

УДК/UDC 621.317.628

DOI: 10.25206/1813-8225-2025-195-103-110

EDN: TQUVUO

Научная статья / Original article

ТРЕХКОМПОНЕНТНЫЙ СФЕРИЧЕСКИЙ ДАТЧИК НАПРЯЖЕННОСТИ ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ПОЛЯ СДВОЕННОГО ТИПА

С. В. Бирюков

Омский государственный технический университет, г. Омск

В статье предлагается новое конструктивное решение трехкомпонентного электроиндукционного сферического датчика напряженности электрического поля с чувствительными электродами в форме сферических двуугольников и их частей. В основу датчика положен двухкомпонентный датчик сдвоенного типа и однокомпонентный датчик двойного типа, чувствительные элементы которого являются частями сферических двуугольников, организованных в сферические сегменты с угловым размером θ_0 . Чувствительные электроды датчика — это тридцать шесть проводящих сферических поверхностей, изолированных друг от друга и от проводящего сферического основания датчика. Из чувствительных электродов формируются чувствительные элементы в форме сферических двуугольников для четырёх двойных датчиков по два на координатных осях x и y и в форме сферических сегментов для одного двойного датчика по координатной оси z .

Проведенные в работе исследования показали, что конструктивные размеры чувствительных элементов датчика и пространственный диапазон измерения влияют на его погрешность, вызванную неоднородностью поля. Оптимизированные конструктивные размеры чувствительных элементов датчика и ограниченный пространственный диапазон измерения позволили создать датчик с погрешностью от неоднородности поля по модулю, не превышающую погрешность $\pm 0,55\%$ в допустимом пространственном диапазоне измерений $0 \leq a \leq 0,5$, что соответствует минимальному расстоянию до источника поля $d = 2R$. Для обеспечения такой погрешности и такого пространственного измерения чувствительные элементы датчика в форме сферических двуугольников должны иметь угловые размеры $\alpha_0 = 90^\circ$ и $\beta_{01} = 30^\circ$, а в форме сферического сегмента угловой размер должен быть $\theta_0 = 61,5^\circ$.

Предложенный трехкомпонентный сферический датчик может стать основой измерителя напряженности электрического поля промышленной частоты.

Ключевые слова: электрическое поле, напряженность поля, трехкомпонентный сферический датчик, чувствительный электрод, чувствительный элемент, сферический двуугольник, сферический сегмент, погрешность от неоднородности поля.

Для цитирования: Бирюков С. В. Трехкомпонентный сферический датчик напряженности электрического поля сдвоенного типа // Омский научный вестник. 2025. № 3 (195). С. 103–110. DOI: 10.25206/1813-8225-2025-195-103-110. EDN: TQUVUO.



© Бирюков С. В., 2025.
Контент доступен под лицензией Creative Commons Attribution 4.0 License.

THREE-COMPONENT SPHERICAL DUAL-TYPE ELECTRIC FIELD STRENGTH SENSOR

S. V. Biryukov

Omsk State Technical University, Omsk, Russia

The article proposes a new design solution for a three-component electroinductive spherical electric field strength sensor with sensitive electrodes in the form of spherical digons and their parts. The sensor is based on a two-component dual-type sensor and a single-component dual-type sensor, the sensitive elements of which are parts of spherical digons organized into spherical segments with an angular size of θ_0 .

The sensitive electrodes of the sensor are thirty-six conductive spherical surfaces isolated from each other and from the conductive spherical base of the sensor. The sensitive electrodes are used to form sensitive elements in the form of spherical digons for four dual sensors, two on the x and y coordinate axes, and in the form of spherical segments for one dual sensor along the z coordinate axis. The studies conducted in the work showed that the design dimensions of the sensitive elements of the sensor and the spatial measurement range affect its error caused by the field inhomogeneity. Optimized design dimensions of the sensor's sensitive elements and limited spatial measurement range made it possible to create a sensor with an error from field inhomogeneity in modulus not exceeding an error of $\pm 0.55\%$ in the permissible spatial measurement range of $0 \leq a \leq 0.5$, which corresponds to a minimum distance to the field source of $d = 2R$. To ensure such an error and such spatial measurements, the sensor's sensitive elements in the form of spherical digons must have angular dimensions of $\alpha_0 = 90^\circ$ and $\beta_{01} = 30^\circ$, and in the form of a spherical segment, the angular size must be $\theta_0 = 61.5^\circ$.

The proposed three-component spherical sensor can form the basis of an industrial frequency electric field strength meter.

Keywords: electric field, field strength, three-component spherical sensor, sensitive electrode, sensitive element, spherical digon, spherical segment, error from field inhomogeneity.

For citation: Biryukov S. V. Three-component spherical dual-type electric field strength sensor. *Omsk Scientific Bulletin*. 2025. No. 3 (195). P. 103–110. DOI: 10.25206/1813-8225-2025-195-103-110. EDN: TQUVUO.



© Biryukov S. V., 2025.
The content is available under a Creative Commons Attribution 4.0 License.

Введение

Электрическое поле (ЭП) — это одно из состояний материи, в котором человек пребывает с момента рождения. Как показывает многовековой опыт, ЭП не самое комфортное условие пребывания человека. ЭП внешне мало чем себя проявляет и практически всегда остается незамеченным. Простейшим проявлением ЭП являются электрические разряды между телом человека и проводящими поверхностями. Долгое время никто не изучал воздействие ЭП на человеческий организм, окружающую среду и технику. Моментом начала изучения воздействия ЭП на человека можно считать начало восьмидесятых годов прошлого века [1–3]. В это время бурное развитие получили линии электропередач 300, 500 и 1150 кВ, являющиеся мощными источниками ЭП.

Для изучения механизма воздействия ЭП на человека потребовались средства их контроля и измерений. Прежде чем создавать такие средства, необходимо было выяснить, какой из параметров ЭП, оказывает неблагоприятное воздействие на организм человека. Таким параметром оказалась напряженность ЭП. В соответствии с определениями, приведёнными в учебниках по общей физике, понятие напряженности ЭП формулируется как «... напряженность ЭП — это физическая величина, равная силе, действующей на единичный положительный заряд». Из определения следует, что для прямого измерения напряженности ЭП необходимо измерять силу, действующую на внесенный в поле электрический заряд. Однако это практически невозможно. Известны [4, 5] только два устройства, основанные на силовом воздействии поля, относящиеся к прямому виду измерений.

В первом устройстве [4] в качестве чувствительного элемента (ЧЭЛ) используется проводящая пластина. При внесении её в ЭП на ЧЭЛ будет действовать сила, определяемая выражением $F = (1/2) \cdot \epsilon \epsilon_0 E^2$, где ϵ — диэлектрическая проницаемость среды, в которой находится чувствительный элемент датчика; ϵ_0 — диэлектрическая постоянная; E — напряженность ЭП.

Во втором устройстве [5] ЧЭЛ выполнен в виде двух вытянутых конусов из электрета, основания которых пристыкованы друг к другу. ЧЭЛ закрепляется на подвесе, снабженном ограничителем вращающегося момента. При внесении балки в ЭП за счет сил кулоновского взаимодействия балка поворачивается на угол, пропорциональный напряженности ЭП.

Таким образом, практически все известные устройства, воспринимающие напряженность поля, основаны на различных проявлениях их взаимодействия с электрическим полем, а следовательно, относятся к косвенному виду измерений. Первичным измерительным преобразователем, воспринимающим напряженность ЭП, является первичный измерительный преобразователь — датчик. В основе построения датчиков лежат физические явления и эффекты. К ним можно отнести электроэлектрические, электромагнитные, электромеханические, электротепловые, электрооптические, электропространственные и другие явления, эффекты [6].

В работе [6] показано, что наиболее широкое распространение для построения датчиков напряженности ЭП получили электроэлектрические эффекты, в частности эффект электростатической индукции — наведение электрических зарядов на проводящую поверхность под действием ЭП. Датчики, основанные на электростатической индукции, называются электроиндукционными датчиками. В основе электроиндукционных датчиков [6] лежит проводящая сфера и изолированные друг от друга и от неё проводящие поверхности ЧЭЛ в форме сферических сегментов или их частей. Такие датчики достигли предела минимальной погрешности при измерении неоднородных ЭП, составляющей $\approx \pm 5\%$ в полном пространственном диапазоне от ∞ до 0. Поэтому потребовались иные компоновки построения датчиков. И такие новые компоновки датчиков были предложены в работах [7–10]. Перекомпоновка элементов известных датчиков привела к формированию датчиков нового типа — сдвоенных датчиков. Таким образом, к одинарному и двойному типам датчиков добавил-

ся третий тип — сдвоенный. Сдвоенный тип датчика позволил снизить погрешность датчика в неоднородном поле до $\approx \pm 2\%$.

В настоящее время разработчики датчиков напряженности ЭП стремятся снизить погрешности, вызванные неоднородностью поля; принять новый концептуальный подход к процессу измерения и новые конструктивные решения чувствительных электродов (ЧЭ) датчика.

Концептуальный подход к процессу измерения связан с ограничением пространственного диапазона измерения датчика. А новые конструктивные решения элементов датчика связаны с использованием ЧЭЛ в форме сферических двуугольников. Разработанный сдвоенный двухкомпонентный сферический датчик, представленный в работе [11], подтвердил возможность снижения его погрешности от неоднородного поля до $\approx \pm 1\%$ в полном пространственном диапазоне измерений. Однако двухкомпонентный датчик усложняет процесс измерения вектора напряженности ЭП, т.к. его нахождение требует многократной ориентации датчика в данной точке пространства ЭП.

В связи с этим дальнейшие исследования должны быть направлены на построение трехкомпонентного сферического датчика напряженности ЭП сдвоенного типа с двуугольными ЧЭ и с погрешностью его измерения ниже по модулю $\approx 1\%$.

Постановка задачи

На основании вышеизложенного в задачах исследования необходимо сформулировать задачи, решение которых позволило бы:

- 1) предложить новое конструктивное решение построения трёхкомпонентного электроиндукционного сферического датчика напряженности ЭП с ЧЭ в форме сферических двуугольников и их частей, позволяющее расширить функциональные возможности датчика по отношению к известному;
- 2) обобщить известные теоретические положения по взаимодействию электроиндукционных сферических датчиков напряженности ЭП с полями различной неоднородности и применить их к предложенному трехкомпонентному датчику;
- 3) провести оценку погрешности трёхкомпонентного датчика напряженности ЭП, вызванную неоднородностью поля и свести её к желаемому минимуму в допустимом пространственном диапазоне измерений.

Двухкомпонентный датчик ЭП — основа трехкомпонентного датчика

Целью работы является исследование возможности создания трехкомпонентного электроиндукционного сферического датчика напряженности ЭП с ЧЭ в форме сферических двуугольников и их частей.

При исследовании положим в основу создаваемого нового датчика — двухкомпонентный датчик с двуугольными сферическими ЧЭ, рассмотренный в работе [11] и представленный на рис. 1.

Обозначим ЧЭ двухкомпонентного датчика буквой S с соответствующим номером ЧЭ и нумерацию начнем с цифры 2. Таким образом, исходный двухкомпонентный датчик будет состоять из проводящего сферического основания 1 и двенадцати проводящих ЧЭ $S2-S13$ в форме сферических двуугольников, изолированных друг от друга и от проводящего сферического основания 1. Угловой размер ЧЭ составляет $\pm \beta_0 = 15^\circ$, а его размах

$\beta_{01} = 30^\circ$ (рис. 1). ЧЭ формируются путем разрезания лазерным резаком поверхностного слоя проводника на двенадцать равных частей. Поверхностный слой проводника предварительно на изоляционный слой сферического основания 1 датчика.

Двухкомпонентный датчик организуется так, что на координатных осях x и y располагаются шесть диаметрально противоположных пар ЧЭ. Так, на координатной оси x располагаются ЧЭ $S5 \rightarrow S11$, $S6 \rightarrow S12$, $S7 \rightarrow S13$, $S8 \rightarrow S2$, $S9 \rightarrow S3$ и $S10 \rightarrow S4$, а на координатной оси y ЧЭ $S2 \rightarrow S8$, $S3 \rightarrow S9$, $S4 \rightarrow S10$, $S5 \rightarrow S11$, $S6 \rightarrow S12$ и $S7 \rightarrow S13$ [11]. По координатным осям x и y из указанных ЧЭ формируются ЧЭЛ сдвоенных датчиков. Сдвоенные датчики организуются из двух двойных датчиков. Первые двойные датчики формируются из объединения ЧЭ в ЧЭЛ: по оси x $(S7 + S8) \rightarrow (S2 + S13)$ по оси y $(S4 + S5) \rightarrow (S10 + S11)$. А вторые двойные датчики объединяют следующие ЧЭ в ЧЭЛ: по оси x $(S5 + S6 + S7 + S8 + S9 + S10) \rightarrow (S11 + S12 + S13 + S2 + S3 + S4)$ по оси y $(S2 + S3 + S4 + S5 + S6 + S7) \rightarrow (S8 + S9 + S10 + S11 + S12 + S13)$. Таким образом, ЧЭ первых двойных датчиков служат сферические двуугольники с угловыми размерами $\alpha_0 = \pm 90^\circ$ и $\beta_{01} = \pm 30^\circ$, а вторых двойных датчиков — полусферы, для которых $\alpha_0 = \pm 90^\circ$ и $\beta_{02} = \pm 90^\circ$ (рис. 1). Для объединения ЧЭ в ЧЭЛ служат измерительные цепи [11]. Рассмотренный датчик позволяет выделять только две компоненты вектора напряженности ЭП по осям x и y . Поэтому для создания трёхкомпонентного датчика напряженности ЭП потребуется новое конструктивное решение, основу которого составит описанный выше двухкомпонентный датчик. При этом встает вопрос: как в двухкомпонентном датчике выделить третью компоненту?

Идея выделения из ЧЭ двухкомпонентного датчика ЧЭЛ третьей компоненты пришла не сразу, хотя она лежала на поверхности. Суть идеи состоит в отсечении двух диаметрально противоположных полюсов двухкомпонентного сферического датчика двумя параллельными плоскостями. Плоскости проходят перпендикулярно оси z и ограничиваются угловым размером θ_0 между лучом, выходящим из центра сферического основания и проходящим через края плоскостей (рис. 2). Отсечение выполняется лазерным резаком, так же как и при формировании ЧЭ основного двухкомпонентного датчика.

Такое конструктивное решение приводит к разделению каждого из двенадцати сферических двуугольников на три части $Si.1$, $Si.2$, $Si.3$, где $i = 2, 3, \dots, 13$. Всего получается тридцать шесть частей ЧЭ, из которых необходимо сформировать ЧЭЛ датчика по координатным осям x , y и z . По координатным осям x и y ЧЭ будут в форме сферических двуугольников $S2-S13$ (рис. 1). Для получения полных сферических двуугольников $S2-S13$ необходимо объединить ЧЭ $(Si.1 + Si.2 + Si.3)$, где $i = 2, 3, \dots, 13$. Объединённые таким образом ЧЭ будут участвовать в формировании ЧЭЛ по координатным осям x и y . По координатной оси z в качестве ЧЭЛ будут выступать два составных диаметрально противоположных сферических сегмента, состоящих из двенадцати ЧЭ, один — из объединённых ЧЭ $S2.1 \dots S13.1$, а другой — из объединённых ЧЭ $S2.3 \dots S13.3$.

Таким образом, предложено новое конструктивное решение построения трёхкомпонентного электроиндукционного сферического датчика напряженности ЭП, ЧЭ которого состоят из сферических двуугольников и их частей.

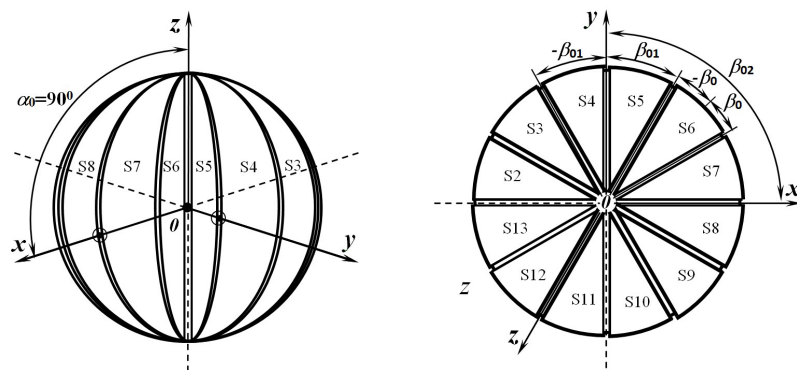


Рис. 1. Конструктивное решение двухкомпонентного датчика
Fig. 1. Design solution of a two-component sensor

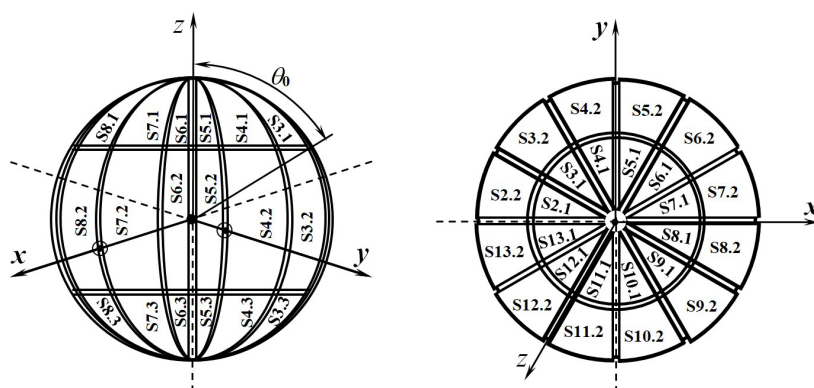


Рис. 2. Конструктивное решение трёхкомпонентного датчика напряженности ЭП
Fig. 2. Design solution of a three-component electric field strength sensor

Рассмотрим теоретические положения, которые можно применить для исследования взаимодействия предложенного датчика с полями различной неоднородности.

Краткая теория

В рассмотрении взаимодействия предложенного датчика с полями различной неоднородности могут участвовать однородные ЭП свободного пространства и неоднородные ЭП точечного заряда, диполя и квадруполь. Поля диполя и квадруполь хотя и обладают большей неоднородностью по отношению к полю точечного заряда, но они быстро затухают: у диполя обратно пропорционально кубу ($1/r^3$), у квадруполь — обратно пропорционально четвертой степени ($1/r^4$) расстояния до источника поля. Поэтому эти поля в работе рассматриваться не будут.

Для удобства представления теоретических положений условно представим предложенный трехкомпонентный датчик в виде двух датчиков — двухкомпонентного сдвоенного датчика с ЧЭЛ в форме сферических двуугольников [11] и однокомпонентного двойного датчика с ЧЭЛ в форме сферических сегментов [12]. Из ЧЭ датчика по координатным осям x и y формируются два двойных датчика, входящих в состав двухкомпонентного сдвоенного датчика [11], а по координатной оси z — один двойной датчик [12].

ЧЭЛ двойных датчиков состоят из объединенных ЧЭ:

— по координатной оси x

$(S7 + S8) \rightarrow (S2 + S13)$ и $(S5 + S6 + S7 + S8 + S9 + S10) \rightarrow (S11 + S12 + S13 + S2 + S3 + S4)$;

— по координатной оси y

$(S4 + S5) \rightarrow (S10 + S1)$ и $(S2 + S3 + \dots + S7) \rightarrow (S8 + S9 + \dots + S13)$ (рис. 1).

ЧЭЛ двойного датчика, расположенного по координатной оси z , состоят из объединенных ЧЭ: $(S2.1 + S3.1 + \dots + S13.1) \rightarrow (S2.3 + S3.3 + \dots + S13.3)$ (рис. 3).

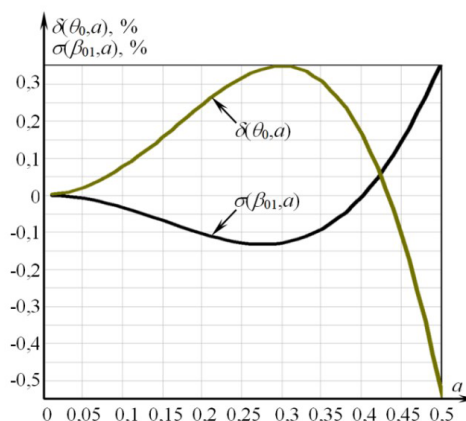


Рис. 3. Графики погрешностей $\sigma(\beta_{01}, a)$ и $\delta(\theta_0, a)$ от неоднородности ЭП по координатным осям x , y и z при оптимальных угловых размерах $\beta_{01} = 30^\circ$ и $\theta_0 = 61,5^\circ$ чувствительных элементов датчика
Fig. 3. Graphs of errors $\sigma(\beta_{01}, a)$ and $\delta(\theta_0, a)$ from the non-uniformity of the electric field along the coordinate axes x , y and z at optimal angular dimensions $\beta_{01} = 30^\circ$ and $\theta_0 = 61,5^\circ$ of the sensitive elements of the sensor

Объединение ЧЭ датчика в ЧЭЛ осуществляет посредством измерительной цепи. Измерительная цепь включает в себя 18 дифференциальных интеграторов тока (ДИТ) и группу суммирующих устройств. Дифференциальные интеграторы тока (усилители заряда [14]) преобразуют разности электрических зарядов, индуцированных ЭП на диаметрально противоположных ЧЭ датчика в электрическое напряжение. Суммирующие устройства суммируют выходные сигналы с ДИТ по определенному алгоритму, формируя выходные сигналы трехкомпонентного датчика $U_x(t)$, $U_y(t)$ и $U_z(t)$, пропорциональные составляющим вектора напряженности ЭП.

Применение ДИТ позволило осуществить гальваническую развязку между ЧЭ датчика, исключая их взаимосвязь друг с другом, виртуально объединить ЧЭ через близкий к нулю входной импеданс ДИТ и исключить зависимость выходных напряжений ДИТ от частоты входного сигнала.

Выделим в работе [11] основные теоретические результаты, полученные для двухкомпонентного датчика с ЧЭ в форме сферических двуугольников.

Выходными сигналами двойных датчиков служат дифференциальные заряды

$$\Delta q(t) = q_1(t) - q_2(t), \quad (1)$$

где $q_1(t)$ и $q_2(t)$ — заряды, индуцированные на диаметрально противоположных чувствительных элементах первого и второго двойных датчиков.

В однородном поле заряды $q_1(t)$ и $q_2(t)$ будут соответственно равны [11]

$$q_{1,2\text{одн.}}(t) = \mp 3\pi\epsilon_0 R^2 \sin \beta_{0i} \cdot E_0(t), \quad (2)$$

где знак « $-$ » соответствует ЧЭЛ 1, в который входит, а знак « $+$ » соответствует ЧЭЛ 2, из которого выходит вектор напряженности ЭП; ϵ — диэлектрическая проницаемость среды; $\epsilon_0 = 8,85 \cdot 10^{-12}$ Ф/м — электрическая постоянная; R — радиус сферического основания датчика; β_{0i} — угловой размер ЧЭЛ (рис. 1); $i = 1, 2$ — соответствует первому или второму ЧЭЛ; $E_0(t)$ — напряженность однородного ЭП.

В неоднородном поле точечного заряда те же индуцированные полем заряды на ЧЭЛ 1 и ЧЭЛ 2 будут равны [11]

$$q_{1\text{неодн.}}(t) = -3\pi\epsilon_0 R^2 \sin \beta_{0i} \times \\ \times \frac{2}{3a\pi \sin \beta_{0i}} \int_0^\pi \int_0^{\arctan\left(\frac{tg\beta_{0i}}{\sin \alpha}\right)} \left[\frac{1-a^2}{\sqrt{(1-2a \cos \beta + a^2)^3}} - 1 \right] \times \\ \times \cos \beta \cdot d\alpha \cdot d\beta \cdot E(t). \quad (3)$$

$$q_{2\text{неодн.}}(t) = 3\pi\epsilon_0 R^2 \sin \beta_{0i} \times \\ \times \frac{2}{3a\pi \sin \beta_{0i}} \int_0^\pi \int_0^{\arctan\left(\frac{tg\beta_{0i}}{\sin \alpha}\right)} \left[\frac{1-a^2}{\sqrt{(1+2a \cos \beta + a^2)^3}} - 1 \right] \times \\ \times \cos \beta \cdot d\alpha \cdot d\beta \cdot E(t), \quad (4)$$

где $a = R/d$ — относительное расстояние от центра сферического основания датчика до источника поля, характеризующее степень неоднородности поля (при $a \rightarrow 0$ поле стремится к однородному полю, при $a \rightarrow 1$ степень неоднородности поля увеличивается); R — радиус сферического основания датчика; d — расстояние от центра сферического основания датчика до источника поля; $E(t)$ — напряженность

неоднородного ЭП в точке, совмещенной с центром сферического основания датчика.

Таким образом, дифференциальная разность зарядов в соответствии с выражениями (1) — (4) определится как

— в однородном поле

$$\Delta q_{\text{одн.}}(t) = q_{1\text{одн.}}(t) - q_{2\text{одн.}}(t) = 6\pi\epsilon_0 R^2 \sin \beta_{0i} \cdot E_0(t); \quad (5)$$

— в неоднородном поле точечного заряда (с учетом выражений (3) и (4))

$$\Delta q_{\text{неодн.}}(t) = q_{1\text{неодн.}}(t) - q_{2\text{неодн.}}(t) = \\ = 6\pi\epsilon_0 R^2 \sin \beta_{0i} [1 + \delta(\beta_{0i}, a)] E(t), \quad (6)$$

где $\delta(\beta_{0i}, a)$ — погрешности, вызванные неоднородностью ЭП точечного заряда первого (при β_{01}) и второго (при β_{02}) двойного датчика, определяемые из выражения

$$\delta = \frac{\Delta q_{\text{неодн.}} - \Delta q_{\text{одн.}}}{\Delta q_{\text{одн.}}} \cdot 100 \%, \quad (7)$$

где β_{0i} — угловой размер сферических двуугольников первого β_{01} и второго β_{02} сдвоенного датчика (рис. 1).

Поскольку по координатным осям x и y формируются сдвоенные датчики, состоящие из двух двойных, то погрешность от неоднородности поля сдвоенного датчика будет определяться как [13]

$$\sigma(\beta_{01}, a) = \frac{\delta(\beta_{01}, a) + \delta(\beta_{02}, a)}{2}. \quad (8)$$

Сдвоенные датчики формируются так, чтобы погрешности $\delta(\beta_{01}, a)$ и $\delta(\beta_{02}, a)$ двойных датчиков были противоположны по знаку [13]. Это требование позволяет значительно уменьшить погрешность $\sigma(\beta_{01}, a)$ сдвоенного датчика.

По третьей координате z используется только двойной датчик. Поэтому воспользуемся основными теоретическими результатами, приведенными в работе [12] для однокомпонентного двойного датчика с ЧЭЛ в форме сферических сегментов. Запишем выражения для электрических зарядов $q_1(t)$ и $q_2(t)$, индуцированных на диаметрально противоположных ЧЭЛ и их разности в однородном и неоднородном ЭП.

В однородном поле заряды $q_1(t)$ и $q_2(t)$ и их разность будут соответственно равны [12]

$$q_{1,2\text{одн.}}(t) = \mp 3\pi\epsilon_0 R^2 \sin^2 \theta_0 \cdot E_0(t); \\ \Delta q_{\text{одн.}}(t) = q_{1\text{одн.}}(t) - q_{2\text{одн.}}(t) = \\ = 6\pi\epsilon_0 R^2 \sin^2 \theta_0 \cdot E_0(t). \quad (9)$$

В неоднородном поле точечного заряда, индуцированные полем на сферических сегментах заряды и их разность, будут определяться выражениями:

$$q_{1\text{неодн.}}(t) = -3\pi\epsilon_0 R^2 \cdot \sin^2 \theta_0 \times \\ \times \left[\frac{1}{6a \cos^2 \frac{\theta_0}{2}} - \left(\frac{1+a}{3a^2 \sin^2 \theta_0} \right) \right] \times \\ \times \left(1 - \frac{1-a}{\sqrt{1-2a \cos \theta_0 + a^2}} \right) \cdot E(t); \quad (10)$$

$$q_{2\text{неодн.}}(t) = 3\pi\epsilon_0 R^2 \cdot \sin^2 \theta_0 \times \left[\frac{1}{6a \cos^2 \frac{\theta_0}{2}} + \left(\frac{1-a}{3a^2 \sin^2 \theta_0} \right) \times \right. \\ \left. \times \left(1 - \frac{1+a}{\sqrt{1+2a \cos \theta_0 + a^2}} \right) \right] \cdot E(t). \quad (11)$$

$$\Delta q_{\text{неодн.}}(t) = q_{1\text{неодн.}}(t) - q_{2\text{неодн.}}(t) = \\ = 6\pi\epsilon_0 R^2 \sin^2 \theta_0 [1 + \delta(\theta_0, a)] E(t), \quad (12)$$

где $\delta(\theta_0, a)$ — погрешность, вызванная неоднородностью ЭП точечного заряда, определяемая из выражения (7) после подстановки в него выражений (9) и (12)

$$\delta(\theta_0, a) = \left[\frac{1}{3a^2 \sin^2 \theta_0} \left(2 - \frac{1-a^2}{\sqrt{1-2a \cos \theta_0 + a^2}} - \frac{1-a^2}{\sqrt{1+2a \cos \theta_0 + a^2}} \right) \right] \cdot 100, \quad (13)$$

где θ_0 — угловой размер сферического сегмента (рис. 2).

Оценка погрешности трехкомпонентного датчика

Как показано выше, выходными сигналами трехкомпонентного датчика являются напряжения $U_x(t)$, $U_y(t)$ и $U_z(t)$, пропорциональные составляющим $E_x(t)$, $E_y(t)$ и $E_z(t)$ вектора напряженности ЭП $E(t)$. С учетом сказанного можно записать

— для однородного поля

$$\begin{aligned} E_x(t) &= G_x U_x(t) = E_{0x}(t) \\ E_y(t) &= G_y U_y(t) = E_{0y}(t), \\ E_z(t) &= G_z U_z(t) = E_{0z}(t) \end{aligned} \quad (14)$$

где $E_{0x}(t)$, $E_{0y}(t)$ и $E_{0z}(t)$ — составляющие вектора напряженности однородного ЭП; G_x , G_y и G_z — чувствительности датчика по составляющим x , y и z , настроенные так, что $G_x = G_y = G_z = G$ составляющие вектора напряженности ЭП $E(t)$, соответственно равные

— для неоднородного поля

$$\begin{aligned} E_x(t) &= G_x U_x(t) [1 + \sigma_x(\beta_{01}, a)] = E_{0x}(t) \cdot [1 + \sigma_x(\beta_{01}, a)] \\ E_y(t) &= G_y U_y(t) [1 + \sigma_y(\beta_{01}, a)] = E_{0y}(t) \cdot [1 + \sigma_y(\beta_{01}, a)], \\ E_z(t) &= G_z U_z(t) [1 + \sigma_z(\beta_{01}, a)] = E_{0z}(t) \cdot [1 + \sigma_z(\beta_{01}, a)] \end{aligned} \quad (15)$$

где $\sigma_x(\beta_{01}, a) = \sigma_y(\beta_{01}, a) = \sigma(\beta_{01}, a)$ и $\sigma_z(\beta_{01}, a)$ — погрешности датчика по составляющим x , y и z датчика, зависящие от угловых размеров ЧЭЛ и пространственного диапазона измерений $a = R/d$.

В работах [6] и [11] показано, что оптимальные угловые размеры ЧЭЛ с точки зрения минимума погрешности и максимума пространственного диапазона измерений датчика соответственно равны $\theta_0 = 61,5^\circ$, а $\beta_{01} = 30^\circ$.

С целью безопасности проведения измерений максимальный возможный пространственный диапазон измерений должен быть ограничен диапазоном $0 \leq a \leq 0,5$. Тогда минимально возможное расстояние до источника поля будет $d \geq 2R$, т.е. просвет между датчиком и источником поля не должен

быть меньше радиуса R сферического основания датчика.

Рассчитаем погрешности $\sigma_x(\beta_{01}, a)$ и $\delta(\theta_0, a)$ при постоянных значениях $\beta_{01} = 30^\circ$ и $\theta_0 = 61,5^\circ$. Построим графические зависимости этих погрешностей от пространственного диапазона a в диапазоне $0 \leq a \leq 0,5$ и представим их на рис. 3.

Из графиков погрешностей, представленных на рис. 3, следует, что погрешности составляющих модуля вектора напряженности ЭП в пространственном диапазоне $0 \leq a \leq 0,5$ может изменяться от $-0,55\%$ до $+0,35\%$.

Оценим теперь результирующую погрешность от неоднородного поля трехкомпонентного датчика. Восстановим модуль вектора напряженности ЭП по его составляющим как

$$E(t) = \sqrt{E_x^2(t) + E_y^2(t) + E_z^2(t)}, \quad (16)$$

где $E_x(t)$, $E_y(t)$ и $E_z(t)$ — составляющие модуля вектора напряженности ЭП, определяемые выражениями (15).

После подстановки выражений (15) для $E_x(t)$, $E_y(t)$ и $E_z(t)$ в выражение (16) и последующего преобразования получим

$$E(t) = E_0(t) [1 + \sigma(\beta_{01}, a)] \times \\ \times \sqrt{1 + \cos^2 \gamma \left[\left(\frac{1 + \delta(\theta_0, a)}{1 + \sigma(\beta_{01}, a)} \right)^2 - 1 \right]}, \quad (17)$$

где $E_0(t)$ — напряженность ЭП в точке измерения в отсутствие датчика; $\cos \gamma$ — направляющий косинус по оси z .

Определим по известной формуле $\varepsilon = [E(t) - E_0(t)]/E_0(t)$ результирующую погрешность измерения модуля вектора неоднородного ЭП

$$\varepsilon(a, \gamma) = \left\{ [1 + \sigma(\beta_{01}, a)] \times \right. \\ \left. \times \sqrt{1 + \cos^2 \gamma \cdot \left[\left(\frac{1 + \delta(\theta_0, a)}{1 + \sigma(\beta_{01}, a)} \right)^2 - 1 \right]} - 1 \right\} \cdot 100. \quad (18)$$

Из выражения (18) следует, что погрешность $\varepsilon(a, \gamma)$ зависит от угла поворота γ относительно оси z .

Исследуем влияние угла поворота γ на погрешность $\varepsilon(a, \gamma)$. Рассмотрим два крайних случая. Первый случай соответствует углу поворота $\gamma = 90^\circ$, а второй — углу поворота $\gamma = 0$.

В первом случае при $\gamma = 90^\circ$ направляющий косинус $\cos \gamma = 0$, тогда получим, что $\varepsilon(a, \gamma) = \sigma(\beta_{01}, a)$. Во втором случае при $\gamma = 0$ направляющий косинус $\cos \gamma = 1$, тогда

$$\varepsilon(a, \gamma) = \left\{ [1 + \sigma(\beta_{01}, a)] \sqrt{1 + \left[\left(\frac{1 + \delta(\theta_0, a)}{1 + \sigma(\beta_{01}, a)} \right)^2 - 1 \right]} - 1 \right\} \cdot 100. \quad (19)$$

После раскрытия скобок и преобразования выражения (19) устанавливаем, что $\varepsilon(a, \gamma) = \delta(\theta_0, a)$. Теперь уточним поведение погрешности $\varepsilon(a, \gamma)$ в диапазоне изменения угла поворота $0 \leq \gamma \leq 90^\circ$ датчика относительно оси z . Для этого построим четыре графические зависимости погрешности $\varepsilon(a, \gamma)$ при $\gamma = 0$, $\gamma = 30^\circ$, $\gamma = 60^\circ$ и $\gamma = 90^\circ$ и представим их на рис. 4. Из представленных графиков

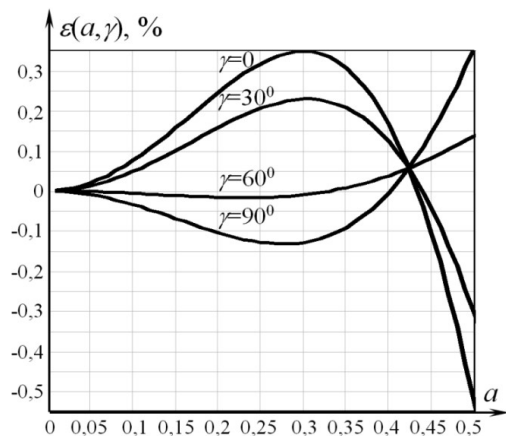


Рис. 4. Графики погрешности $\varepsilon(a, \gamma)$ трёхкомпонентного датчика при углах $\gamma = 0$, $\gamma = 30^\circ$, $\gamma = 60^\circ$ и $\gamma = 90^\circ$ его поворота зависимости относительно координатной оси z
Fig. 4. Graphs of the error $\varepsilon(a, \gamma)$ of a three-component sensor at angles $\gamma = 0$, $\gamma = 30^\circ$, $\gamma = 60^\circ$ and $\gamma = 90^\circ$ of its rotation relative to the coordinate axis z

(рис. 4) следует, что результирующая погрешность трёхкомпонентного датчика не выходит за пределы $-0,55\% \leq \varepsilon(a, \gamma) \leq +0,35\%$ в пространственном диапазоне $0 \leq a \leq 0,5$. Отсюда можно заключить, что предельная результирующая погрешность трёхкомпонентного датчика от неоднородности ЭП не превысит $\pm 0,55\%$.

Таким образом, исследование показало, что результирующая погрешность трёхкомпонентного датчика от неоднородности поля не будет выходить за пределы погрешностей, ограниченных кривыми, представленными на рис. 3.

Выводы и заключение

По итогам исследования можно заключить, что все поставленные задачи решены, и сформулировать следующие выводы:

1. Предложено новое конструктивное решение трёхкомпонентного сферического датчика напряженности электрического ЭП с чувствительными электродами в форме сферических двуугольников и их частей, позволяющее расширить функциональные возможности датчика по отношению к известному.

2. Проанализированы известные теоретические положения, разработанные для электроиндукционных сферических датчиков напряженности ЭП с ЧЭ в форме сферических двуугольников и сферических сегментов, сделано их обобщение, результаты которого применены к новому трёхкомпонентному датчику.

3. Проанализированы погрешности каждой составляющей модуля вектора напряженности ЭП, определены параметры датчика и поля, влияющие на эту погрешность, и сделана оценка результирующей погрешности трёхкомпонентного датчика напряженности ЭП, вызванная неоднородностью поля.

4. Установлено, что на погрешность датчика оказывают влияние угловые размеры ЧЭ датчика и пространственный диапазон измерения a , характеризующий степень неоднородности поля.

5. Определены оптимальные угловые размеры ЧЭ датчика, обеспечивающие ему минимальную

погрешность в допустимом пространственном диапазоне измерений.

6. Установлено, что оптимальные размеры ЧЭ датчика в форме сферических двуугольников должны быть $\alpha_0 = 90^\circ$ и $\beta_0 = 30^\circ$, а в форме сферических сегментов — $\theta_0 = 61,5^\circ$.

7. С целью электробезопасности работы с датчиком в ЭП введено ограничение пространственного диапазона измерений. В связи с этим пространственный диапазон из полного диапазона $0 \leq a < 1$ стал допустимым диапазоном $0 \leq a \leq 0,5$.

8. Установлено, что предельная погрешность от неоднородности ЭП трёхкомпонентного датчика при оптимальных размерах его ЧЭ и допустимом пространственном диапазоне измерений не превышает $\pm 0,55\%$.

В заключение необходимо сказать, что предложенный в работе трёхкомпонентный электроиндукционный сферический датчик напряженности ЭП с ЧЭ в форме сферических двуугольников и их частей может быть использован для построения измерителя напряженности ЭП. Следовательно, следующий этап работы будет направлен на разработку измерителя напряженности ЭП с предложенным трёхкомпонентным датчиком.

Список источников / References

1. Коробкова В. П., Морозов Ю. А., Столяров М. Д. [и др.]. Воздействие электрического поля распределительных устройств 500 и 750 кВ на обслуживающий персонал и средства для его защиты // Подстанции переменного тока: Междунар. конф. по большим электрическим системам (СИГРЭ-72). Москва: Энергоатомиздат, 1974. С. 33–43.
2. Korobkova V. P., Morozov Yu. A., Stolyarov M. D. [et al.]. Vozdeystviye elektricheskogo polya raspredelitel'nykh ustroystv 500 i 750 kV na obsluzhivayushchiy personal i sredstva dlya ego zashchity [Impact of the electric field of 500 and 750 kV on personnel and means for their protection]. Podstantsii peremennogo toka. Alternating Current Substations. Moscow, 1974. P. 33–43. (In Russ.).
3. Нормы и правила по охране труда при работах на подстанциях и воздушных линиях электропередачи напряжением 400, 500 и 750 кВ переменного тока промышленной частоты № 868-70. Москва: СЦНТИ ОРГЭС, 1972. 11 с.
4. Normy i pravila po okhrane truda pri rabotakh na podstantsiyakh i vozduzhnykh liniyakh elektroperedachi napryazheniyem 400, 500 i 750 kV peremennogo toka promyshlennoy chastoty № 868-70 [Rules and regulations on labor, protection at 400, 500, and 750 kV A. C. substations and overhead lines of industrial frequency]. Moscow, 1972. 11 p. (In Russ.).
5. ГОСТ 12.1.002–84. Система безопасности труда. Электрические поля промышленной частоты. Допустимые уровни напряженности и требования к проведению контроля на рабочих местах. Москва: Из-во стандартов, 1984. 8 с.
6. GOST 12.1.002–84. Sistema bezopasnosti truda. Elektricheskiye polya promyshlennoy chastoty. Dopustimyye urovni napryazhennosti i trebovaniya k provedeniyu kontrolya na rabochikh mestakh [Occupational safety standards system. Power frequency electric fields. Permissible levels of field strength and requirements for control at work-places]. Moscow, 1984. 8 p. (In Russ.).
7. Hyberg B. R., Herstad K., Larsen K. B. Measuring electric field using pressure sensitive elements. *IEEE Conference Record of International Symposium on Electrical Insulation*. 1978. P. 90–93.
8. А. с. 1478159 А1 СССР, МКИ G01R 29/12. Индикатор электростатического поля / М. Ю. Бродский, О. В. Харламов, А. С. Малевский-Малевич, А. К. Евменко. № 4236759/24-09; заявл. 28.04.87; опубл. 07.05.89, Бюл. № 17.
9. A. s. 1478159 A1 USSR, IPC G01R 29/12. Indikator elektrostaticheskogo polya [Electrostatic field indicator] /

М. Ю. Бродский, О. В. Кхарламов, А. С. Малевский-Малевич, А. К. Евменко. No. 4236759/24-09. (In Russ.).

6. Колмогорова С. С., Бирюков С. В. Проектирование электроиндукционных датчиков и средств измерений электрических полей: моногр. Санкт-Петербург: Реноме, 2022. 180 с. ISBN 978-5-00125-731-8. DOI: 10.25990/7bky-3e46.

Kolmogorova S. S., Biryukov S. V. *Proyektirovaniye elektroiinduktsionnykh datchikov i sredstv izmereniy elektricheskikh poley* [Design of electroinductive sensors and electric field measuring instruments]. Saint Petersburg, 2022. 180 p. ISBN 978-5-00125-731-8. DOI: 10.25990/7bky-3e46. (In Russ.).

7. Бирюков С. В., Тюкина Л. В., Тюкин А. В. Сдвоенные сферические датчики напряженности низкочастотных электрических полей нового поколения // Омский научный вестник. 2021. № 5 (179). С. 62–67. DOI: 10.25206/1813-8225-2021-179-62-67. EDN: AVJDSB.

Biryukov S. V., Tyukina L. V., Tyukin A. V. *Sdvoyennyye sfericheskiye datchiki napryazhennosti nizkochastotnykh elektricheskikh poley novogo pokoleniya* [Dual spherical intensity sensors for new generation low-frequency electric fields]. *Omskiy nauchnyy vestnik. Omsk Scientific Bulletin*. 2021. No. 5 (179). P. 62–67. DOI: 10.25206/1813-8225-2021-179-62-67. EDN: AVJDSB. (In Russ.).

8. Бирюков С. В., Тюкина Л. В., Тюкин А. В. Сдвоенный сферический датчик напряженности электрического поля // Вестник Воронежского государственного технического университета. 2021. Т. 17, № 5. С. 85–91. DOI: 10.36622/VSTU.2021.15.5.012. EDN: DZPPSE.

Biryukov S. V., Tyukina L. V., Tyukin A. V. *Sdvoyennyy sfericheskiy datchik napryazhennosti elektricheskogo polya* [Dual spherical electric field voltage sensor]. *Vestnik Voronezhskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta. Bulletin of Voronezh State Technical University*. 2021. Vol. 17, no. 5. P. 85–91. DOI: 10.36622/VSTU.2021.15.5.012. EDN: DZPPSE. (In Russ.).

9. Бирюков С. В., Тюкина Л. В., Тюкин А. В. Датчики напряженности электрического поля сдвоенного типа повышенной точности // Вестник Воронежского государственного технического университета. 2022. Т. 18, № 2. С. 86–93. DOI: 10.36622/VSTU.2022.18.2.012. EDN: TZSZFN.

Biryukov S. V., Tyukina L. V., Tyukin A. V. *Datchiki napryazhennosti elektricheskogo polya sdvoyennogo tipa povyshennoy tochnosti* [Dual type of electric field sensors of increased accuracy]. *Vestnik Voronezhskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta. Bulletin of Voronezh State Technical University*. 2022. Vol. 18, no. 2. P. 86–93. DOI: 10.36622/VSTU.2022.18.2.012. EDN: TZSZFN. (In Russ.).

10. Бирюков С. В., Тюкина Л. В., Тюкин А. В. Исследование сдвоенного сферического датчика напряженности электрического поля с составными чувствительными элементами // Вестник Воронежского государственного технического университета. 2022. Т. 18, № 5. С. 113–123. DOI: 10.36622/VSTU.2022.18.5.015. EDN: IHMMCU.

Biryukov S. V., Tyukina L. V., Tyukin A. V. *Issledovaniye sdvoyennogo sfericheskogo datchika napryazhennosti elektricheskogo polya s sostavnymi chuvstvitel'nyimi elementami* [Investigation of a dual spherical electric field strength sensor with composite sensitive elements]. *Vestnik Voronezhskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta. Bulletin of Voronezh State Technical University*. 2022. Vol. 18, no. 5. P. 113–123. DOI: 10.36622/VSTU.2022.18.5.015. EDN: IHMMCU. (In Russ.).

11. Бирюков С. В. Двухкомпонентный сферический датчик напряженности электрического поля сдвоенного типа // Омский научный вестник. 2025. № 1 (193). С. 98–106. DOI: 10.25206/1813-8225-2025-193-98-106. EDN: JXPOUZ.

Biryukov S. V. *Dvukhkomponentnyy sfericheskiy datchik napryazhennosti elektricheskogo polya sdvoyennogo tipa* [Two-component spherical dual-type electric field strength sensor]. *Omskiy nauchnyy vestnik. Omsk Scientific Bulletin*. 2025.

No. 1 (193). P. 98–106. DOI: 10.25206/1813-8225-2025-193-98-106. EDN: JXPOUZ. (In Russ.).

12. Бирюков С. В. Сравнительное исследование двойного и сдвоенного электроиндукционных сферических датчиков напряженности электрического поля // Омский научный вестник. 2024. № 3. (191). С. 125–132. DOI: 10.25206/1813-8225-2024-191-125-132. EDN: IXQSUI.

Biryukov S. V. *Sravnitel'noye issledovaniye dvoynogo i sdvoyennogo elektroiinduktsionnykh sfericheskikh datchikov napryazhennosti elektricheskogo polya* [Comparative study of double and dual electroinduction spherical electric field strength sensors]. *Omskiy nauchnyy vestnik. Omsk Scientific Bulletin*. 2024. No. 3. (191). P. 125–132. DOI: 10.25206/1813-8225-2024-191-125-132. EDN: IXQSUI. (In Russ.).

13. Бирюков С. В., Тюкина Л. В. Модернизированный метод измерения напряженности электрического поля по среднему значению сдвоенными датчиками и устройства для его реализации // Динамика систем, механизмов и машин. 2021. Т. 9, № 3 (179). С. 64–72. DOI: 10.25206/2310-9793-9-3-64-72. EDN: QDVMJD.

Biryukov S. V., Tyukina L. V. *Modernizirovannyy metod izmereniya napryazhennosti elektricheskogo polya po srednemu znacheniyu sdvoyennymi datchikami i ustroystva dlya ego realizatsii* [An upgraded method for measuring the electric field strength by the average value of dual sensors and devices for its implementation]. *Dinamika sistem, mekhanizmov i mashin. Dynamics of Systems, Mechanisms and Machines*. 2021. Vol. 9, no. 3 (179). P. 64–72. DOI: 10.25206/2310-9793-9-3-64-72. EDN: QDVMJD. (In Russ.).

14. Гутников В. С. Интегральная электроника в измерительных устройствах. Ленинград: Энергоатомиздат, 1988. 301 с. ISBN 5-283-04375-4.

Gutnikov V. S. *Integral'naya elektronika v izmeritel'nykh ustroystvakh* [Integrated electronics in measuring devices]. Leningrad, 1988. 301 p. ISBN 5-283-04375-4. (In Russ.).

БИРЮКОВ Сергей Владимирович, доктор технических наук, профессор (Россия), профессор кафедры «Физика» Омского государственного технического университета, г. Омск.

SPIN-код: 9384-0078

ORCID: 0000-0002-1362-9911

AuthorID (SCOPUS): 7006438919

Адрес для переписки: sbiryukov154@mail.ru

Прозрачность финансовой деятельности: автор не имеет финансовой заинтересованности в представленных материалах и методах. Конфликт интересов отсутствует.

Статья поступила в редакцию 23.03.2025; одобрена после рецензирования 10.07.2025; принята к публикации 14.07.2025.

BIRYUKOV Sergey Vladimirovich, Doctor of Technical Sciences, Professor, Professor of the Physics Department, Omsk State Technical University, Omsk.

SPIN-code: 9384-0078

ORCID: 0000-0002-1362-9911

AuthorID (SCOPUS): 7006438919

Correspondence address: sbiryukov154@mail.ru

Financial transparency: the author has no financial interest in the presented materials or methods. There is no conflict of interest.

The article was submitted 23.03.2025; approved after reviewing 10.07.2025; accepted for publication 14.07.2025.