

doi: 10.17586/2226-1494-2021-21-6-828-836

УДК 543.4 (045)

## Сравнительный анализ частотных спектров глаза человека и алмаза в видимом свете

Станислав Иванович Зиенко<sup>1</sup>, Вера Леонидовна Жбанова<sup>2</sup>✉

<sup>1,2</sup> Филиал федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Национальный исследовательский университет «МЭИ» в г. Смоленске, г. Смоленск, 214013, Российская Федерация

<sup>1</sup> [stanislav-zienko@rambler.ru](mailto:stanislav-zienko@rambler.ru), <https://orcid.org/0000-0002-8744-2279>

<sup>2</sup> [Vera-zhbanova@yandex.ru](mailto:Vera-zhbanova@yandex.ru)✉, <https://orcid.org/0000-0001-7597-0675>

### Аннотация

**Предмет исследования.** Исследованы частотные характеристики спектров глаза человека и ограненного алмаза (бриллианта). Работа основана на результатах современных исследований по применению алмаза в качестве хрусталика глаза. Выполнено сравнение полученных результатов с усредненными данными по кривой видности дневного, вечернего и ночного зрения глаза человека. **Метод.** В основе метода лежит представление оптической среды глаза человека и алмаза в виде динамического звена, имеющего вход и выход. Для аппроксимации спектральных кривых применена функция Гаусса. Исследование инерционных свойств такого звена во временной области выполнено путем подачи на его вход сигналов в форме  $\delta$ -функции или единичной функции. Установившиеся вынужденные колебания на выходе исследуемого динамического звена определяются при подаче на вход гармонического воздействия. Частотные характеристики выявляют связь между спектрами входного и выходного сигналов, в виде прямого преобразования Фурье от функции времени. **Основные результаты.** Установлено, что спектры видности глаза человека и люминесцентного излучения алмаза обладают свойствами сверхширокополосных сигналов. Показано, что во временной области имеет место усиление света, когда ширина спектра на его полувысоте не превышает некоторого критического значения. Это явление проявляется и в частотной области. Выявлено, что динамические звенья алмаза и глаза человека для дневного и ночного зрения проявляют усилительные свойства. Сопоставление свойств по величине коэффициента усиления света показало незначительное отличие. **Практическая значимость.** Полученные результаты могут найти применение при создании матричных фотоприемников и в качестве эталона при идентификации ограненного алмаза (бриллианта) неизвестного происхождения, а также при производстве хрусталика из алмаза.

### Ключевые слова

кривая видности, глаз человека, алмаз, спектральная характеристика, динамическое звено, групповое время задержки, идентификация бриллианта

**Ссылка для цитирования:** Зиенко С.И., Жбанова В.Л. Сравнительный анализ частотных спектров глаза человека и алмаза в видимом свете // Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики. 2021. Т. 21, № 6. С. 828–836. doi: 10.17586/2226-1494-2021-21-6-828-836

## A comparative analysis of the frequency spectra of the human eye and a cut diamond in visible light

Stanislav I. Zienko<sup>1</sup>, Vera L. Zhbanova<sup>2</sup>✉

<sup>1,2</sup> Branch of National Research University Moscow Power Engineering Institute in Smolensk, Smolensk, 214013, Russian Federation

<sup>1</sup> [stanislav-zienko@rambler.ru](mailto:stanislav-zienko@rambler.ru), <https://orcid.org/0000-0002-8744-2279>

<sup>2</sup> [Vera-zhbanova@yandex.ru](mailto:Vera-zhbanova@yandex.ru)✉, <https://orcid.org/0000-0001-7597-0675>

### Abstract

The paper investigates the frequency characteristics of the spectra of a human eye and a faceted diamond (brilliant). The relevance of the research deals with a large number of modern studies on the use of diamond as a lens of the eye. The

© Зиенко С.И., Жбанова В.Л., 2021

results obtained were compared with the averaged data (described in the literature) on the visibility curve of day, evening and night vision of the human eye. The research method is based on the representation of the optical environment of the human eye and diamond in the form of a dynamic link with an input and output. The Gaussian function is used to approximate the spectral curves. The study of the inertial properties of such a link in the time domain is performed by feeding signals to its input in the form of a  $\delta$ -function or a unit function. The steady-state forced oscillations at the output of the investigated dynamic link are found when a harmonic action is applied to the input. Frequency characteristics discover a relationship between the spectra of the input and output signals, representing the direct Fourier transform of the function of time. It was found that the spectra of the visibility of the human eye and the luminescent radiation of diamond have the properties of ultra-wideband signals. It is shown that the amplification of light takes place in the time domain when the width of the spectrum at its half-maximum does not exceed a certain critical value. This phenomenon also manifests itself in the frequency domain. It was revealed that the dynamic links of diamond and human eyes for day and night vision exhibit amplifying properties. Their comparison in terms of the light amplification factor showed their insignificant difference. The results obtained can find application in the creation of matrix photodetectors and as a standard in identifying a faceted diamond (brilliant) of unknown origin and producing a lens from a diamond.

#### Keywords

human eye, visibility curve, diamond, spectral characteristic, dynamic link, group delay time, diamond identification

**For citation:** Zienko S.I., Zhibanova V.L. A comparative analysis of the frequency spectra of the human eye and a cut diamond in visible light. *Scientific and Technical Journal of Information Technologies, Mechanics and Optics*, 2021, vol. 21, no. 6, pp. 828–836 (in Russian). doi: 10.17586/2226-1494-2021-21-6-828-836

### Введение

Исследование характеристик глаза человека с целью качественного производства и внедрения визуальных систем в современных приборах — важная проблема науки и техники [1–3]. Несмотря на современные возможности визуальных систем по таким критериям, как разрешение, увеличение, динамика и освещение, открытым остается вопрос приближения всех этих систем к восприятию мира глазом человека.

К пониманию устройства человеческого зрения можно подойти не только с медицинской, психологической или светотехнической точек зрения, но и математической, рассмотрев оптическую среду глаза как динамическое звено.

С помощью методики применения динамического звена были проведены исследования матричных фотоприемников [4, 5], в которых выявлены сверширокополосные (СШП) свойства сигналов, а также эффект усиления. Подобные свойства были найдены в алмазах и бриллиантах [6–9]. Далее, при работе с человеческим зрением, были также сделаны выводы о схожести параметров алмаза и глаза в частотной и временной областях. Отметим, что СШП сигналы возникают в результате релаксации электронной поляризации, где электроны валентные, для которых имеет значение происхождение материала. Данный вопрос наиболее актуален при применении алмаза в качестве хрусталика глаза<sup>1,2</sup>. Впервые имплантировать в глаз алмазы стали еще в 2001 г. в Сарове<sup>3</sup>, где было выяснено, что алмазный хрусталик «имеет высокую биосовместимость и более высокий коэффициент преломления по сравнению с другими материалами, что обеспечивает и более качественное зрение», а также «имеет луч-

шее качество, чем «протезы» из других материалов, в частности, пластмассы и лейкосапфира». Необходимо выяснить: что общего в столь разных структурах, что может качественно заменить один объект на другой?

Авторы настоящей работы понимают, что ощущение яркости и цветности появляется у человека не на выходе рецепторов, а после обработки их сигналов головным мозгом. Однако этот процесс полностью пока не изучен нейробиологами и нейропсихологами. По этой причине, чтобы не быть ограниченными современными знаниями, кривая видности глаза принята как спектральная характеристика всей зрительной системы человека.

В разработанном методе анализа спектральных характеристик глаза и алмаза важным параметром спектральной линии является ее ширина, которая служит мерой немонахроматичности. Если  $\Delta f/f_r$  много меньше 1, где  $f_r$  — несущая частота колебаний, то спектр является узкополосным. Колебания во времени описываются гармонической функцией. Вместе с тем, когда  $\Delta f$  и  $f_r$  сопоставимы по величине, в оптике нет четкого определения характерной величины их отношения. В то же время в радиотехнических приложениях для оценки ширины спектра вводится показатель широкополосности, который определяется из соотношения [10]:

$$\mu = \frac{\Delta f}{f_r} = \frac{f_{\max} - f_{\min}}{(f_{\max} + f_{\min})/2} \quad (1)$$

где  $f_r$ ,  $f_{\min}$  и  $f_{\max}$  — средняя, минимальная и максимальная частоты энергетического спектра;  $\Delta f = f_{\max} - f_{\min}$  — ширина полосы частот сигнала на его полувысоте.

Сигналы в диапазоне  $0,2 \leq \mu \leq 2$  называют СШП сигналами. При этом СШП сигналы с  $\mu = 2$  относятся к видеосигналам, с  $0,1 \leq \mu \leq 0,2$  — к широкополосным и  $\mu \leq 0,001$  — к узкополосным.

Узкополосные и СШП сигналы существенно отличаются друг от друга. Узкополосные синусоидальные сигналы обладают уникальными свойствами. При таких широко используемых преобразованиях, как сложение, вычитание, интегрирование, дифференцирование, их форма остается прежней. Здесь и далее под фор-

<sup>1</sup> [Электронный ресурс]. Режим доступа: <http://www.freepatent.ru/patents/2056809> (дата обращения: 08.09.2021).

<sup>2</sup> [Электронный ресурс]. Режим доступа: <http://www.freepatent.ru/patents/2154444> (дата обращения: 09.09.2021).

<sup>3</sup> [Электронный ресурс]. Режим доступа: [www.newsru.com/russia/08apr2001/diamond\\_eye.html](http://www.newsru.com/russia/08apr2001/diamond_eye.html) (дата обращения: 08.09.2021).

мой понимается закон изменения сигнала во времени. Преобразованные сигналы могут различаться только амплитудой и сдвигом во времени. В противоположность им у СШП сигнала при указанных (и других) преобразованиях изменяются не только параметры, но и форма [11].

Происхождение СШП сигналов в алмазе связано с существованием фонованного крыла спектра люминесцентного излучения, сопровождающего бесфонные линии при комнатной температуре. Фонованное крыло отражает динамику кристаллической решетки алмаза [7]. Показатель широкополосности  $\mu$  у алмазов принимает значения от 0,25 до 1 [8, 9]. Что касается глаза человека, то кривая его видности по своей форме и всем признакам также обладает СШП свойствами. Однако сведений по этому вопросу в научных работах практически нет.

Цель работы — сравнение глаза человека и алмаза по величине показателя широкополосности, длительности импульсной (временной) характеристики, коэффициента усиления света, свойствам частотных характеристик. Решение этих задач имеет большой научный и практический интерес. В качестве алмаза использован ограненный алмаз (бриллиант) природного происхождения.

Заметим, что форма спектров люминесценции алмазов зависит от длины волны лазерного возбуждения  $\lambda_B$  [12–14]. Исходя из этого, результаты измерений, которые представлены в данной работе, относятся к случаю, когда  $\lambda_B = 532$  нм.

### Построение спектра сигнала по шкале энергии и частоты

Спектр люминесцентного излучения алмаза зарегистрирован с помощью спектрометра-флуориметра<sup>1</sup> РАОС-3. Измерение проведено при комнатной температуре в диапазоне длин волн  $\lambda = 530$ –800 нм при облучении лазером на длине волны лазера 532 нм в непрерывном режиме. Анализ данных выполнен по шкале энергии, где  $E = 1240/\lambda$ ,  $\lambda$  измеряется в нанометрах и  $E$  — в электронвольтах по шкале частот. Экспериментальный спектр приведен на рис. 1, *a*. На рис. 1, *b* показан измеренный спектр без фильтрации. Данный спектр проходил фурье-фильтрацию.

В результате узко- и широкополосные линии люминесценции, присутствующие в исходной спектральной кривой, полностью исчезают. Огибающая линия несет информацию о состоянии фонованного крыла спектра люминесценции алмаза [15]. Численные значения шкалы частот получены вычитанием из шкалы энергии величины  $E_0 = 1,55$  эВ. Затем локальная энергия  $E_1 = (E - 1,55)$  эВ была разделена на величину, равную значению постоянной Планка  $h = 4,1 \cdot 10^{-15}$  эВ·с. После этого рассчитаем масштабный коэффициент, связанный с переходом от энергии  $E$  к  $E_1$ : при этом  $m = E_r/(E_r - 1,55)$ ,

<sup>1</sup> Акустооптический спектрометр НТЦ УП РАН, версия 01.03.2003.

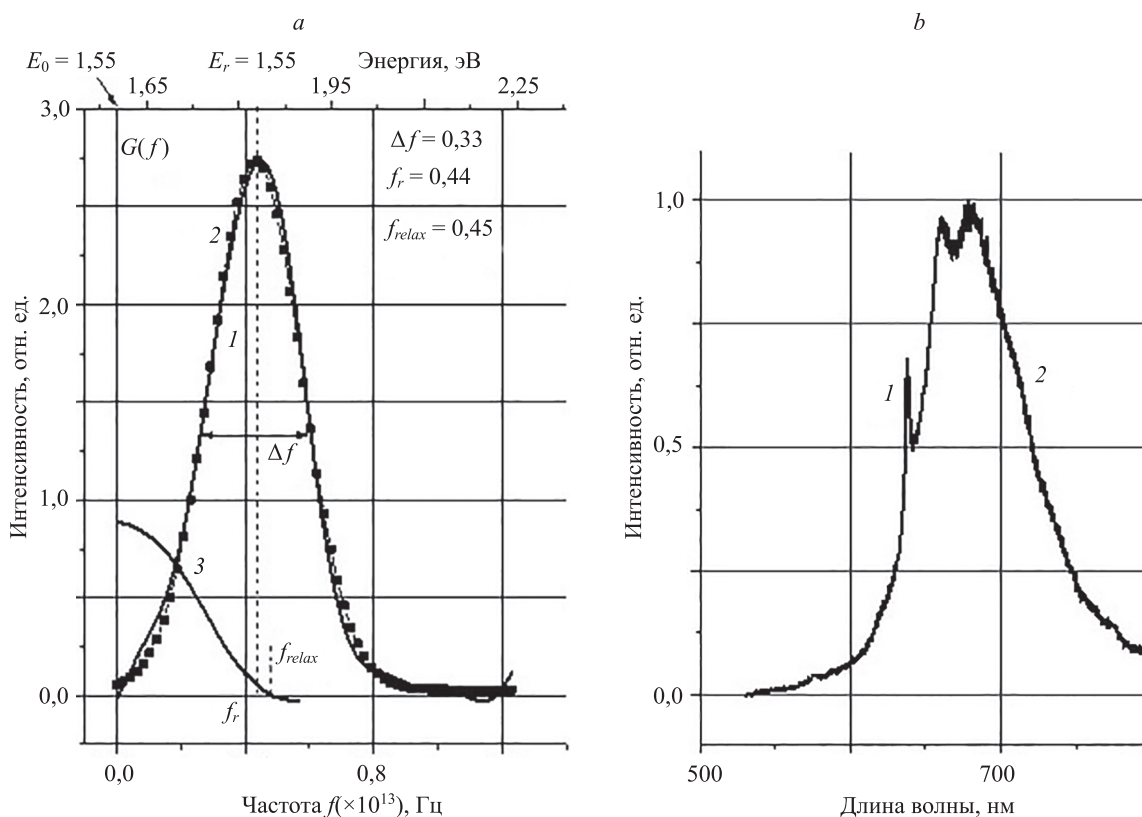


Рис. 1. Графическое представление спектров люминесценции алмаза по частоте (*a*) и длине волны (*b*).

Алмаз-бриллиант Кр-57, фантазийный, коричневый/9, 0.54 кар. [16]

Fig. 1. Graphical representation of diamond luminescence spectra by frequency (*a*) and wavelength (*b*). Diamond: diamond Kr-57, fancy, brown/ 9, 0.54 ct. [16]

где  $E_r$  — энергия пика спектральной кривой. Частота получена следующим образом:  $f = mE_1/h$  при значениях  $E_1 = 1,83$  эВ (рис. 1, *a*) и  $m = 6,5$ .

На рис. 1, *a* обозначены: кривая 1 — дифференциальная функция распределения  $G(f)$  (сплошная линия); кривая 2 — аппроксимация (жирные метки); кривая 3 — групповое время задержки;  $f_{relax}$  — частота диэлектрической релаксации. На рис. 1, *b* показан пик 1 — бесфононная линия ( $\lambda = 637$  нм), кривая 2 — фононное крыло люминесценции, по оси ординат отложена интенсивность сигнала, нормированная по амплитуде равной единице.

Кривая видности глаза человека (дневное зрение) в диапазоне частот и длин приведены на рис. 2, *a, b* соответственно. Для построения кривой видности исполь-

зованы экспериментальные данные, представленные в работе [17] для «среднего человека». В данном случае построение спектральной кривой 1 по шкале энергии и частоты проводили по методике, описанной выше. Здесь параметр  $m = 4,4$ .

Отметим, что кривая видности глаза человека является фононным крылом, сопровождающим бесфононные линии в спектре поглощения оптической среды [18], и потому отражает динамику оптической среды глаза человека. Этим обстоятельством можно объяснить подобие спектральных кривых, изображенных на рис. 1, *a* и рис. 2, *a*. Параметры экспериментальных спектров приведены в таблице.

В соответствии с параметрами, приведенными в таблице, спектры видности глаза человека имеют  $\mu$ ,

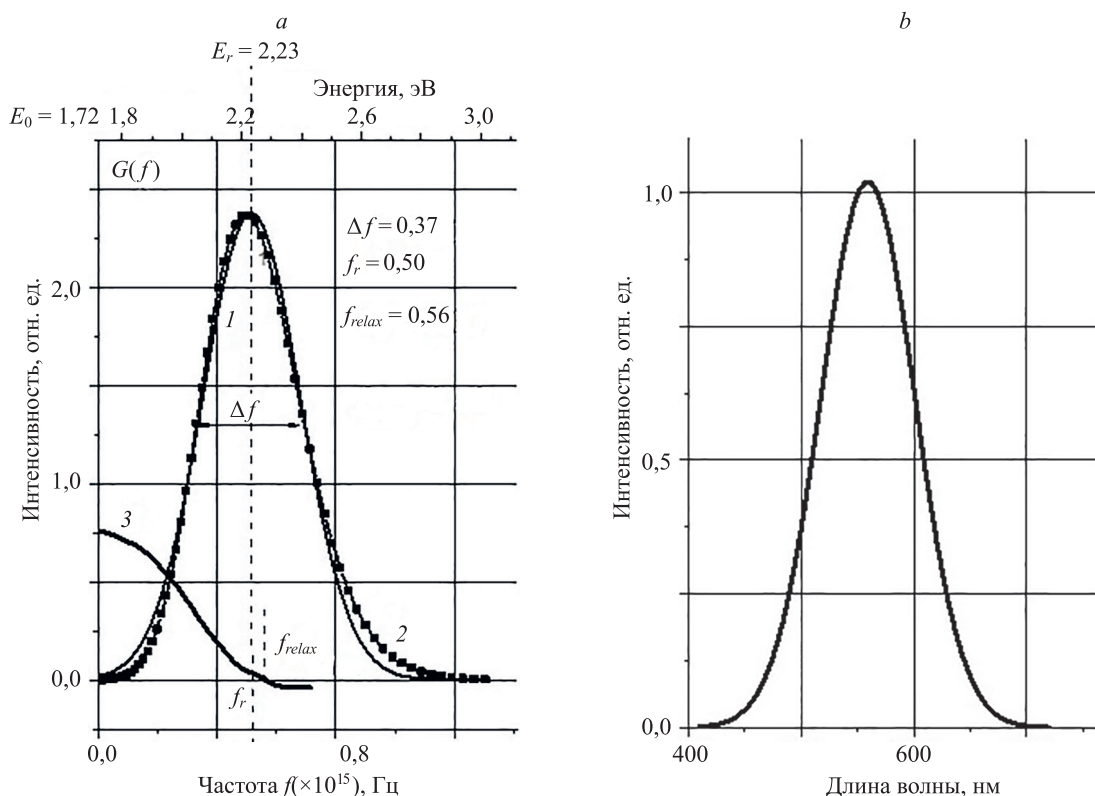


Рис. 2. Дифференциальная функция распределения  $G(f)$  кривой видности глаза человека: кривая 1 — эксперимент (сплошная линия), кривая 2 — аппроксимация (жирные метки), кривая 3 — групповое время задержки (*a*); кривая видности глаза человека в диапазоне длин волн, по оси ординат отложена интенсивность сигнала, нормированная по амплитуде равной единице (*b*)

Fig. 2. Differential distribution function  $G(f)$  of the human eye visibility curve: solid line 1 — experiment (bold dots); 2 — approximation, 3 — group delay time (*a*); human eye visibility curve in the wavelength range, the signal intensity normalized by amplitude equal to one (*b*) is postioned along the ordinate axis

Таблица. Параметры спектральных кривых  
Table. Parameters of spectral curves

Параметр		$S$	$f_r \times 10^{15}$ , Гц	$\Delta f \times 10^{15}$ , Гц	$H$ , отн. ед.	$\mu$	$k$
Глаз	Дневное зрение	1,0	0,51	0,37	2,37	0,72	$k_1 = 1,24$
	Ночное зрение	1,0	0,60	0,34	2,66	0,56	$k_2 = 1,38$
Алмаз		1,0	0,44	0,33	2,76	0,75	$k_3 = 1,41$

В таблице:  $S$  — площадь, ограниченная спектральной кривой — дифференциальной функцией распределения  $G(f)$ ,  $S = 1$ ;  $H$  — амплитуда;  $\mu$  — показатель широкополосности вычислен по формуле (1);  $k$  — коэффициент усиления света.

равные 0,72 и 0,56 для дневного и ночного зрения, и 0,75 – для люминесцентного излучения алмаза и обладают свойствами СШП сигналов.

**Импульсные и переходные характеристики динамического звена**

С целью упрощения анализа для аппроксимации спектральных кривых используем функцию Гаусса вида [19, 20]:

$$G(f) = H \exp(-2,8((f-f_0)/\Delta f)^2). \quad (2)$$

Оптическую среду алмаза и глаза человека для анализа удобно представить в виде динамического звена, имеющего вход и выход. Во временной области исследование инерционных свойств такого звена выполним путем подачи на его вход сигналов в форме  $\delta$ -функции или единичной функции  $l(t)$ . Реакцию звена на  $\delta$ -функцию называют импульсной (временной)  $g(t)$  характеристикой, а на единичную функцию  $l(t)$  — переходной характеристикой  $h(t)$ . Функции  $g(t)$  и  $h(t)$  связаны между собой соотношением:

$$h(t) = \int_0^t g(t) dt. \quad (3)$$

Численно величина  $h(t)$  равна площади, ограниченной кривой  $g(t)$ . Импульсная характеристика имеет размерность числа фотонов в единицу времени. Величина  $h(\infty)$  определяет полное число фотонов люминесцентного излучения в алмазе, либо поглощенных, в случае глаза человека.

Импульсную характеристику найдем по формуле обратного преобразования Фурье:

$$g^*(t) = \int_0^\infty G(f) \exp(-2\pi jft) df. \quad (4)$$

Здесь  $j$  — комплексное число, квадрат которого равен 1.

Зависимость импульсной характеристики  $g^*(t)$  может быть получена из решения уравнений (2) и (4) в аналитическом виде [19]:

$$g^*(t) = C \exp(-at^2 + j2\pi f_0 t), \quad (5)$$

где параметр  $a = 3,5\Delta f^2$  и является константой большей нуля [19], коэффициент  $C$  — амплитуда импульсной характеристики, величину которой можно получить из (4), полагая  $t = 0$ . В этом случае  $g^*(0)$  примет вид, где выражение  $\int_0^\infty G(f) df = 1$  и в соответствии с (5)  $C = 1$ .

Модуль импульсной характеристики описывается функцией Гаусса:

$$g(t) = C \exp(-at^2). \quad (6)$$

Графические зависимости  $g(t)$  для алмаза и глаза человека, построенные с учетом данных таблицы, приведены на рис. 3, где кривые 1 и 2 соответствуют дневному и вечернему зрению глаза человека, кривая 3 — алмазу (пунктирные линии). На рис. 3,  $b$  показан отрезок прямой ( $m$ ), построенный по касательной к переходным характеристикам в начале координат.

Выражение (6) представляет собой импульс в форме гауссовой кривой. Получим длительность импульса на его полувысоте

$$t_{0,5} = 0,4/\Delta f. \quad (7)$$

Численные значения по формуле (7) хорошо согласуются с расчетными данными, представленными на рис. 3,  $a$ . Для кривых 1, 2 и 3 величина  $t_{0,5}$  равна 1,2; 1,3; 1,35 фс соответственно. Эти значения находятся в фемтосекундном диапазоне времени. Заметим, что в видимом диапазоне света, в случае отсутствия фоновонного крыла в спектре люминесцентного излучения, ширина спектральной линии имеет значение  $\Gamma$  около  $10^{-7}$  эВ. Это соответствует времени жизни атома в возбужденном состоянии  $\tau$  равном приблизительно  $10^{-8}$  с, т. е. находится в наносекундном диапазоне времени.

В общем случае интеграл (3) с учетом (6) не имеет аналитического решения. Численное решение его с данными, представленными в таблице, приведено в виде графиков на рис. 3,  $b$ . В то же время при  $t = \infty$  можно получить для  $h(\infty)$  простое соотношение:  $C \cdot 0,47/\Delta f$ . Коэффициент  $C$  имеет размерность — число фотонов в единицу времени (одну фемтосекунду). Коэффициент усиления (по мощности) динамического звена имеет вид [21]

$$k = h(\infty)/l(t) = C \cdot 0,47/\Delta f, \quad (8)$$

где  $l(t)$  — единичная функция или функция Хевисайда [19].

Из соотношения (8) следует, что когда ширина спектра не превышает критического значения  $\Delta f_{кр} = 0,47 \cdot 10^{15}$  Гц, то коэффициент усиления света больше единицы.

В нашем случае для глаза человека коэффициент оптического усиления по мощности для дневного зрения составляет 1,24 и ночного — 1,38, т. е. в последнем

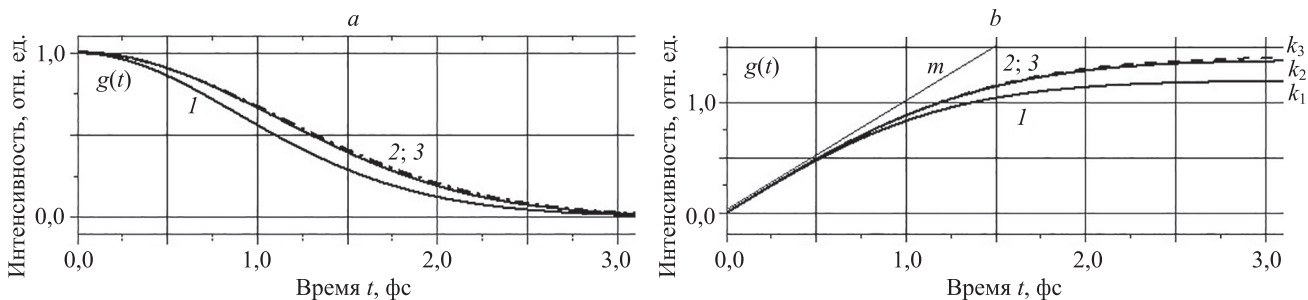


Рис. 3. Сравнение импульсных  $g(t)$  (а) и переходных характеристик  $h(t)$  (б) глаза человека и алмаза

Fig. 3. Pulse  $g(t)$  (a) and transient characteristics  $h(t)$  (b) of the human eye and diamond

случае возрастает по величине, как и у алмаза, который равен 1,41. Полученные результаты соответствуют расчетам (рис. 3, б). Таким образом, оптическая среда алмаза и глаза человека проявляют усилительные свойства.

### Частотные характеристики динамического звена

Частотные характеристики описывают установившиеся вынужденные колебания на выходе исследуемого динамического звена при подаче на вход гармонического воздействия. Частотные характеристики являются энергетическими характеристиками системы, которые устанавливают связь между спектрами входного и выходного сигналов, представляющих прямое преобразование Фурье от функции времени  $g(t)$ .

По известной зависимости  $g(t)$  вычислим комплексную частотную характеристику  $w^*(f)$ . Для этого используем формулу прямого преобразования Фурье:

$$w^*(f) = \int_0^{\infty} g(t) \exp(-2\pi jft) dt. \quad (9)$$

Соотношение (9) содержит вещественную  $a(f)$  и мнимую  $b(f)$  части

$$w^*(f) = a(f) + jb(f). \quad (10)$$

Модуль этой функции вычислим по формуле

$$r(f) = \sqrt{a^2(f) + b^2(f)}. \quad (11)$$

Величина фазового сдвига:

$$\varphi(f) = -\arctg \frac{b(f)}{a(f)}. \quad (12)$$

Для оценки временных процессов используем понятие группового времени запаздывания (ГВЗ). В общем случае ГВЗ определяется первой производной фазового спектра (12) со знаком минус:

$$\tau(f) = -\frac{1}{360} \frac{d\varphi}{df}. \quad (13)$$

Здесь фазовый угол  $\varphi(f)$  измеряется в угловых градусах, нормирующий множитель имеет величину  $360^\circ$ .

Графические амплитудные фазочастотные характеристики (АФЧХ) глаза человека и алмаза приведены на рис. 4.

Из рис. 4 видно, что АФЧХ не охватывают начала координат, что свидетельствует об устойчивости режима усиления. Остановимся на особенностях частотных характеристик в видимом свете. Период колебания света по порядку величины сопоставим с временем электронной поляризации оптической среды глаза человека и алмаза. Электронная поляризация возникает в результате смещения электронных облаков относительно центра ядер атомов или ионов под действием электрического поля. Данный результат наблюдается во всех без исключения диэлектриках, а в неполярных материалах является единственным видом поляризации. После выключения электрического поля энергия, затраченная на поляризацию, возвращается источнику электрической энергии, так как деформированные оболочки атомов и ионов возвращаются в прежнее

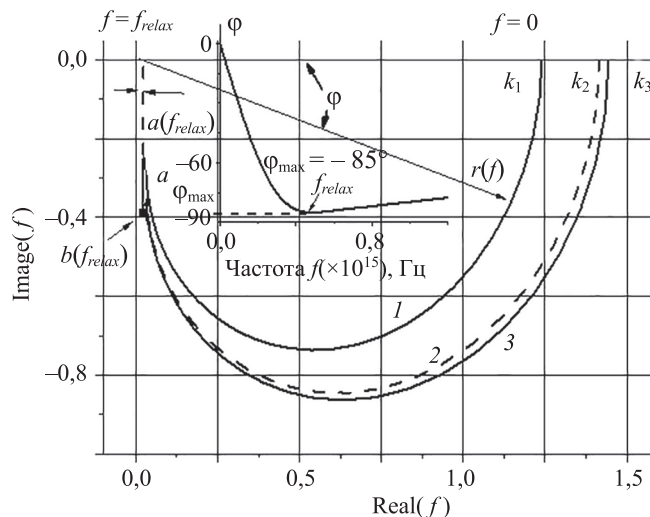


Рис. 4. Амплитудные фазочастотные характеристики глаза человека: кривая 1 — день, кривая 2 — ночь, кривая 3 — алмаз (на вставке фазовый спектр алмаза, где Image( $f$ ) — мнимая частота, Real( $f$ ) — реальная частота на комплексной плоскости)

Fig. 4. Amplitude phase-frequency characteristics of the human eye: 1 — day, 2 — night, 3 — diamond (on the inset, the phase spectrum of diamond), where Image( $f$ ) is the imaginary frequency, Real( $f$ ) is the real frequency on the complex strip

положение. Таким образом, поляризация происходит без потерь энергии. Отметим, что в данном случае, в течение некоторого времени, условие электрической нейтральности оптической среды не выполняется [6]. Это время можно найти с помощью расчета ГВЗ по формуле (13).

График функции  $\varphi(f)$  представлен на вставке рис. 4. При частоте, равной частоте диэлектрической релаксации  $f_{relax}$ , производная  $d\varphi/df = 0$ . Это означает, что оптическая среда глаза человека и алмаза не реагирует на электромагнитное излучение. По существу  $f_{relax}$  представляет собой предельное значение частоты, при которой оптическая среда еще проявляет активные свойства. Следовательно, в точке «а» (рис. 4) происходит завершение кривой годографа радиуса — векторов глаза человека и алмаза. Максимальное значение фазового угла  $\varphi_{max}$  составляет для алмаза —  $85^\circ$ , для глаза человека —  $84^\circ$  (день) и  $86^\circ$  (ночь). У алмаза точка «а» имеет следующие координаты:  $a(f_{relax}) = 0,031$ ;  $b(f_{relax}) = -0,35$ .

При этом реактивная компонента по порядку величины намного превышает активную составляющую спектра, т. е. оптическая среда проявляет емкостные свойства. Подобная ситуация имеет место и в оптической среде глаза человека.

Из сравнения данных, изображенных на рис. 1 и рис. 2, можно видеть, что частоты  $f_{relax}$  и  $f_r$  примерно равны по величине. Время диэлектрической релаксации  $\tau_\epsilon = 1/2\pi f_{relax}$ , полное время восстановления электрической нейтральности оптической среды  $t_\epsilon \approx 3\tau_\epsilon$ . Полагая  $f_{relax} = f_r$ , находим отношение  $t_\epsilon/T_r$  в следующем виде:  $t_\epsilon/T_r \approx 0,47$ . Таким образом, электрическая нейтральность оптической среды глаза человека и алмаза восстанавливается за время, примерно равное половине

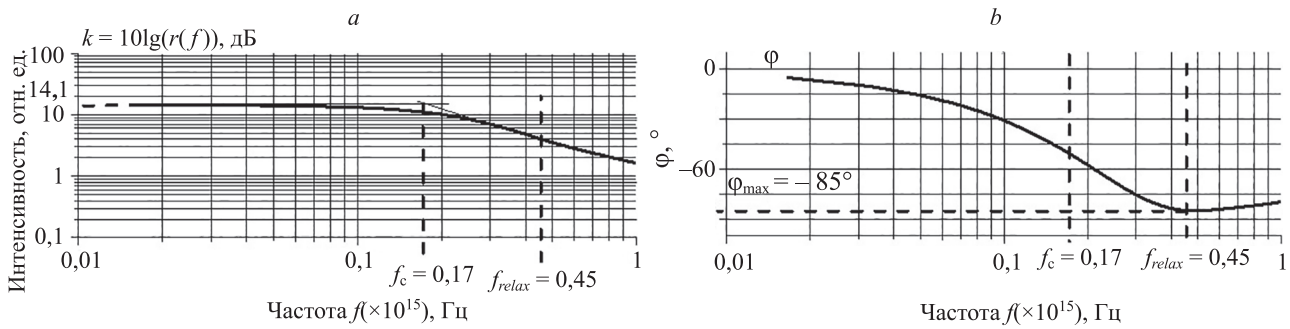


Рис. 5. Логарифмическая амплитудная фазо-частотная характеристика для алмаза: логарифмическая частотная характеристика (а) и логарифмическая фазо-частотная характеристика (б),  $k$  — коэффициент усиления сигнала в логарифмических единицах — децибелах

Fig. 5. Logarithmic amplitude phase-frequency response for diamond: logarithmic frequency response (a) and logarithmic phase-frequency response (b),  $k$  is the signal gain in logarithmic units — decibels

периода полного светового колебания, что для глаза человека составляет 1 фс (день), 0,8 фс (ночь) и алмаза 1,13 фс. Этим обстоятельством можно объяснить то, что кривые  $h(t)$ , изображенные на рис. 3, б, сливаются между собой и с касательной к ним в начале координат (кривая  $m$ ). При этом угол наклона касательной составляет  $45^\circ$ . Последнее следует из того, что  $\frac{dh}{dt} = g(0) = 1$ .

Между вещественной и мнимой частями передаточной функции (10) звена существует однозначная зависимость:

$$w(jf) = r(f)\exp(j\varphi), \quad (14)$$

где  $r(f)$  вычисляется по формуле (11).

Прологарифмировав (14), получим

$$\lg(w(jf)) = \lg(r(f)) + j\varphi. \quad (15)$$

В соответствие с соотношением (15), логарифмическая АФЧХ строится в виде двух графиков: логарифмической амплитудно-частотной характеристики (ЛАЧХ) и логарифмической фазо-частотной характеристики (ЛФЧХ), которые располагаются друг над другом (рис. 5). На графиках абсциссой является частота в логарифмическом масштабе.

На рис. 5, б по оси ординат отложен фазовый сдвиг выходного сигнала системы относительно входного в градусах. Графические зависимости, изображенные на рис. 5, действительны только в диапазоне частот от нуля до  $f_{relax}$  включительно.

На рис. 5, а показана аппроксимация ЛАЧХ отрезками прямых линий. Из их анализа видно, что динамическое звено можно представить в виде последовательного включения усилительного и интегрирующего устройства. Режим усиления имеет место на частоте, не превышающей частоту среза  $f_c = 0,17 \cdot 10^{15}$  Гц. В данном случае коэффициент усиления в алмазе имеет величину равную 14,1 дБ. Для глаза его величина составляет 12,4 дБ (день) и 13,8 дБ (ночь).

Сопоставление ЛАФХ и ЛФЧХ по величине коэффициента усиления света, показывает, что они мало отличаются друг от друга.

Явление усиления света было обнаружено и в других образцах ограненных алмазах (бриллиантах) природного происхождения с фантазийной окраской — всего исследовано 23 экземпляра. Временные и частотные характеристики глаза человека можно использовать для создания матричных фотоприемников со схожими характеристиками и в качестве эталона при идентификации ограненного алмаза (бриллианта) неизвестного происхождения.

### Заключение

В работе выполнен сравнительный анализ частотных характеристик спектров глаза человека и граненого алмаза (бриллианта) в видимом свете.

Спектры видности глаза человека имеют показатель широкополосности  $\mu$ , равный 0,72 и 0,56 для дневного и ночного зрения соответственно, и люминесценции алмаза ( $\mu = 0,75$ ). В соответствии с существующей классификацией спектры обладают свойствами сверхширокополосных сигналов. Оптическую среду глаза человека и алмаза можно представить в виде динамического звена, имеющего вход и выход. Установлено, что во временной области имеет место усиление света, когда ширина спектра на его полувысоте не превышает некоторого критического значения  $\Delta f_{кр}$ . Это явление проявляется и в частотной области. Коэффициент усиления света у глаза человека составляет 12,4 дБ (дневное зрение), 13,8 дБ (ночное зрение) и алмаза 14,1 дБ. Сопоставление оптических сред глаза человека и алмаза по величине коэффициента усиления света показывает, что они мало отличаются друг от друга. Явление усиления света наблюдается и в других образцах ограненных алмазов (бриллиантах) природного происхождения с фантазийной окраской (23 экз.).

Временные и частотные характеристики глаза человека можно использовать для создания матричных фотоприемников со схожими характеристиками и в качестве эталона при идентификации ограненного алмаза (бриллианта) неизвестного происхождения.

## Литература

1. Григорьев А.А., Гордохина С.В. Определение удельных координат цвета физиологической системы с использованием статистической модели цветового зрения // Полупроводниковая светотехника. 2011. Т. 1. № 9. С. 44–47.
2. Лесных В.Н., Коломбет В.А., Елистратов А.В., Тараненко А.М., Шноль С.Э. О соответствии характеристик спектральной чувствительности фотоприемников сетчатки глаза человека и частот универсальной системы утраивающихся периодов // Светотехника. 2021. № 2. С. 38–42.
3. Колосов О.С., Короленкова В.А., Пронин А.Д., Зуева М.В., Цапенко И.В. Построение амплитудно-частотных характеристик сетчатки глаза и формализация их параметров для использования в системах диагностики // Мехатроника, автоматизация, управление. 2018. Т. 19. № 7. С. 451–457. <https://doi.org/10.17587/mau.19.451-457>
4. Зиенко С.И., Жбанова В.Л. Фурье-анализ спектральных характеристик матричного фотоприемника в частотной и временной области // Прикладная физика. 2021. № 3. С. 39–46. <https://doi.org/10.51368/1996-0948-2021-3-39-46>
5. Зиенко С.И., Жбанова В.Л. Сопоставление параметров СИП-сигналов для сравнения характеристик зрительной системы человека и матричных фотоприемников // Радиотехника и электроника. 2022. Т. 67. №3. в печати. <https://doi.org/10.31857/S0033849422030214>
6. Zienko S.I., Slabkovskii D.S. A comparative analysis of the luminescence spectra of diamonds // *Optics and Spectroscopy*. 2019. V. 127. N 3. P. 564–570. <https://doi.org/10.1134/S0030400X19090273>
7. Zienko S.I., Slabkovskii D.S. Features of the phonon wing of the luminescence of diamond // *Technical Physics Letters*. 2019. V. 45. № 6. P. 537–539. <https://doi.org/10.1134/S1063785019060166>
8. Зиенко С.И., Слабковский Д.С. Релаксация фоновой люминесценции алмаза // Прикладная физика. 2020. № 1. С. 36–41.
9. Зиенко С.И. Определение происхождения алмазов по спектрам люминесценции // Успехи прикладной физики. 2018. Т. 6. № 4. С. 297–300.
10. Лазоренко О.В., Черногор Л.В. Сверхширокополосные сигналы и физические процессы. 1. Основные понятия, модели и методы описания // Радиофизика и радиоастрономия. 2008. Т. 13. № 2. С. 166–195.
11. *Ultra-wideband Radar Technology* / ed. by J.D. Taylor. Boca Ration: CRC Press, 2000. 424 p. <https://doi.org/10.1201/9781420037296>
12. Horiba Jobin Yvon. Raman diffusion and photoluminescence analysis for coloured diamond investigation. Raman application note. 2006 [Электронный ресурс]. URL: <https://www.horiba.com/fileadmin/uploads/Scientific/Documents/Raman/Carbon04.pdf> (дата обращения: 20.09.2021).
13. Shigle J.E. *Gems & Gemology in Review: Synthetic Diamonds*. Carlsbad, California: The Gemological Institute of America, 2005. 294 p.
14. Zaitsev A.M. *Optical Properties of Diamond: A Data Handbook*. Berlin: Springer, 2001. 502 p. <https://doi.org/10.1007/978-3-662-04548-0>
15. Осадько И.С. Исследование электронно-колебательного взаимодействия по структурным оптическим спектрам примесных центров // Успехи физических наук. 1979. Т. 128. № 5. С. 31–66. <https://doi.org/10.3367/UFN.0128.197905b.0031>
16. Зиенко С.И., Слабковский Д.С. Сравнительный анализ спектров объемного вторичного излучения в ограниченных алмазах (бриллиантах) // Вестник МЭИ. 2015. № 5. С. 90–98.
17. Мешков В.В., Матвеев А.Б. Основы светотехники. В 2-х ч. Ч. 2. Физиологическая оптика и колориметрия. М.: Энергоатомиздат, 1989. 432 с.
18. Shishonok E.M., Steeds J.W. On the curve of the density of phonon states for cubic boron nitride (from the results of photoluminescence measurements) // *Physics of the Solid State*. 2007. V. 49. N 9. P. 1744–1748. <https://doi.org/10.1134/S1063783407090223>
19. Зельдович Я.Б., Мышкис А.Л. Элементы прикладной математики. М.: Наука, 1972. 592 с.
20. Kovalenko A.V., Voyk S.M., Plakhtii Ye.G. Sum Decomposition method for gaussian functions comprising an experimental photoluminescence spectrum // *Journal of Applied Spectroscopy*. 2021. V. 88. N 2. P. 357–362. <https://doi.org/10.1007/s10812-021-01182-8>

## References

1. Grigorev A.A., Gordiukhina S.V. Determination of the specific coordinates for the color of the physiological system using a statistical model of color vision. *Solid-State Lighting Magazine*, 2011, vol. 1, no. 9, pp. 44–47. (in Russian)
2. Lesnykh V.N., Kolombet V.A., Elistratov A.V., Taranenko A.M., Shnoll S.E. On the Correspondence between the spectral sensitivity characteristics of human eye retina photo-receivers and the frequencies of the universal period-tripling system. *Light & Engineering*, 2021, vol. 29, no. 5.
3. Kolosov O.S., Korolenkova V.A., Pronin A.D., Zueva M.V., Tsapenko I.V. Obtaining the amplitude-frequency response of the retina and formalization of its parameters for using in diagnostic systems. *Mekhatronika, Avtomatizatsiya, Upravlenie*, 2018, vol. 19, no. 7, pp. 451–457. (in Russian). <https://doi.org/10.17587/mau.19.451-457>
4. Zienko S.I., Zhabanova V.L. Fourier analysis of spectral characteristics of a matrix photodetector in the frequency and time domain. *Applied Physics*, 2021, no. 3, pp. 39–46. (in Russian). <https://doi.org/10.51368/1996-0948-2021-3-39-46>
5. Zienko S.I., Zhabanova V.L. Comparison of the parameters of UWB signals to compare the characteristics of the human visual system and matrix photodetectors. *Radio engineering and electronics*. 2022. Vol. 67. No. 3. <https://doi.org/10.31857/S0033849422030214>
6. Zienko S.I., Slabkovskii D.S. A comparative analysis of the luminescence spectra of diamonds. *Optics and Spectroscopy*, 2019, vol. 127, no. 3, pp. 564–570. <https://doi.org/10.1134/S0030400X19090273>
7. Zienko S.I., Slabkovskii D.S. Features of the phonon wing of the luminescence of diamond. *Technical Physics Letters*, 2019, vol. 45, no. 6, pp. 537–539. <https://doi.org/10.1134/S1063785019060166>
8. Zienko S.I., Slabkovskiy D.S. Energy efficiency of a diamond phonon luminescence relaxation. *Applied Physics*, 2020, no. 1, pp. 36–41. (in Russian)
9. Ziyenko S.I. Determination of the origin of diamonds from the luminescence spectra. *Advances in Applied Physics*, 2018, vol. 6, no. 4, pp. 297–300. (in Russian)
10. Lazorenko O.V., Chernogor L.F. The ultrawideband signals and physical processes. 1. Basic concepts, models and description methods. *Radio Physics and Radio Astronomy*, 2008, vol. 13, no. 2, pp. 166–195. (in Russian)
11. *Ultra-wideband Radar Technology*. Ed. by J.D. Taylor. Boca Ration, CRC Press, 2000, 424 p. <https://doi.org/10.1201/9781420037296>
12. *Horiba Jobin Yvon. Raman diffusion and photoluminescence analysis for coloured diamond investigation. Raman application note*. 2006. Available at: <https://www.horiba.com/fileadmin/uploads/Scientific/Documents/Raman/Carbon04.pdf> (accessed: 20.09.2021).
13. Shigle J.E. *Gems & Gemology in Review: Synthetic Diamonds*. Carlsbad, California: The Gemological Institute of America, 2005, 294 p.
14. Zaitsev A.M. *Optical Properties of Diamond: A Data Handbook*. Berlin, Springer, 2001, 502 p. <https://doi.org/10.1007/978-3-662-04548-0>
15. Osad'ko I.S. Determination of electron-phonon coupling from structured optical spectra of impurity centers. *Soviet Physics Uspekhi*, 1979, vol. 22, no. 5, pp. 311–329. <https://doi.org/10.1070/PU1979v022n05ABEH005496>
16. Zienko S.I., Slabkovskiy D.S. Spectra of volume secondary radiation in polished diamonds comparison study. *Vestnik MEI*, 2015, no. 5, pp. 90–98. (in Russian)
17. Meshkov V.V., Matveev A.B. *Lighting Technology Foundations. Part 2: Physiological Optics and Colorimetry*. Moscow, Jenergoatomizdat Publ., 1989, 432 p. (in Russian)
18. Shishonok E.M., Steeds J.W. On the curve of the density of phonon states for cubic boron nitride (from the results of photoluminescence measurements). *Physics of the Solid State*, 2007, vol. 49, no. 9, pp. 1744–1748. <https://doi.org/10.1134/S1063783407090223>
19. Zeldovich Ia.B., Myshkis A.L. *Elements of Applied Mathematics*. Moscow, Nauka Publ., 1972, 592 p. (in Russian)
20. Kovalenko A.V., Voyk S.M., Plakhtii Ye.G. Sum Decomposition method for gaussian funions comprising an experimental photoluminescence spectrum. *Journal of Applied Spectroscopy*, 2021, vol. 88, no. 2, pp. 357–362. <https://doi.org/10.1007/s10812-021-01182-8>



21. Туманов М.П. Теория управления. Теория линейных систем автоматического управления: учебное пособие. М.: МГИЭМ, 2005. 82 с.

21. Tumanov M.P. *Control Theory. Theory of Linear Systems of Automatic Control*. Moscow, HSE MIEM Publ., 2005, 82 p. (in Russian)

#### Авторы

**Зиенко Станислав Иванович** — доктор технических наук, профессор, профессор, Филиал федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Национальный исследовательский университет «МЭИ» в г. Смоленске, Смоленск, 214013, Российская Федерация, [sc 57204196027](https://orcid.org/0000-0002-8744-2279), <https://orcid.org/0000-0002-8744-2279>, [stanislav-zienko@rambler.ru](mailto:stanislav-zienko@rambler.ru)

**Жбанова Вера Леонидовна** — кандидат технических наук, доцент, доцент, Филиал федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Национальный исследовательский университет «МЭИ» в г. Смоленске, Смоленск, 214013, Российская Федерация, [sc 57190029669](https://orcid.org/0000-0001-7597-0675), <https://orcid.org/0000-0001-7597-0675>, [Vera-zhbanova@yandex.ru](mailto:Vera-zhbanova@yandex.ru)

#### Authors

**Stanislav I. Zienko** — D.Sc., Full Professor, Branch of National Research University Moscow Power Engineering Institute in Smolensk, Smolensk, 214013, Russian Federation, [sc 57204196027](https://orcid.org/0000-0002-8744-2279), <https://orcid.org/0000-0002-8744-2279>, [stanislav-zienko@rambler.ru](mailto:stanislav-zienko@rambler.ru)

**Vera L. Zhbanova** — PhD, Associate Professor, Associate Professor, Branch of National Research University Moscow Power Engineering Institute in Smolensk, Smolensk, 214013, Russian Federation, [sc 57190029669](https://orcid.org/0000-0001-7597-0675), <https://orcid.org/0000-0001-7597-0675>, [Vera-zhbanova@yandex.ru](mailto:Vera-zhbanova@yandex.ru)

*Статья поступила в редакцию 31.08.2021*

*Одобрена после рецензирования 26.10.2021*

*Принята к печати 30.11.2021*

*Received 31.08.2021*

*Approved after reviewing 26.10.2021*

*Accepted 30.11.2021*



Работа доступна по лицензии  
Creative Commons  
«Attribution-NonCommercial»