

УДК 681.586 (075)

doi: 10.21685/2072-3059-2024-3-10

Источник питания беспроводных устройств информационно-измерительных и управляющих систем на основе усовершенствованного пьезоэлектрического виброгенератора

В. А. Бардин¹, В. С. Волков², С. Н. Базыкин³,
Н. А. Базыкина⁴, К. С. Самохина⁵, И. Н. Урваев⁶

^{1,2,3,4,5,6}Пензенский государственный университет, Пенза, Россия

¹vit-bardin@yandex.ru, ²vadimv_1978@mail.ru, ³cbazykin@yandex.ru,

⁴nelli.baz@mail.ru, ⁵kristina.bazykina@mail.ru, ⁶iurvaev@mail.ru

Аннотация. *Актуальность и цели.* В последние годы ведется поиск альтернативных источников электроэнергии, которые используют природные и техногенные источники энергии, такие как солнечное излучение, движение воды, ветер, вибрации и др. В настоящее время солнечные батареи и ветрогенераторы находят широкое применение в различных отраслях промышленности. Однако существуют также объекты с малым энергопотреблением, такие как мелкая бытовая техника, мобильные телефоны, беспроводные системы для диагностики и мониторинга технического состояния объектов, другие автономные системы. Целью исследования является разработка пьезоэлектрического генератора изгибного типа с чувствительным элементом, сделанным из материала цирконат-титанат свинца с помощью микроэлектронной кремниевой технологии. *Материалы и методы.* Для исследования характеристик пьезоэлектрических генераторов изгибного типа были использованы методы расчета электрических цепей переменного тока, теории колебаний, а также схемотехническое моделирование эквивалентных электрических цепей при помощи программы MathCad, методы решения дифференциальных уравнений. *Результаты.* Была решена задача увеличения выходной мощности путем нахождения длины электрода, равной $x \approx 0,44 \cdot L$ (L – длина балки), т.е. покрывающего 44 % балки от зажатого конца; определены оптимальные геометрические параметры: длина $L = 60 \cdot 10^{-3}$ м, ширина $W = 3 \cdot 10^{-3}$ м, толщина пьезоэлектрического слоя $H = 1,5 \cdot 10^{-6}$ м, толщина подложки $h = 250 \cdot 10^{-6}$ м. В результате получена максимальная выходная мощность балочного пьезогенератора, достигающая 9,2 мВт. *Выводы.* Проведено математическое моделирование зависимостей мощности от геометрических параметров и получены соответствующие графики. Рассчитаны из условия прочности момент сопротивления, максимальный момент в сечении, сила, действующая на балку. Разработан пьезоэлектрический генератор изгибного типа с чувствительным элементом, изготовленным из материала цирконат-титанат свинца с помощью микроэлектронной кремниевой технологии.

Ключевые слова: пьезоэлектрический преобразователь энергии, виброгенератор, беспроводной источник питания

Для цитирования: Бардин В. А., Волков В. С., Базыкин С. Н., Базыкина Н. А., Самохина К. С., Урваев И. Н. Источник питания беспроводных устройств информационно-измерительных и управляющих систем на основе усовершенствованного пьезоэлектрического виброгенератора // Известия высших учебных заведений. Поволжский регион. Технические науки. 2024. № 3. С. 98–114. doi: 10.21685/2072-3059-2024-3-10

Power supply for wireless devices of information measuring and control systems based on an improved piezoelectric vibration generator

V.A. Bardin¹, V.S. Volkov², S.N. Bazykin³,
N.A. Bazykina⁴, K.S. Samohina⁵, I.N. Urvaev⁶

^{1,2,3,4,5,6}Penza State University, Penza, Russia

¹vit-bardin@yandex.ru, ²vadimv_1978@mail.ru, ³cbazykin@yandex.ru,
⁴nelli.baz@mail.ru, ⁵kristina.bazykina@mail.ru, ⁶iurvaev@mail.ru

Abstract. *Background.* In recent years, there has been a search for alternative sources of electricity that use natural and man-made energy sources, such as solar radiation, water movement, wind, vibration and others. On an industrial scale, solar panels and wind power plants are already widely used to harness environmental energy. However, there are also objects with low energy consumption, such as small household appliances, mobile phones, wireless systems for diagnosing and monitoring the technical condition of objects, and other autonomous systems. The purpose of the research is to develop a bending type piezoelectric generator with a sensing element made of lead zirconate titanate material using silicon microelectronic technology. *Materials and methods.* To study the characteristics of piezoelectric generators of the bending type, methods for calculating alternating current electrical circuits, the theory of oscillations, as well as circuit modeling of equivalent electrical circuits using the MathCad program, and methods for solving differential equations were used. *Results.* The problem of increasing the output power was solved by finding the length of the electrode reaching its peak $x \approx 0.44 \cdot L$ (L is the length of the beam), that is, covering 44 % of the beam from the clamped end, and the optimal geometric parameters were determined: length $L = 60 \cdot 10^{-3}$ m, width $W = 3 \cdot 10^{-3}$ m, thickness of the piezoelectric layer $H = 1,5 \cdot 10^{-6}$ m, thickness of the substrate $h = 250 \cdot 10^{-6}$ m. As a result, the maximum output power of the beam piezoelectric generator is obtained, reaching 9.2 μ W. *Conclusions.* Mathematical modeling of the dependences of power on geometric parameters was carried out and graphs were obtained. The moment of resistance, the maximum moment in the section, and the force acting on the beam were calculated from the strength conditions. A bending type piezoelectric generator with a sensitive element made of PZT material using microelectronic silicon technology has been developed.

Keywords: piezoelectric energy converter, vibration generator, wireless power supply

For citation: Bardin V.A., Volkov V.S., Bazykin S.N., Bazykina N.A., Samohina K.S., Urvaev I.N. Power supply for wireless devices of information measuring and control systems based on an improved piezoelectric vibration generator. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Povolzhskiy region. Tekhnicheskie nauki = University proceedings. Volga region. Engineering sciences.* 2024;(3):98–114. (In Russ.). doi: 10.21685/2072-3059-2024-3-10

Введение

Актуальной задачей является поиск альтернативных источников электроэнергии, которые используют природные и техногенные источники энергии, такие как солнечное излучение, движение воды, ветер, вибрации и др. В промышленных масштабах солнечные батареи и ветряные электростанции уже широко используются для использования энергии окружающей среды. Однако существуют также объекты с малым энергопотреблением, такие как мелкая бытовая техника, мобильные телефоны, беспроводные системы для диагностики и мониторинга технического состояния объектов, другие автономные системы. Все более популярными становятся «умные технологии», «интеллектуальные датчики», сервис-ориентированные архитектуры информационного взаимодействия датчиков для автоматической компенсации по-

грешностей [1]. Если на одном микро модуле объединить измеритель, усилитель, обработчик сигналов и радиомодуль, то появляется возможность создания автономных беспроводных информационно-измерительных и управляющих систем.

Для обеспечения автономности датчиков необходимо наличие собственного источника энергии, но традиционные химические источники энергии (батарея или аккумулятор) не обладают компактными размерами и требуют периодической замены.

Потребляемая мощность современных беспроводных устройств имеет значения от единиц микроватт, поэтому появляется возможность использования в качестве источника питания преобразователей энергии из окружающей среды (технология energy harvesting). Целью исследования является разработка пьезоэлектрического генератора изгибного типа с чувствительным элементом, сделанным из материала цирконат-титанат свинца (ЦТС) с помощью микроэлектронной кремниевой технологии.

Материалы и методы

Пьезоэлектрические преобразователи являются отличным альтернативным источником электроэнергии благодаря использованию распространенных в окружающей среде механических колебаний. Они обладают такими преимуществами, как высокая удельная мощность, компактные размеры, простота конструкции и технологии производства, легкость в использовании. Удельная мощность пьезогенератора зависит от его размеров и параметров входного сигнала. Пьезоэлектрические устройства имеют более широкий спектр применения по уровню удельной мощности, которая зависит от его размеров и параметров входного сигнала.

На рис. 1 показана схема преобразования энергии пьезоэлектрическим генератором. На рис. 2 показана электрическая схема системы получения и хранения энергии на основе пьезогенератора (ПГ). Вибрации, сопровождающие естественные и техногенные процессы и явления, амплитуда которых F изменяется с частотой f , вызывают колебания пьезопреобразователя, на выходе которого появляется электрический ток $I(t)$, пропорциональный амплитуде вибрации, выпрямитель, регулятор и накопитель преобразуют ток в однополярное напряжение $U(t)$, которое выделяет на сопротивлении нагрузки электрическую мощность $P(t)$.

На первом этапе переменное выходное напряжение преобразуется в постоянное с помощью выпрямительного моста. Далее это постоянное напряжение используется для зарядки батареи или накопительного конденсатора, которые подключены к нагрузке. Для оптимизации выходной мощности и согласования с нагрузкой можно использовать промежуточный преобразователь постоянного напряжения с возможностью повышения или понижения (рис. 3).

Результаты

Из существующих материалов, имеющих пьезоэлектрические свойства, широкое распространение получил цирконат-титанат свинца из-за его высокого пьезомодуля, значительной диэлектрической проницаемости, малой гигроскопичности, сравнительно большой электрической и механической проч-

ности. Для минимизации размеров пьезоэлементов при их изготовлении возможно использование кремниевых микроэлектронных технологий. Но так как кремний не обладает пьезоэлектрическими свойствами, то эти свойства ему придаются путем нанесения кристаллических слоев пьезоматериалов. Обычно в этом процессе применяются такие материалы, как оксид цинка (ZnO), нитрид алюминия (AlN) и цирконат-титанат свинца ($Pb[Zr_x, Ti_{1-x}]O_3$). Тонкие пленки из нитрида алюминия обычно производятся методом химического осаждения из газовой фазы или реактивной эпитаксии. Более перспективным материалом для создания пьезогенераторов являются тонкие пленки из ЦТС, так как они обладают наибольшим пьезомодулем.

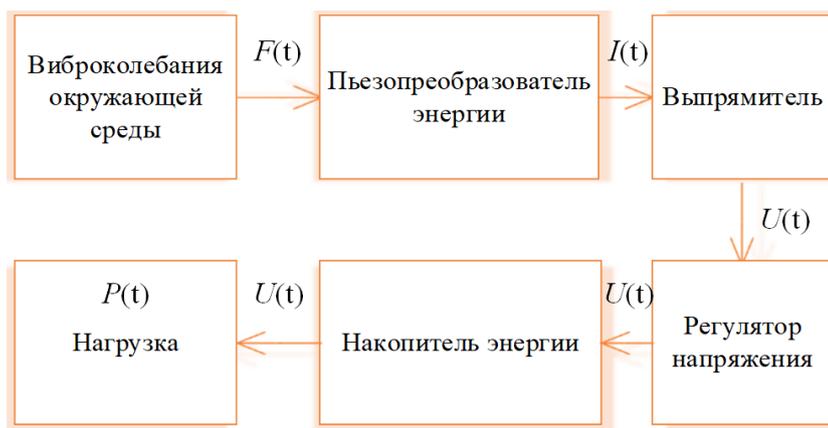


Рис. 1. Схема преобразования энергии пьезоэлектрическим генератором

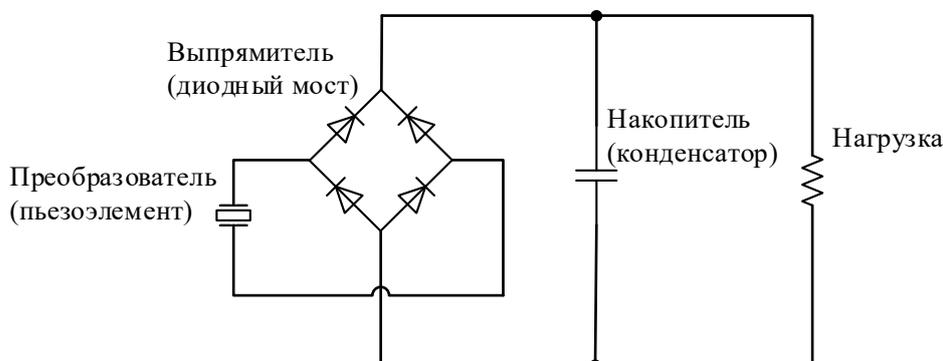


Рис. 2. Электрическая схема накопительной системы с использованием пьезогенератора

Эквивалентная электрическая схема пьезоэлемента показана на рис. 3, схема состоит из конденсатора C_0 – статическая емкость между электродами пьезоэлемента, катушки индуктивности L – динамическая индуктивность, конденсатора C – динамическая емкость, и резистора R – динамическое сопротивление.

Основными конструктивными типами пьезоэлектрических преобразователей являются балочные и мембранные. Балочный преобразователь состо-

ит из упругого элемента, который представляет собой консольную балку в виде подложки с покрытием из пьезоэлектрического материала и двумя электродами (рис. 4). Один конец упругого элемента жестко прикреплен к массивному основанию, что позволяет ему осуществлять изгибные колебания.

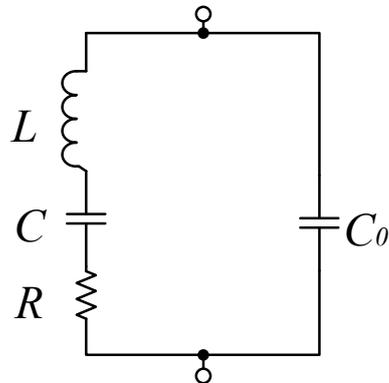


Рис. 3. Эквивалентная электрическая схема пьезоэлемента

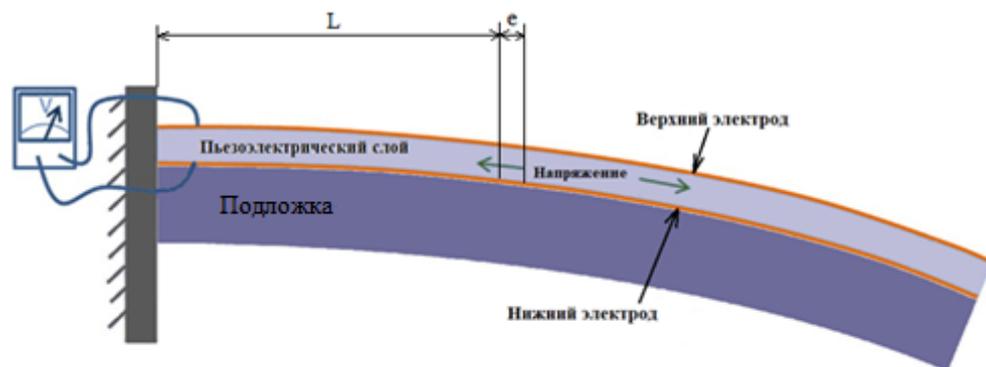


Рис. 4. Пьезокерамический преобразователь энергии

В большинстве известных конструкций пьезопреобразователей весь пьезоэлектрический слой с двух сторон покрывают два электродных слоя, чтобы извлечь как можно больше энергии. Однако компьютерное моделирование распределения деформации в пьезоэлектрическом слое зажатой балки показало, что при ее колебании максимальная деформация наблюдается в месте заземления и очень незначительна – на свободном конце (рис. 5).

При этом большая площадь электрода приводит к большой емкости и малому внутреннему сопротивлению. Соответственно электродами должна быть покрыта область пьезоэлектрика вблизи зажатого конца (из-за высокой плотности деформации в этой области), но свободный конец целесообразно электродами не закрывать. Таким образом, из-за неравномерного распределения деформации вдоль оси x должно существовать оптимальное значение площади электрода, позволяющее максимизировать генерируемую мощность. Для проверки этой гипотезы выполним математическое моделирование пьезоэлектрического преобразователя.

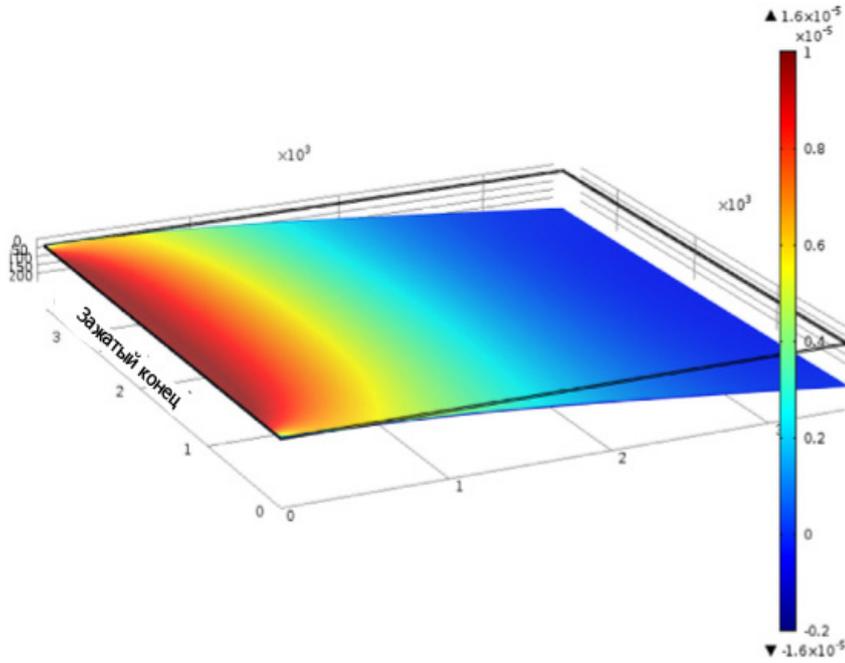


Рис. 5. Распределение деформации балки

Особенностью пьезоэлектрического преобразователя является то, что он проявляет свойства механической и электрической систем. Во время вибрации пьезоэлемента генерируется переменное напряжение, которое определяется по формуле

$$U = \frac{-dt}{\epsilon} \sigma, \quad (1)$$

где t – толщина пьезоэлектрического материала; ϵ – диэлектрическая проницаемость среды; σ – механическое напряжение.

Электрический заряд, который вырабатывает пьезоэлектрический элемент под действием внешнего напряжения, формирует поток, который работает как источник тока и заряжает конденсатор, образуемый двумя электродными слоями (обкладками) на противоположных поверхностях пьезоэлемента. Запишем выражение для управляющего синусоидального сигнала источника тока:

$$I = I_0 \sin 2\pi f_0 t, \quad (2)$$

где f_0 – частота возбуждения.

Формула электрической мощности, генерируемой пьезоэлектрическим генератором, записывается в виде

$$P = \frac{1}{2} I_0^2 Z_{int}, \quad (3)$$

где I_0 – амплитуда источника тока; Z_{int} – эквивалентное внутреннее сопротивление.

Рассчитаем максимальную выходную мощность и найдем оптимальную длину электрода пьезоэлектрического преобразователя в виде зажатой балки.

На рис. 6 показана консольная балка с геометрическими параметрами, которые будут использоваться в расчетах.

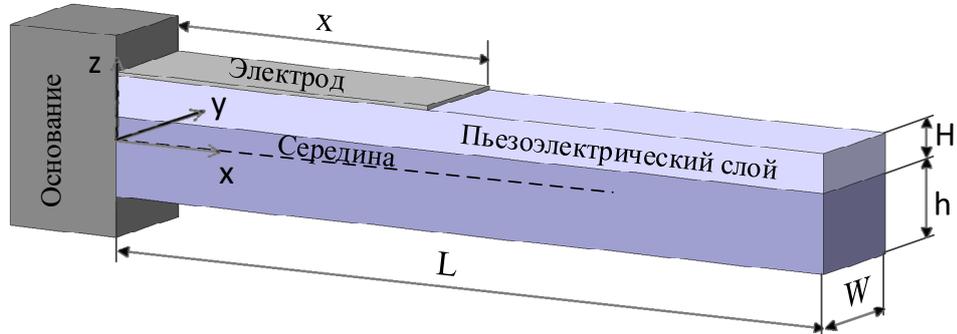


Рис. 6. Геометрические параметры балки (L – длина, W – ширина, h – толщина подложки, H – толщина пьезоэлектрического слоя)

На зажатой балке Эйлера – Бернулли происходит смещение по оси z в произвольной точке x , которая выражается в виде многочлена q :

$$EI \frac{d^4 \omega(x)}{dx^4} = q(t), \quad (4)$$

где E – модуль Юнга; I – осевой момент инерции; $\omega(x)$ – поперечное смещение балки в произвольной точке x .

Осевой момент инерции рассчитывается по формуле

$$I = \int \int z^2 dydz = \int_{-\frac{h+H}{2}}^{\frac{h+H}{2}} \int_{-\frac{W}{2}}^{\frac{W}{2}} \frac{W}{2} z^2 dydz = \frac{W(h+H)^3}{12}. \quad (5)$$

Предполагая, что сила возбуждения $F = F_0 \sin \omega_0 t$ равномерно распределена вдоль оси x , смещение q может быть выражено как

$$q(t) = \frac{F}{L} = \frac{F_0}{L} \sin \omega_0 t. \quad (6)$$

Из теории изгиба балки Эйлера – Бернулли выражение (6) не зависит от x , y или z и его можно упростить:

$$\frac{d^4 \omega(x)}{dx^4} = \frac{q}{EI} = A. \quad (7)$$

После интегрирования формулы (7) получаем следующие выражения:

$$\frac{d^3 \omega(x)}{dx^3} = Ax + C_1; \quad (8)$$

$$\frac{d^2\omega(x)}{dx^2} = \frac{1}{2}Ax^2 + C_1x + C_2; \quad (9)$$

$$\frac{d\omega(x)}{dx} = \frac{1}{6}Ax^3 + \frac{1}{2}C_1x^2 + C_2x + C_3; \quad (10)$$

$$\omega(x) = \frac{1}{24}Ax^4 + \frac{1}{6}C_1x^3 + \frac{1}{2}C_2x^2 + C_3x + C_4. \quad (11)$$

Исходя из граничных условий, начальные значения могут быть установлены как $\omega' = \omega = 0$ при зажатом конце и $\omega''' = \omega'' = 0$ на свободном конце. Таким образом, получены следующие четыре уравнения:

$$\frac{d^3\omega(L)}{dx^3} = 0; \quad (12)$$

$$\frac{d^2\omega(L)}{dx^2} = 0;$$

$$\frac{d\omega(0)}{dx} = 0;$$

$$\omega(0) = 0.$$

С помощью этих уравнений найдем: $C_1 = -A, C_2 = \frac{1}{2}AL^2, C_3 = 0, C_4 = 0$.

Подставим эти параметры в формуле (11), получим:

$$\omega(x) = \frac{1}{24}Ax^4 - \frac{1}{6}ALx^3 + \frac{1}{4}AL^2x^2; \quad (13)$$

$$\frac{d^2\omega(x)}{dx^2} = \frac{1}{2}Ax^2 - ALx + \frac{1}{2}AL^2. \quad (14)$$

Прочность при изгибе балки можно выразить как

$$\sigma_{(x,y,z)} = \frac{Mz}{I}, \quad (15)$$

где M – изгибающий момент,

$$M = -EI \frac{d^2\omega(x)}{dx^2}. \quad (16)$$

Отсюда напряжение σ можно записать как

$$\begin{aligned} \sigma_{(x,y,z)} &= -zE \frac{d^2\omega(x)}{dx^2} = \\ &= -zE \left(\frac{1}{2}Ax^2 - ALx + \frac{1}{2}AL^2 \right) - z \frac{q}{I} \left(\frac{1}{2}x^2 - Lx + \frac{1}{2}L^2 \right), \end{aligned} \quad (17)$$

где $\sigma(x, y, z)$ – напряжение на единицу площади (Н/м^2), а переменная z распространяется от начала координат вдоль оси z , как показано на рис. 6.

Для того чтобы преобразовать кинетическую энергию в электрическую энергию, при расчете используем пьезоэлектрический модуль d_{31} и выразим количество заряда, генерируемого деформацией:

$$Q_{(x,y,z)} = d_{31}\sigma_{(x,y,z)} = -zd_{31} \frac{q}{I} \left(\frac{1}{2}x^2 - Lx + \frac{1}{2}L^2 \right). \quad (18)$$

Этот заряд генерируется на единицу площади $dx dy$ в пьезоэлектрическом материале. Для расчета суммарного заряда по двум слоям электродов (верхнему и нижнему), проинтегрируем $Q_{(x,y,z)}$ вдоль x, y для соответствующих значений z относительно середины балки $z_B = \frac{h+H}{2}$ и $z_H = \frac{h-H}{2}$ (предполагаем, что основание толще пьезоэлектрического слоя $h > H$):

$$Q_{\text{общ}} = \int_0^x \int_0^W Q_{(x,y,z)} dy dx, \quad (19)$$

$$\begin{aligned} Q_{\text{общ}} &= \int_0^x \int_0^W -Hd_{31} \frac{q(t)}{I} \left(\frac{1}{2}x^2 - Lx + \frac{1}{2}L^2 \right) dy dx = \\ &= -q(t)d_{31} \frac{WH}{I} \left(\frac{1}{6}x^3 - \frac{1}{2}Lx^2 \pm \frac{1}{2}L^2x \right). \end{aligned} \quad (20)$$

По формуле (8), сила возбуждения $q(t)$ является функцией времени, следовательно генерируемый заряд:

$$Q_{\text{общ}} = -d_{31} \frac{F_0}{L} \frac{WH}{I} \left(\frac{1}{6}x^3 - \frac{1}{2}Lx^2 + \frac{1}{2}L^2x \right) \sin \omega_0 t. \quad (21)$$

Пьезоэлектрический преобразователь моделируется как источник тока I_p , включенный параллельно с конденсатором C_p и резистором R_p . Конденсатор C_p вместе с резистором R_p можно рассматривать как внутреннее сопротивление Z_p пьезогенератора. Генерируемая им мощность вычисляется по формуле

$$P_0 = \frac{1}{2} I_p^2 Z_p. \quad (22)$$

Выразим I_p, Z_p, C_p и R_p . Так как суммарный заряд между двумя электродами находится в формуле (21), то генерируемый ток может быть получен путем вычисления производной от заряда по времени:

$$\begin{aligned} I_p &= \frac{dQ_{\text{общ}}}{dt} = -d_{31} \frac{F_0 \omega_0}{L} \frac{WH}{I} \times \\ &\times \left(\frac{1}{6}x^3 - \frac{1}{2}Lx^2 + \frac{1}{2}L^2x \right) \cos(\omega_0 t) = I_0 \cos(\omega_0 t). \end{aligned} \quad (23)$$

Емкость и сопротивление могут быть выражены согласно геометрическим размерам слоя электрода:

$$C_p = \varepsilon_r \varepsilon_0 \frac{xW}{H}; \quad (24)$$

$$R_p = \rho \frac{H}{xW}, \quad (25)$$

где ε_r – диэлектрическая постоянная пьезоэлектрического материала; ε_0 – диэлектрическая постоянная.

Выразим внутренний импеданс:

$$z_p = \frac{C_p}{R_p} = \frac{\frac{R_p}{2\pi C_p}}{R_p + \frac{1}{j\omega_0 C_p}} = \frac{\rho}{\sqrt{1 + \omega_0^2 \varepsilon_r^2 \varepsilon_0^2 \rho^2}} \frac{H}{xW}. \quad (26)$$

Таким образом, мощность, генерируемая пьезоэлектрическим преобразователем, равна

$$P_0 = \frac{1}{2} \left(-d_{31} \frac{F_0 \omega_0}{L} \frac{WH}{I} \left(\frac{1}{6} x^3 - \frac{1}{2} Lx^2 + \frac{1}{2} L^2 x \right) \right)^2 \frac{\rho}{\sqrt{1 + \omega_0^2 \varepsilon_r^2 \varepsilon_0^2 \rho^2}} \frac{H}{xW}. \quad (27)$$

Для определения оптимальной длины электрода x на первом этапе проведем математический расчет генерируемой мощности в пьезоэлектрическом преобразователе по формуле (27).

В качестве источников вибрации для пьезогенераторов предлагается использовать вибрации низкочастотного диапазона различных исполнительных устройств, содержащих узлы и детали, совершающие вращательные, возвратно-поступательные и колебательные движения [3, 4]. Например, СВЧ-печь генерирует вибрацию на частоте $f = 121$ Гц ($\omega = 2\pi f = 760$ рад/с). Зададим предварительные габаритные размеры балки: ширина $W = 10$ мм, длина $L = 100$ мм, толщина пьезоэлектрического слоя $H = 0,001$ мм, толщина подложки $h = 0,4$ мм. Для материала цирконата-титаната-свинца ЦТС-19 выбраны следующие физические параметры: допускаяемое напряжение при изгибе балки составляет $\sigma_x = 36 \cdot 10^6$ Н/м², диэлектрическая проницаемость $\varepsilon = 1700$ Кл/Н, электрическая постоянная $\varepsilon_0 = 8,85 \cdot 10^{-12}$ Кл² / (Н · м²), пьезоэлектрический модуль $d_{31} = 155 \cdot 10^{-12}$ Кл/Н, плотность $\rho = 7800$ Кг/м³ [5].

Для нахождения максимальной силы, действующей на балку из условия прочности, рассчитаем момент сопротивления сечения балки:

$$W_x = \frac{W \cdot (H + h)^2}{6} = \frac{0,01 \cdot (0,000001 + 0,0004)^2}{6} = 2,68 \cdot 10^{-10} \text{ м}^3.$$

Максимальный момент сопротивления в сечении:

$$M_{\max} = \sigma_x W_x = 36000000 \frac{\text{Н}}{\text{м}^2} \cdot 0,000000000268 \text{ м}^3 = 9,648 \cdot 10^{-3} \text{ Нм}.$$

Из уравнения $M_{\max} = F_0 \frac{L^2}{2}$ определим максимальную силу, действующую на преобразователь:

$$F_0 = \frac{2M_{\max}}{L^2} = \frac{2 \cdot 0,009648}{0,06^2} = 5,36 \text{ Н}.$$

Упростим формулу (27), выражение для мощности пьезогенератора:

$$P_0 = \frac{2F_0^2 H^3 \rho d_{31}^2 \omega_0^2 (3L^2 x - 3Lx^2 + x^3)^2}{L^2 W x \sqrt{\rho^2 \omega_0^2 \epsilon_0^2 \epsilon_r^2 + 1} (H + h)^6}. \quad (28)$$

Построим график зависимости величины мощности пьезогенератора $P(x)$ от длины электрода x (рис. 7) и определим ее оптимальное значение.

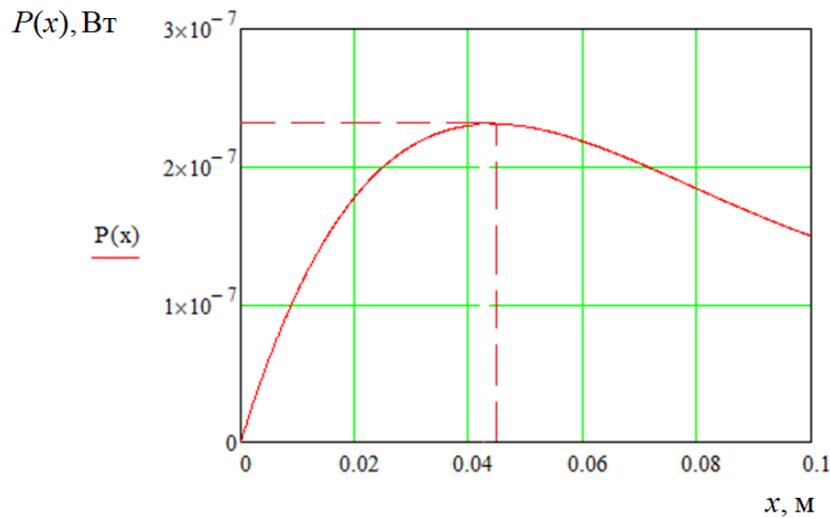


Рис. 7. График зависимости величины $P_0(x)$

По графику (рис. 7) можно увидеть, что выходная электрическая мощность балки достигает своего пика при длине электрода $x \approx 0,044 L$ (L – длина балки), т.е. при слое электрода, покрывающем 44 % балки от зажатого конца, мы получим максимальную выходную мощность, равную $P_0 = 2,3 \cdot 10^{-7}$ Вт. Для получения максимальных показателей мощности пьезогенератора проведем оптимизацию его размеров. Для этого определим выражения зависимостей мощности пьезогенератора от отдельных конструктивных параметров $P_0(L)$, $P_0(W)$, $P_0(h)$, $P_0(H)$ (длины, ширины, толщины подложки и пьезослоя), как производных формулы (28) (при оптимальной длине электрода $x = 0,44L$) и построим графики их зависимостей для выявления оптимальных значений.

По графику зависимости $P_0(L)$ определим влияние длины балки на выходную мощность (рис. 8,а). По графику зависимости $P_0(W)$ определим влияние ширины балки на выходную мощность (рис. 8,б). По графику зависимости $P_0(h)$ определим влияние толщины слоя подложки балки на выходную

мощность (рис. 8, *б*). По графику зависимости $P_0(H)$ определим влияние толщины пьезоэлектрического слоя балки на выходную мощность (рис. 8, *з*).

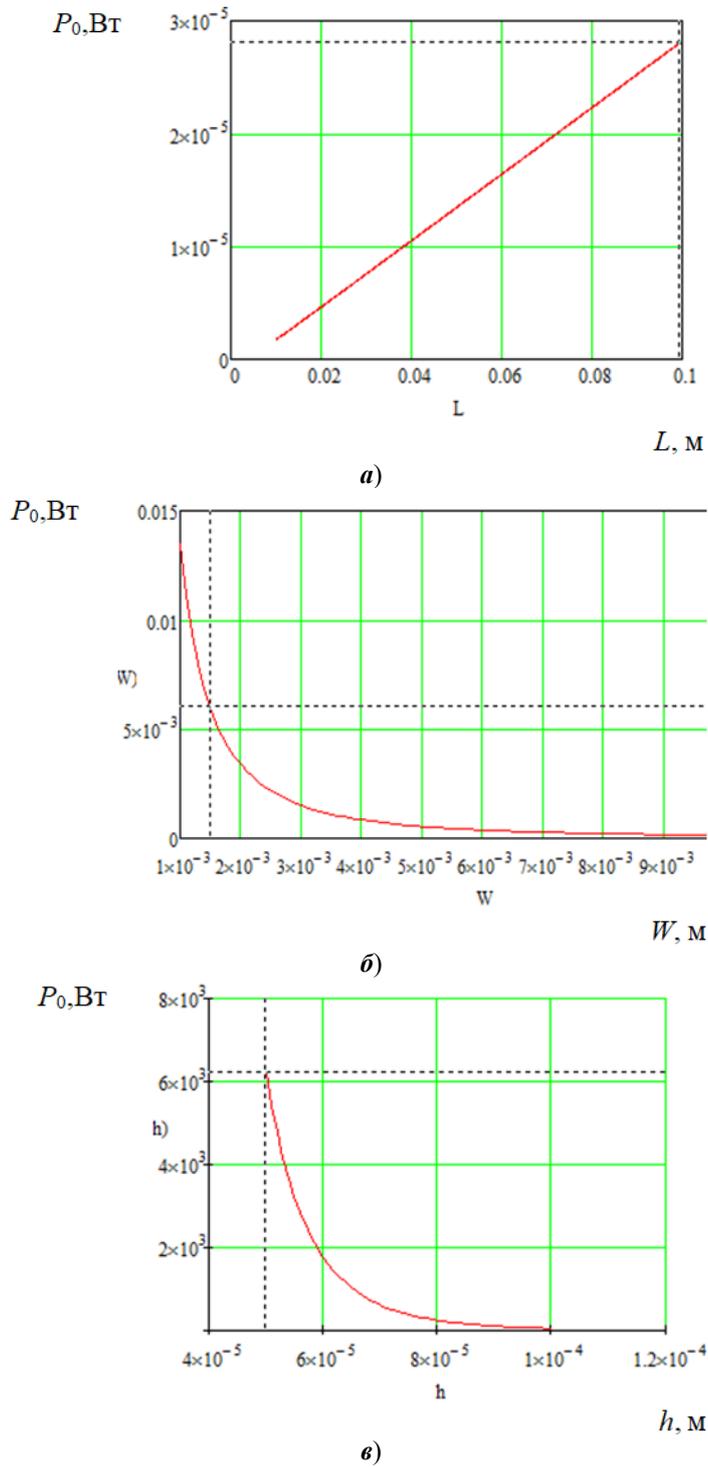
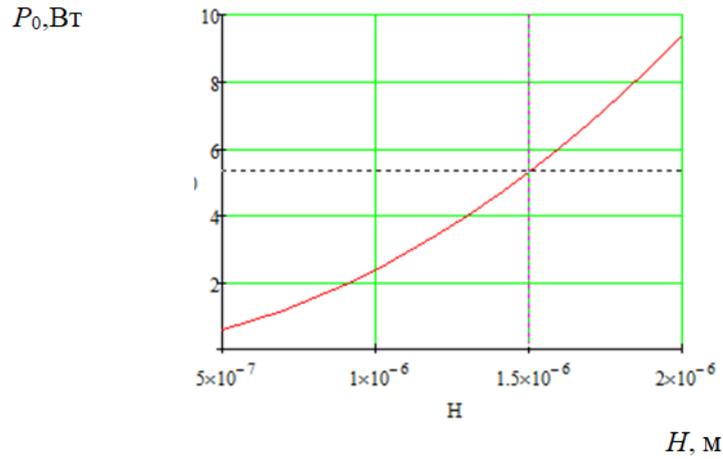


Рис. 8. Графики зависимости: *а* – величины $P_0(L)$; *б* – величины $P_0(W)$; *в* – величины $P_0(h)$; *з* – величины $P_0(H)$



з)

Рис. 8. Окончание

Из полученных графиков можно сделать вывод, что с увеличением длины балки возрастает значение мощности, но при этом балка испытывает большие нагрузки, что может привести к излому. Из условия прочности граничное значение длины $L = 100 \cdot 10^{-3}$ м. В зависимости от ширины балки значение мощности уменьшается. Граничным значением ширины будет $W = 1,5 \cdot 10^{-3}$, так как меньший размер сложнее изготовить технологически [6]. При увеличении толщины слоя подложки уменьшается выходная мощность, а с увеличением толщины пьезоэлектрического слоя увеличиваются; граничное значение $h = 5 \cdot 10^{-5}$, граничное значение $H = 1,5 \cdot 10^{-6}$.

Исходя из технологических ограничений выбираем следующие параметры пьезогенератора: длина $L = 60 \cdot 10^{-3}$ м, ширина $W = 3 \cdot 10^{-3}$ м, толщина пьезоэлектрического слоя $H = 1,5 \cdot 10^{-6}$ м, толщина подложки $h = 250 \cdot 10^{-6}$ м. Построим график зависимости выходной мощности балочного пьезогенератора от длины электрода x для данной конструкции (рис. 9), откуда получаем, что максимальная выходная мощность составит $P_0 = 9,2 \cdot 10^{-6}$ Вт при длине электрода $x = 0,026$ мм.

Определим зависимость электрической мощности пьезогенератора путем добавления к электроду (L) небольшого (единичного) участка покрытия (e) от напряжения и деформации в области e на единицу длины.

Запишем формулу для выходной мощности в зоне L с учетом выражений для эквивалентного источника тока $I = \frac{dQ}{dt} = \omega d_{31} \sigma L \cos \omega t$ и внутренне-

го импеданса $Z = \frac{1}{\omega CL}$:

$$P_L = \frac{\omega^2 d_{31}^2 \sigma^2 L^2}{2} \cdot \frac{1}{\omega CL} = \frac{\omega d_{31}^2 \sigma^2 L}{2C}. \quad (29)$$

Тогда выходная мощность пьезогенератора с учетом электрода дополнительной области e будет равна:

$$P_{L+e} = \frac{\omega^2 d_{31}^2 \sigma^2 (L + \alpha e)^2}{2} \cdot \frac{1}{\omega C (L + e)} = \frac{\omega d_{31}^2 \sigma^2 (L + \alpha e)^2}{2C (L + e)}, \quad (30)$$

где $0 < \alpha < 1$ – коэффициент, определяющий механическое напряжение в зоне e , $\sigma_e = \alpha \sigma_L$.

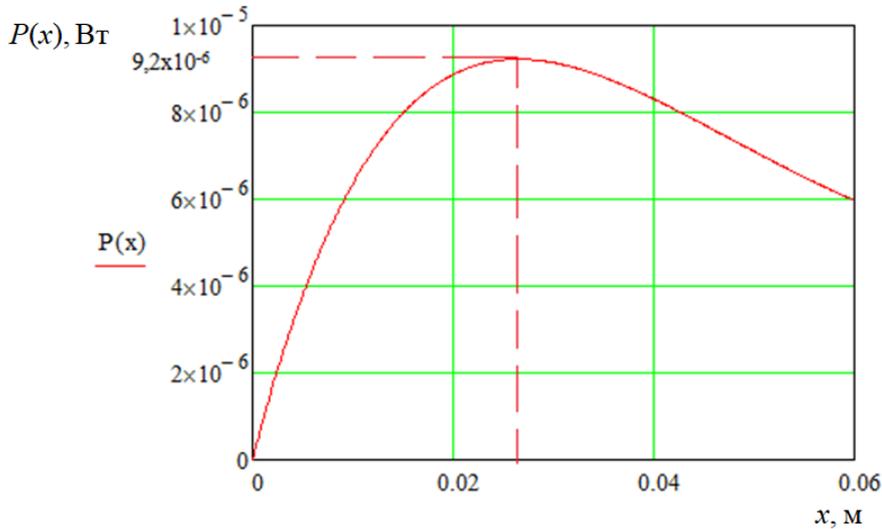


Рис. 9. График зависимости величины $P_0(x)$ для оптимизированного варианта конструкции пьезогенератора

Сравним выходные мощности с дополнительным электродом $L + e$ и с исходной длиной электрода L :

$$\frac{\omega d_{31}^2 \sigma^2 (L + \alpha e)^2}{2C (L + e)} > \frac{\omega d_{31}^2 \sigma^2 L}{2C} \Rightarrow \alpha^2 \frac{e}{L} + 2\alpha > 1.$$

Так как множителем e/L можно пренебречь, то получим, что $\alpha > 0,5$. Таким образом, чтобы максимизировать выходную мощность пьезогенератора, электродный слой должен покрывать поверхность от места зажима (с максимальной деформацией) до границы, где деформация на единицу длины составляет половину средней деформации площади, покрытой электродным слоем.

Еще один вариант увеличения выходной мощности – это присоединение на свободный конец балки груза (инертной массы), с помощью которого можно регулировать собственную частоту кантилевера (рис. 10).

Если сформировать секции из 10 таких пьезоэлектрических кантилеверов (рис. 10,а), то можно будет получить порядка 0,1 мВт накапливаемой энергии, которой будет достаточно, для того чтобы обеспечить работу беспроводных устройств [7]. Кроме того, можно дополнительно увеличить выходную мощность такого пьезогенератора в 2 раза и более, если расположить пьезоэлементы в двух или трех взаимно перпендикулярных плоскостях (рис. 10,б). Такая конструкция позволит преобразовывать энергию не только поперечных, но и продольных колебаний.

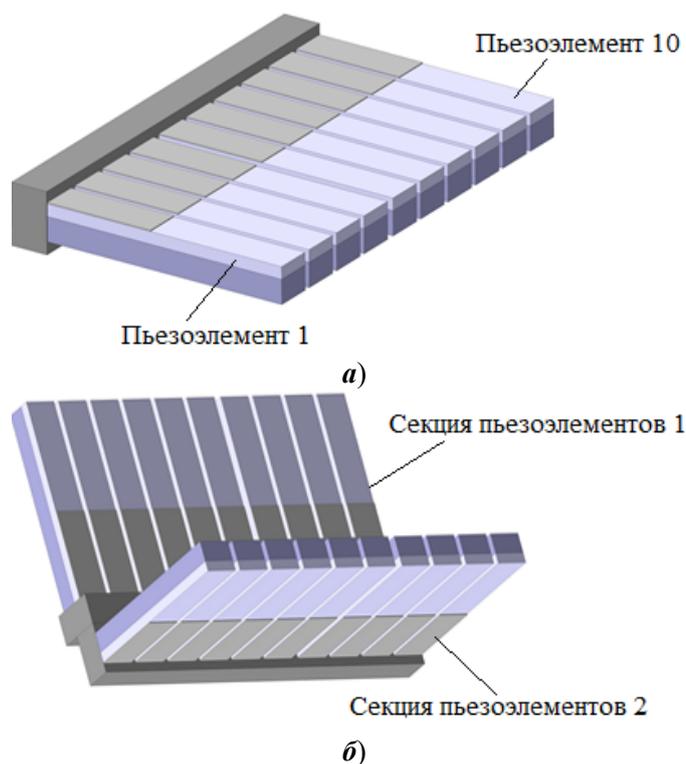


Рис. 10. Модель секции из 10 пьезоэлектрических кантилеверов (а); модель двух секций пьезоэлектрических кантилеверов, расположенных в двух взаимно перпендикулярных плоскостях (б)

Заключение

В ходе исследования был разработан пьезоэлектрический генератор изгибного типа с чувствительным элементом, сделанным из материала ЦТС с помощью микроэлектронной кремниевой технологии. Было проведено математическое моделирование зависимостей мощности от геометрических параметров и получены графики. Рассчитаны из условия прочности момент сопротивления, максимальный момент в сечении, сила, действующая на балку. Описаны материалы, методы получения, способы термообработки. Была определена зависимость выходной мощности пьезогенератора от длины электрода и найдена оптимальная длина электрода $x \approx 0,44 \cdot L$ (L – длина балки), при которой достигается максимальная мощность (т.е. электрод должен покрывать 44 % балки от зажатого конца). Исходя из условий прочности и технологических ограничений выбраны оптимальные геометрические параметры балочного пьезогенератора: длина $L = 60 \cdot 10^{-3}$ м, ширина $W = 3 \cdot 10^{-3}$ м, толщина пьезоэлектрического слоя $H = 1,5 \cdot 10^{-6}$ м, толщина подложки $h = 250 \cdot 10^{-6}$ м. Определено, что максимальная выходная мощность предложенного пьезогенератора достигает 9,2 мкВт.

Список литературы

1. Уорден К. Новые интеллектуальные материалы и конструкции. Свойства и применение. М. : Техносфера. 2006. С. 119–125.

2. Базыкин С. Н., Бардин В. А., Чернов П. С. Концепция работы интеллектуальных датчиков в распределенных информационно-измерительных и управляющих системах // Приборы. 2023. № 12. С. 1–7.
3. Roundy S., Wright P. K., Rabaey J. A study of low level vibrations as a power source for wireless sensor nodes // Comput. Commun. 2003. Vol. 26, № 11. P. 1131–1144.
4. Khan F. U., Ahmad I. Review of Energy Harvesters Utilizing Bridge Vibrations // Shock and Vibration. 2016. Vol. 2016. P. 1–21.
5. Справочный каталог. URL: http://avrora-elma.ru/wp-content/themes/aurora/text/piezo_catalog.pdf (дата обращения: 15.05.2024).
6. Аббакумов К. Е., Коновалов Р. С., Цаплев В. М. Пьезогенератор для автономных малогабаритных информационно-измерительных систем. СПб. : Санкт Петербургский государственный электротехнический университет «ЛЭТИ», 2014.
7. Du S., Jia Y., Chen S.-T., Zhao C., Sun B., Arroyo E., Seshia A. A. A new electrode design method in piezoelectric vibration energy harvesters to maximize output power // Sensors and Actuators A: Physical. 2017. Vol. 263. P. 693–701.

References

1. Uorden K. *Novye intellektual'nye materialy i konstruksii. Svoystva i primenenie = New intelligent materials and structures. Properties and applications.* Moscow: Tekhnosfera. 2006:119–125. (In Russ.)
2. Bazykin S.N., Bardin V.A., Chernov P.S. The concept of operation of intelligent sensors in distributed information-measuring and control systems. *Pribery = Devices.* 2023;(12):1–7. (In Russ.)
3. Roundy S., Wright P.K., Rabaey J. A study of low level vibrations as a power source for wireless sensor nodes. *Comput. Commun.* 2003;26(11):1131–1144.
4. Khan F.U., Ahmad I. Review of Energy Harvesters Utilizing Bridge Vibrations. *Shock and Vibration.* 2016;2016:1–21.
5. *Spravochnyy katalog = Reference catalog.* (In Russ.). Available at: http://avrora-elma.ru/wp-content/themes/aurora/text/piezo_catalog.pdf (accessed 15.05.2024).
6. Abbakumov K.E., Konovalov R.S., Tsaplev V.M. *P'ezogenerator dlya avtonomnykh malogabaritnykh informatsionno-izmeritel'nykh system = Piezoelectric generator for autonomous small-sized information-measuring systems.* Saint Petersburg: Sankt Peterburgskiy gosudarstvennyy elektrotekhnicheskii universitet «LETI», 2014.
7. Du S., Jia Y., Chen S.-T., Zhao C., Sun B., Arroyo E., Seshia A.A. A new electrode design method in piezoelectric vibration energy harvesters to maximize output power. *Sensors and Actuators A: Physical.* 2017;263:693–701.

Информация об авторах / Information about the authors

Виталий Анатольевич Бардин

кандидат технических наук, доцент
кафедры приборостроения,
Пензенский государственный
университет (Россия, г. Пенза,
ул. Красная, 40)

E-mail: vit-bardin@yandex.ru

Vitaly A. Bardin

Candidate of engineering sciences,
associate professor of the sub-department
of instrument engineering,
Penza State University
(40 Krasnaya street, Penza, Russia)

Вадим Сергеевич Волков

кандидат технических наук, доцент,
доцент кафедры приборостроения,
Пензенский государственный
университет (Россия, г. Пенза,
ул. Красная, 40)

E-mail: vadimv_1978@mail.ru

Vadim S. Volkov

Candidate of engineering sciences, associate
professor, associate professor of the
sub-department of instrument
engineering, Penza State University
(40 Krasnaya street, Penza, Russia)

Сергей Николаевич Базыкин

доктор технических наук, доцент,
заведующий кафедрой приборостроения,
Пензенский государственный
университет (Россия, г. Пенза,
ул. Красная, 40)

E-mail: cbazykin@yandex.ru

Sergey N. Bazykin

Doctor of engineering sciences, associate
professor, head of the sub-department
of instrument engineering,
Penza State University
(40 Krasnaya street, Penza, Russia)

Нелли Александровна Базыкина

кандидат технических наук, доцент,
доцент кафедры теоретической
и прикладной механики и графики,
Пензенский государственный
университет (Россия, г. Пенза,
ул. Красная, 40)

E-mail: nelli.baz@mail.ru

Nelli A. Bazykina

Candidate of engineering sciences, associate
professor, associate professor
of the sub-department of theoretical
and applied mechanics and graphics,
Penza State University
(40 Krasnaya street, Penza, Russia)

Кристина Сергеевна Самохина

кандидат технических наук, доцент
кафедры приборостроения,
Пензенский государственный
университет (Россия, г. Пенза,
ул. Красная, 40)

E-mail: kristina.bazykina@mail.ru

Kristina S. Samokhina

Candidate of engineering sciences,
associate professor of the sub-department
of instrument engineering,
Penza State University
(40 Krasnaya street, Penza, Russia)

Илья Николаевич Урваев

аспирант, Пензенский государственный
университет (Россия, г. Пенза,
ул. Красная, 40)

E-mail: iurvaev@mail.ru

Ilya N. Urvaev

Postgraduate student, Penza State
University (40 Krasnaya street,
Penza, Russia)

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов / The authors declare no conflicts of interests.

Поступила в редакцию / Received 21.05.2024

Поступила после рецензирования и доработки / Revised 08.09.2024

Принята к публикации / Accepted 24.10.2024