М. Бобрешов, И. С. Коровченко, А. В. Олейников, К. А. Прохоров // Труды XXIV международной научно-технической конф. “Радиолокация, навигация и связь”. — 2017. — С. 389–398.

## REFERENCES

1. Lazorenko O.V., Chernogor L.F. The Ultrawideband Signals and Physical Processes. Basic Concepts, Models and Description Methods. [Lazorenko O.V., Chernogor L.F. Sverxshirokopolosnye signaly i fizicheskie processy. Osnovnye ponyatiya, modeli i metody opisaniya]. *Radiofizika i radioastronomiya – Telecommunications and Radio Engineering*, 2008, vol. 13, pp. 166–194.
2. Lazorenko O.V., Chernogor L.F. The Ultrawideband Signals and Physical Processes. Analysis Methods and Application. [Lazorenko O.V., Chernogor L.F. Sverxshirokopolosnye signaly i fizicheskie processy. Metody analiza i primeneniye]. *Radiofizika i radioastronomiya – Telecommunications and Radio Engineering*, 2008, vol. 13, pp. 270–322.
3. Bobreshov A.M., Korovchenko I.S., Oleynikov A.V., Prokhorov K.A. Receiver of pulse signals based on an acousto-optic cell. [Bobreshov A.M., Korovchenko I.S., Oleyjnikov A.V., Proxorov K.A. Priemnik impul'snyx signalov na osnove akustoopticheskoyj yacheyjki]. *Radiotekhnika – Radioengineering*, 2019, № 3, pp. 58–62.
4. Bobreshov A.M., Korovchenko I.S., Oleynikov A.V. Experimental determination of the parameters of acousto-optic devices. [Bobreshov A.M., Korovchenko I.S., Oleyjnikov A.V. Eksperimental'noe opredelenie parametrov akustoopticheskix ustroyjstv]. Proceedings of the 14th international scientific and technical conference. "Physics and technical applications of wave

processes", 2017, pp. 121–122.

5. Balakshi V. I., Parigin V. N., Chirkov L.I. Physical Basics of Acousto-Optics. [Balakshiy V.I., Parygin V.N., Chirkov L.I. Fizicheskie osnovy akustooptiki]. Moscow: Radio and communication, 1985, 278 p.

6. Bobreshov A.M., Korovchenko I.S., Oleynikov A.V., Prokhorov K.A. Broadband model for calculating the diffraction pattern of an isotropic acousto-optic transducer. [Bobreshov A.M., Korovchenko I.S., Oleyjnikov A.V., Proxorov K.A. Shirokopolosnaya model' raschyota difrakcionnoy kartiny izotropnogo akustoopticheskogo preobrazovatelya]. Proceedings of the XXIV International Scientific and Technical Conference. "Radiolocation, navigation and communication.", 2017, pp. 389–398.

*Бобрешов А. М., д. ф.-м. н., профессор, декан физического факультета, зав. кафедрой электроники Воронежского государственного университета, Воронеж, Россия  
E-mail: bobreshov@phys.vsu.ru*

*Bobreshov A. M., Doctor of physical and mathematical science, Professor, Dean of physics faculty, Head of Department of Electronics, Voronezh State University, Voronezh, Russia  
E-mail: bobreshov@phys.vsu.ru*

*Коровченко И. С., к. ф.-м. н., доцент кафедры электроники Воронежского государственного университета, Воронеж, Россия  
E-mail: korovchenko@phys.vsu.ru*

*Korovchenko I. S., Candidate of physical and mathematical sciences, Associate Professor, Department of Electronics, Voronezh State University, Voronezh, Russia  
E-mail: korovchenko@phys.vsu.ru*

*Олейников А. В., аспирант кафедры электроники Воронежского государственного университета, Воронеж, Россия  
E-mail: ozverinka@gmail.com*

*Oleynikov A. V., postgraduate student, Department of Electronics, Voronezh State University, Voronezh, Russia  
E-mail: ozverinka@gmail.com*

*Прохоров К. А., студент кафедры электроники Воронежского государственного университета, Воронеж, Россия  
E-mail: prokhorovkir@yandex.ru*

*Prokhorov K. A., student, Department of Electronics, Voronezh State University, Voronezh, Russia  
E-mail: prokhorovkir@yandex.ru*

*Степкин В. А., к. ф.-м. н., доцент кафедры электроники Воронежского государственного университета, Воронеж, Россия  
E-mail: stepkin@phys.vsu.ru*

*Stepkin V. A., Candidate of physical and mathematical sciences, Associate Professor, Department of Electronics, Voronezh State University, Voronezh, Russia  
E-mail: stepkin@phys.vsu.ru*