

Фазовая регистрация возмущений флуктуирующих сред с помощью пространственно-разнесённого радиоакустического генератора

Владимир Георгиевич Лукашкин¹, Михаил Юрьевич Прилепко²✉

^{1, 2} МИРЭА-Российский технологический университет, Москва, Россия

¹lukashkin@mirea.ru, <https://orcid.org/0000-0003-3206-030X>

²prilepko@mirea.ru ✉, <https://orcid.org/0000-0002-1850-195X>

Аннотация. Проведены исследования в области мониторинга и регистрации геофизических возмущений. Возмущения флуктуирующих сред оказывают существенное влияние на функционирование технических систем управления, безопасности, навигации, связи и др. По этой причине разработка методов и средств мониторинга и регистрации геофизических возмущений является актуальной задачей во многих областях науки и техники. Рассмотрен способ регистрации геофизических возмущений в флуктуирующих средах с помощью пространственно-разнесённого радиоакустического генератора. Способ регистрации геофизических возмущений основан на сравнении фазы акустического сигнала, принятого из флуктуирующей среды, с фазой сигнала, излучаемого в контролируемую среду. Выходным сигналом фазового детектора является постоянное напряжение, описываемое монотонной функцией разности фаз входных сигналов. Сформулировано условие самовозбуждения пространственно-разнесённого радиоакустического генератора, определяющее общим решением переходной составляющей дифференциального уравнения второго порядка. Приведены структурные схемы технической реализации способа. По результатам экспериментального исследования представлена фазограмма выходного сигнала фазового детектора как реакция на вбрасывание объектов различных размеров в зону распространения акустического луча. Результаты исследования актуальны для следующих областей применения: зондирование континентальных морских и океанических шельфов, мониторинг вихревых и турбулентных возмущений воздушного пространства взлётно-посадочных полос аэропортов, контроль морских волнений и подводных течений в акваториях морских портов, обнаружение посторонних объектов в охраняемых зонах.

Ключевые слова: флуктуирующие среды, пространственно-разнесённый радиоакустический генератор, геофизические возмущения, регистрация, акустический сигнал, узкополосный кварцевый фильтр, радиосигнал, фазовый детектор

Для цитирования: Лукашкин В. Г., Прилепко М. Ю. Фазовая регистрация возмущений флуктуирующих сред с помощью пространственно-разнесённого радиоакустического генератора // Измерительная техника. 2022. № 1. С. 68–72. <https://doi.org/10.32446/0368-1025it.2022-1-68-72>

Phase registration of perturbations of fluctuating media using a spatially spaced radio-acoustic generator

Vladimir G. Lukashkin¹, Mihail Y. Prilepko²✉

^{1, 2} MIREA-Russian Technological University, Moscow, Russia

¹lukashkin@mirea.ru, <https://orcid.org/0000-0003-3206-030X>

²prilepko@mirea.ru ✉, <https://orcid.org/0000-0002-1850-195X>

Abstract. Research in the field of monitoring and registration of geophysical disturbances, being a complex scientific and technical problem, is of great applied importance. Perturbations of fluctuating media have a significant impact on the functioning of technical systems for control, safety, navigation, communications, etc. For this reason, the development of methods and tools for monitoring and recording geophysical disturbances is an urgent task in many areas of science and technology. The article discusses a method for registering geophysical disturbances in fluctuating media using a spatially separated radioacoustic generator. The event registration method is based on comparing the phase of the acoustic signal received from the fluctuating medium with the phase of the signal emitted into the controlled environment. The output signal of the phase detector is a DC voltage described by a monotonic function of the phase difference of the input signals. A condition for self-excitation of a spatially separated radioacoustic generator is formulated, which is determined by the general solution of the transient component of a second-order differential equation. The block diagrams of the technical implementation of the method are presented. The principle of registration of disturbances is based on the comparison of the phases of the signals received and emitted into the controlled environment. Based on the results of the experimental study, the phasegram of the output signal of the phase detector is presented as a reaction to the throwing of objects of various sizes into the zone of propagation of the acoustic beam. The results of the study are relevant for the following areas of application: sounding of continental sea and ocean shelves, monitoring of vortex and turbulent disturbances in the airspace of airport runways, control of sea waves and underwater currents in the waters of seaports, detection of foreign objects in protected areas.

Keywords: fluctuating media, spatially spaced radio-acoustic generator, geophysical disturbances, registration, acoustic signal, narrow-band quartz filter, radio signal, phase detector

Введение. Обнаружение и регистрация геофизических аномалий является комплексной задачей, включающей

техническую и математическую составляющие. Детектирование, регистрация и измерения аномалий физических

параметров исследуемой среды позволяют делать выводы о происходящих в ней процессах. Поэтому создание чувствительных и надёжных методов и средств обнаружения и регистрации возмущений в флуктуирующих средах является востребованной задачей в таких областях, как контроль морских волнений и подводных течений, мониторинг вихревых и турбулентных возмущений воздушного пространства взлётно-посадочных полос аэропортов, регистрация момента пересечения границы охраняемой зоны посторонним объектом и др.

Одним из способов регистрации геофизических возмущений низких и сверхнизких частот, а также возмущений ударного характера в флуктуирующих средах (гидросфере, атмосфере, земной коре), является просветный способ локации с использованием пространственно-разнесённого радиоакустического генератора.

Представленный способ можно использовать для детектирования и регистрации геофизических возмущений в охраняемых комплексах специального назначения [1]. В состав пространственно-разнесённого радиоакустического генератора входят канал прямой акустической связи длиной 100–150 м и радиоканал положительной обратной связи. Обнаружение геофизических возмущений основано на регистрации разности фаз, возникающей между излучаемым в контролируемую среду сигналом и принимаемыми из неё акустическими сигналами.

Принцип работы пространственно-разнесённого радиоакустического генератора. Принцип работы пространственно-разнесённого радиоакустического генератора показан на рис. 1. Принятый пьезокерамическим гидрофоном 1 акустический сигнал частотой 10 кГц модулирует с помощью модулятора 2 амплитуду несущей частоты 30 МГц радиопередатчика 3, который излучает амплитудно-модулированный сигнал в канал положительной обратной связи. В радиоприёмном тракте 4 с помощью амплитудного детектора 5 выделяется модулирующий сигнал частотой 10 кГц, который через узкополосный ($\Delta f = 5$ Гц) кварцевый фильтр 6 и усилитель 7 подаётся на гидроакустический излучатель 8. При выполнении условий самовозбуждения (баланс амплитуд и баланс фаз) система возбуждается на частоте узкополосного кварцевого фильтра 10 кГц:

$$\omega_0 = (L_p C_p)^{-1/2},$$

где L_p , C_p – индуктивность и ёмкость кварцевого резонатора.

Любая пространственная флуктуация исследуемой среды, возникающая в зоне распространения акустического луча, вызывает изменение амплитудно-фазовых характеристик и времени задержки τ_c распространения акустического сигнала:

$$\tau_c = l/c,$$

где l – длина акустического луча; c – скорость распространения акустического сигнала в среде.

Показанная на рис. 1 структурная схема является пространственно-разнесённым радиоакустическим генератором

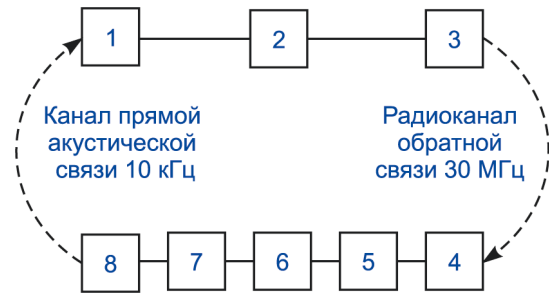


Рис. 1. Принцип работы пространственно-разнесённого радиоакустического генератора:

1 – пьезокерамический гидрофон; 2 – модулятор; 3 – радиопередатчик; 4 – радиоприёмник; 5 – амплитудный детектор; 6 – узкополосный кварцевый фильтр; 7 – усилитель; 8 – гидроакустический излучатель

Fig. 1. The principle of operation of a spatially spaced radio-acoustic generator:

1 – piezoceramic hydrophone; 2 – modulator; 3 – radio transmitter; 4 – radio receiver; 5 – amplitude detector; 6 – narrow-band quartz filter; 7 – amplifier; 8 – hydroacoustic emitter

с внешней параллельной положительной обратной связью по напряжению. Этот генератор можно представить в виде двух закольцованных четырёхполюсников (усилительного устройства и устройства обратной связи) с комплексными коэффициентами передачи соответственно $K(j\omega)$, $\beta(j\omega)$ (рис. 2).

Для усилительного устройства разомкнутой системы, представляющего акустический канал передачи, комплексный коэффициент передачи можно представить как

$$\dot{K}(j\omega) = \dot{U}_2 / \dot{U}_1 = K(\omega) e^{j\varphi_K(\omega)},$$

$$K(\omega) = U_2(\omega) / U_1(\omega);$$

$$\varphi_K(\omega) = \varphi_2(\omega) - \varphi_1(\omega),$$

где $\dot{U}_2$, $\dot{U}_1$ – комплексные амплитуды напряжения на выходе и входе канала соответственно; $K(\omega)$ – модуль коэффициента усиления на частоте ω ; $\varphi_K(\omega)$ – сдвиг фаз между выходным и входным напряжениями акустического усилителя; $\varphi_2(\omega)$, $\varphi_1(\omega)$ – фазы выходного и входного напряжения соответственно.

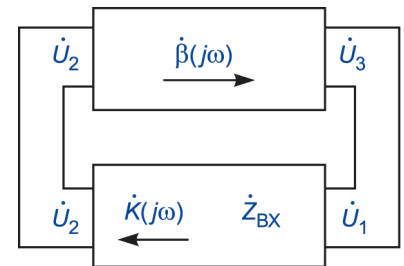


Рис. 2. Модель пространственно-разнесённого радиоакустического генератора с внешней параллельной положительной обратной связью по напряжению

Fig. 2. A model of a spatially spaced radio-acoustic generator with an external parallel positive voltage feedback

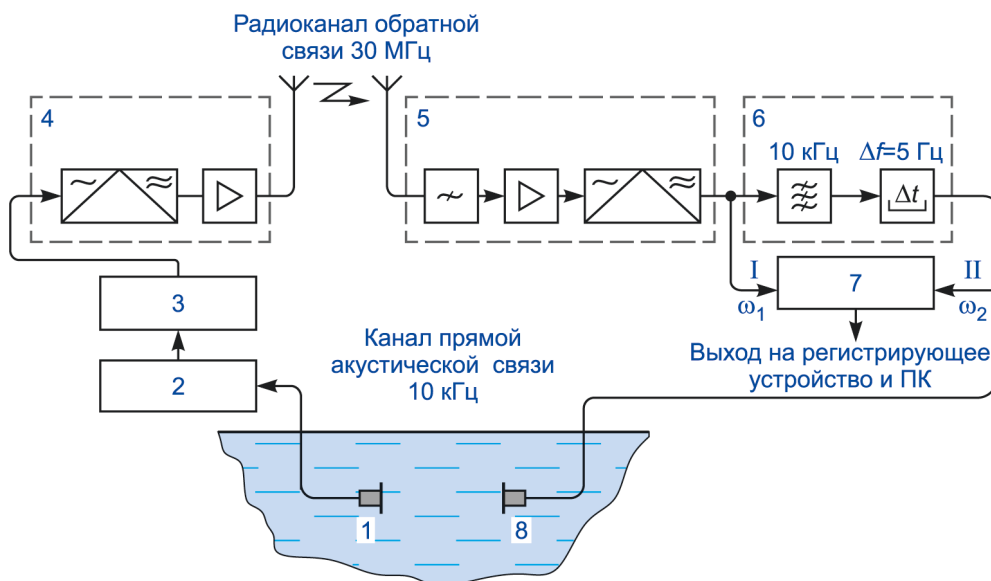


Рис. 3. Функциональная схема технической реализации фазовой регистрации возмущений флуктуирующих сред:

1 – пьезокерамический гидрофон; 2 – акустический приёмник; 3 – модулятор; 4 – радиопередатчик; 5 – радиоприёмник; 6 – узкополосный кварцевый фильтр; 7 – фазовый детектор; 8 – гидроакустический излучатель

Fig. 3. Functional diagram of the technical implementation of the phase registration of disturbances in fluctuating media:

1 – piezoceramic hydrophone; 2 – acoustic receiver; 3 – modulator; 4 – radio transmitter; 5 – radio receiver;
6 – narrow-band quartz filter; 7 – phase detector; 8 – hydroacoustic emitter

Для петли положительной обратной связи, функцию которой выполняет радиоканал, комплексный коэффициент передачи определяется из соотношения

$$\dot{\beta}(j\omega) = \dot{U}_1 / \dot{U}_2 = \beta(\omega) e^{j\varphi_\beta(\omega)}.$$

$$\beta(\omega) = U_1(\omega)/U_2(\omega);$$

$$\varphi_{\beta}(\omega) = \varphi_1(\omega) - \varphi_2(\omega),$$

где $\beta(\omega)$ – модуль коэффициента усиления на частоте ω ; $\varphi_{\beta}(\omega)$ – сдвиг фаз между выходным и входным напряжениями усилителя радиоканала.

Условие самовозбуждения пространственно-разнесённого радиоакустического генератора относительно напряжения возбуждения u_v определяется общим решением переходной составляющей дифференциального уравнения второго порядка:

$$d^2u_B/dt^2 + 2\delta_{\text{3KB}} du_B/dt + \omega_B^2 u_B = 0; \quad (1)$$

$$\omega_{\text{B}} = \sqrt{\omega_0^2 - \delta_{\text{a}}^2} \approx \omega_0,$$

где $u_{\text{в}}$ – мгновенное напряжение возбуждения пространственно-разнесённого радиоакустического генератора; $\delta_{\text{экв}}$ – эквивалентный коэффициент затухания системы; $\omega_{\text{в}}$ – частота возбуждения генератора, определяемая параметрами используемого в данной колебательной системе узкополосного кварцевого фильтра.

В схемах с LC -резонаторами эквивалентный коэффициент затухания определяется из соотношения

$$\delta_{\text{ЭВБ}} = (r + r_{\text{отр}}) / (2L),$$

где r – сопротивление потерь колебательного контура; $r_{\text{отр}}$ – отрицательное сопротивление, вносимое в автоколебательную систему за счёт внутренней или внешней обратной связи.

В общем случае уравнение (1) является нелинейным. Упрощённый вариант решения уравнения (1) заключается в его линеаризации. В силу малости начальных амплитуд автоколебаний условия самовозбуждения генератора можно анализировать в линейном режиме активных элементов, для чего пригодны все известные критерии устойчивости линейных систем. При этом решение линеаризованного уравнения имеет вид

$$u_B = U_B e^{-\delta_{\text{эKB}} t} \sin(\omega_B t + \varphi),$$

где U_B – амплитудное значение напряжения возбуждения пространдиоакустического генератора.

ственно-разнесённого радиоакустического генератора.

Для систем с внутренней обратной связью амплитуда колебаний в системе будет нарастать при условии $2\delta_{\text{эКВ}} \leq 0$, т. е. $r_{\text{отп}} \leq 0, |r_{\text{отп}}| \geq r$.

Для систем с внешней обратной связью, в том числе для рассматриваемой схемы (см. рис. 1), коэффициент передачи замкнутой системы определяется отношением комплексного коэффициента передачи акустического канала к петлевому усилению системы:

$$\dot{K}_{3,c}(j\omega) = \dot{K}(j\omega) / [1 - \dot{K}(j\omega)\dot{\beta}(j\omega)],$$

где $K(j\omega)$ – комплексный коэффициент передачи акустического канала в разомкнутой системе; $\beta(j\omega)$ – коэффициент передачи цепи обратной связи; $1 - K(j\omega)\beta(j\omega)$ – петлевое усиление системы.

Амплитуда выходного напряжения в данном случае будет стремиться к бесконечности, если для некоторой частоты ω будет выполняться следующее условие:

$$K(j\omega)\beta(j\omega)\exp\{j[\varphi_K(\omega)+\varphi_\beta(\omega)]\}=1. \quad (2)$$

Уравнение (2) включает в себя два условия возникновения автоколебаний в пространственном генераторе: балансов фаз и амплитуд соответственно

$$\varphi_K(\omega) + \varphi_\beta(\omega) = 2\pi k, \quad (3)$$

$$|K(\omega)\beta(\omega)| \geq 1, \quad (4)$$

где k – целое число.

Если условия (3), (4) выполняются только для одной частоты, то система является генератором гармонических колебаний.

Техническая реализация способа регистрации геофизических возмущений. Один из возможных вариантов технической реализации описываемого способа регистрации геофизических возмущений приведён на рис. 3.

Способ предполагает использование описанного выше пространственно-разнесённого радиоакустического генератора, состоящего из радиоканала положительной обратной связи и гидроакустического канала прямой передачи длиной порядка 150 м. Гидроакустический канал образован узконаправленным магнитострикционным акустическим излучателем 8, работающим на частоте 10 кГц при интенсивности звука не менее 15 Вт/м² и высокочувствительным пьезо-керамическим гидрофоном 1 [2, 3].

В соответствии с условием самовозбуждения (4) пространственно-разнесённого радиоакустического генератора коэффициент усиления $K(\omega)$ акустического канала должен быть не менее 10^6 .

Ключевым элементом акустического канала является узкополосный кварцевый фильтр 6. В схеме, реализующей описываемый способ, использован кварцевый фильтр на 10 кГц с шириной полосы пропускания $\Delta f = 5$ Гц и добротностью $Q = f_0 / \Delta f = 2000$ (f_0 – резонансная частота кварцевого фильтра). Большая постоянная времени фильтра обеспечивает компенсацию фазовых задержек в звеньях системы и выполнение условия баланса фаз (3), необходимое для самовозбуждения пространственно-разнесённого радиоакустического генератора.

Радиоканал положительной обратной связи содержит радиопередатчик 4 мощностью излучения амплитудно-модулированного сигнала не менее 0,1 Вт на частоте 30 МГц и радиоприёмник 5 чувствительностью не более 1 мкВ.

Для обнаружения и регистрации геофизических флуктуаций среды фазовым методом был использован двухканальный фазовый детектор 7 на логическом элементе «Исключающее ИЛИ» [4, 5], на выходе которого формируется постоянное напряжение, являющееся монотонной функцией разности фаз входных сигналов. Для усреднения импульсного выходного напряжения на выходе фазового детектора установлен интегратор или фильтр нижних частот.

На вход 1 фазового детектора 7 (см. рис. 3) через радиоканал обратной связи поступает значение фазы акустического сигнала, принятого из гидросферы и переданного по радиоканалу. На вход 2 поступает значение фазы акустического сигнала, прошедшего через узкополосный кварцевый фильтр, предназначенный для формирования сигнала, излучаемого в контролируемую среду.

Данные о мгновенном значении разности фаз можно обрабатывать и сохранять с помощью подключённого к выходу

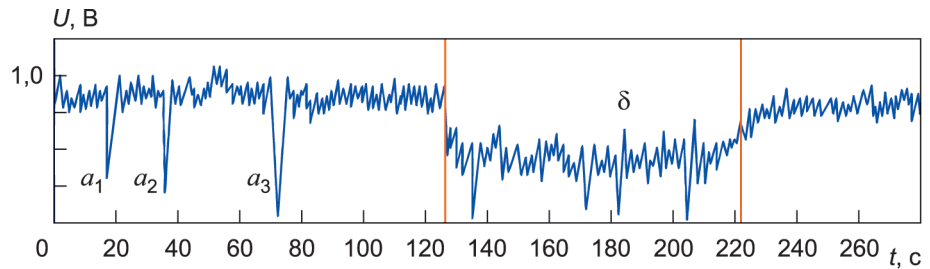


Рис. 4. Флуктуации выходного напряжения фазового детектора, вызванные вбрасыванием объектов различного размера в водную среду в просвете акустического луча:

a_1 – прямоугольный объект 250×120×65 мм; a_2 – прямоугольный объект 250×130×120 мм; a_3 – цилиндрический объект Ø280×250 мм; δ – пересечение вёсельной лодкой акустического луча под углом 90° в течение около 1,5 мин

Fig. 4. Fluctuations of the output voltage of the phase detector as a reaction to the throwing of objects of various sizes into the aqueous medium in the lumen of the acoustic beam:

a_1 is a rectangular object with dimensions of 250×120×65 mm; a_2 is a rectangular object with dimensions of 250×130×120 mm; a_3 – a cylindrical object with dimensions Ø280×250 mm; δ – intersection of an acoustic beam by a rowing boat at an angle of 90° for about 1.5 minutes

фазового детектора персонального компьютера с соответствующим программным обеспечением.

Дальнейшим направлением развития описываемого способа регистрации геофизических возмущений в части передачи информации может стать использование квадратурной амплитудной модуляции для высокоскоростной передачи информации. Достоинства квадратурной амплитудной модуляции и анализ погрешностей вследствие разбаланса квадратур подробно описаны в [6].

Результаты исследования. Обнаруженная в ходе экспериментальных исследований высокая чувствительность установки, реализующей описываемый способ регистрации геофизических возмущений, обеспечивается схемотехническими решениями и оптимальным выбором соответствующих параметров применяемой аппаратуры для поставленной задачи. Макет установки, реализованный в соответствии с описываемым способом, испытывали в реальных условиях на озере Валдай в присутствии представителей института физики Земли АН РФ. Типовой пример регистрации разности фаз при воздействии внешних волновых возмущений и при спокойном состоянии поверхности гидросферы показан на рис. 4. На фазограмме символами a_1 , a_2 , a_3 , δ отмечены зоны флуктуации выходного напряжения фазового детектора как реакция на вбрасывание объектов различного размера в водную среду в просвете акустического луча: зона a_1 – прямоугольный объект размерами 250×120×65 мм, зона a_2 – прямоугольный объект размерами 250×130×120 мм, зона a_3 – цилиндрический объект размерами Ø280×250 мм, на участке δ зафиксирован момент пересечения вёсельной лодкой акустического луча под углом 90° в течение около 1,5 мин.

Закключение. В зависимости от поставленной задачи, выбора среды и диапазона частот, представленный способ может иметь различное практическое применение. К возможным техническим приложениям можно отнести: зондирование континентальных морских и океанических шельфов [7]; мониторинг вихревых и турбулентных возмущений воздушного пространства взлётно-посадочных полос аэропортов; контроль

морских волнений и подводных течений в акваториях морских портов; бесконтактная регистрация момента пересечения границы охраняемой зоны посторонним объектом.

Список источников

1. Способ гидроакустического обнаружения и вытеснения пловцов и морских биологических объектов от системы водозабора атомной электростанции: пат. RU 2256196 C2 / С. А. Бахарев // Изобретения и полезные модели. 2005. № 19.
2. Зарайский В. А. Акустика океана. СПб.: ВМА им. Кузнецова, 2003. 233 с.
3. Марапулец Ю. А., Луковенкова О. О., Тристанов А. Б., Ким А. А. Методы регистрации и частотно-временного анализа сигналов геоакустической эмиссии: монография. Владивосток: Дальнаука, 2017. 146 с.
4. Gholami M., Ardeshir G., Dual phase detector based delay locked loop for high speed applications, *International Journal of Engineering*, 2014, vol. 27, no. 4. pp. 517–522.
5. Kumar N., Kumar M., 2016 2nd International Conference on Contemporary Computing and Informatics (IC3I), 2016, pp. 676–680. <https://doi.org/10.1109/IC3I.2016.7918048>
6. Куликов Г. В., Лелюх А. А. Влияние амплитудного и фазового разбаланса квадратур на помехоустойчивость когерентного приема сигналов с квадратурной амплитудной модуляцией // Российский технологический журнал. 2021. Т. 9. №. 1. С. 29–37. <https://doi.org/10.32362/2500-316X-2021-9-1-29-37>

7. Собисевич А. Л., Преснов Д. А., Шуруп А. С. Фундаментальные основы совершенствования пассивных сейсмогидроакустических методов исследования шельфа Арктики // Акустический журнал. 2021. Т. 67. № 1. С. 72–97.

References

1. Baharev S. A., RF Patent no. RU 2256196 C2, *Byull. Izobret.*, no. 19 (2005).
2. Zarajskij V. A., *Akustika okeana [Ocean Acoustics]*, Saint-Petersburg, Voenno-morskaja akademija Publ., 2003, 233 p. (In Russ.)
3. Marapulec Ju. V., Lukovenkova O. O., *Metody registracii i chastotno-vremennogo analiza signalov geoakusticheskoy jemissii [Methods of registration and time-frequency analysis of geoacoustic emission signals]*, Vladivostok, Dalnauka Publ., 2017, 146 p. (In Russ.)
4. Gholami M., Ardeshir G., Dual phase detector based delay locked loop for high speed applications, *International Journal of Engineering*, 2014, vol. 27, no. 4. pp. 517–522.
5. Kumar N., Kumar M., 2016 2nd International Conference on Contemporary Computing and Informatics (IC3I), 2016, pp. 676–680. <https://doi.org/10.1109/IC3I.2016.7918048>
6. Kulikov G. V., Lelyukh A. A., *Russian Technological Journal*, 2021, vol. 9, no. 1, pp. 29–37. (In Russ.) <https://doi.org/10.32362/2500-316X-2021-9-1-29-37>
7. Sobisevich A. L., Presnov D. A., Shurup A. S., *Acoustical Physics*, 2021, vol. 67, no. 1, pp. 62–82. (In Russ.) <https://doi.org/10.1134/S1063771021010048>

Статья поступила в редакцию 15.07.2021; одобрена после рецензирования 13.10.2021; принята к публикации 18.10.2021.
The article was submitted 15.07.2021; approved after reviewing 13.10.2021; accepted for publication 18.10.2021.