



ЭЛЕКТРОНИКА, ФОТОНИКА, ПРИБОРОСТРОЕНИЕ И СВЯЗЬ

УДК 621.317.628

DOI: 10.25206/1813-8225-2025-193-98-106

EDN: JXPOUZ

С. В. БИРЮКОВОмский государственный
технический университет,
г. Омск

ДВУХКОМПОНЕНТНЫЙ СФЕРИЧЕСКИЙ ДАТЧИК НАПРЯЖЕННОСТИ ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ПОЛЯ СДВОЕННОГО ТИПА

Для контроля уровней напряженности электрического поля вокруг высоковольтного энергетического оборудования, линий электропередачи, подстанций необходимы простые и удобные в использовании современные датчики. Такие датчики обеспечат технику безопасности и охрану труда обслуживающего персонала энергетического оборудования. В связи с этим разработка датчиков напряженности электрического поля является важной и актуальной задачей. В статье предлагается один из возможных вариантов построения подобных датчиков. Датчик представляет собой двухкомпонентный сферический датчик сдвоенного типа. На сферической проводящей поверхности датчика размещаются изолированно от него двенадцать двуугольных сферических проводящих электродов. Электроды служат для формирования чувствительных элементов четырёх двойных датчиков по два на каждой координатной оси. Устанавливается, что размеры чувствительных элементов датчика влияют на его погрешность, вызванную неоднородностью поля. Сдвоенный сферический датчик обладает знакопеременной погрешностью от неоднородности поля, не превышающей $\pm 1,1\%$ во всем пространственном диапазоне $0 \leq a \leq 1$, что соответствует минимальному расстоянию до источника поля $d = R$. Погрешность датчика обеспечивается обоснованно выбранными угловыми размерами двенадцати двуугольных сферических электродов датчика основных $\alpha_0 = 90^\circ$ и $\beta_{01} = 30^\circ$. Датчик имеет по каждой координатной оси три выхода, два соответствуют одинарным датчикам, а один сдвоенному датчику. Такое конструктивное решение позволяет расширить его функциональные возможности.

Сдвоенный двухкомпонентный датчик может быть использован для построения средств контроля и измерения параметров электрического поля промышленной частоты в зонах с повышенной напряженностью.

Ключевые слова: электрическое поле, напряженность поля, сдвоенный сферический датчик, двойной сферический датчик, чувствительный элемент, сферический двугульник, погрешность от неоднородности поля.

Введение. Обзор научно-технической литературы показывает [1–7], что наибольшее распространения получили электроиндукционные датчики напряженности электрического поля (ЭП), основанные на электростатической индукции.

Такие датчики состоят из проводящих тел различных геометрических форм, таких как куб, цилиндр и сфера. Из всех представленных форм, лежащих в основании датчика, наиболее приемлемой является сферическая форма. Из-за отсутствия углов и гладкой поверхности сфера вносит в ЭП минимум искажений, в большей части поддающихся аналитическому расчету. Для снятия сигналов с проводящей сферической поверхности используются чувствительные элементы (ЧЭ), представляющие собой части проводящей сферической поверхности. Обычно ЧЭ в сферических датчиках выполняются в форме полусфер [1–4], сферических сегментов [5, 6] или их частей [7]. ЧЭ датчиков могут включаться в измерительную цепь синфазно и противофазно. Синфазное и противофазное включение ЧЭ датчиков делают датчики на датчики одинарного и двойного типа. Одинарные датчики имеют один, а двойные — два диаметрально противоположных ЧЭ. Одинарные датчики обладают большой совокупностью погрешностей, причиной которых могут быть: электрические помехи, шумы, наводки и неоднородность поля. Двойные датчики за счет противофазного (дифференциального) включения в измерительную цепь ЧЭ значительно уменьшают указанные источники погрешностей одинарных датчиков, поэтому они получили более широкое распространение. Однако погрешность, вызванная неоднородностью поля, уменьшается незначительно и составляет порядка 5–20 %. Следует также отметить, что известные одинарные и двойные датчики имеют ограниченный пространственный диапазон измерения. Обычно он не указывается разработчиками приборов в их технической документации [8–18].

Решить проблемы, связанные с устранением недостатков одинарных и двойных датчиков, позволяет новый тип датчиков — сдвоенные датчики [19, 20].

Сдвоенные датчики расширили номенклатуру одинарных и двойных датчиков. Они представляют собой два двойных датчика, объединенных в единое целое, центры и координатные оси которых совпадают. При этом обязательным требованием к двойным датчикам является противоположность по знаку их погрешностей, вызванных неоднородностью ЭП.

Известные сдвоенные сферические датчики имеют ЧЭ в форме полусфер и сферических сегментов. Расширяя номенклатуру сдвоенных датчиков по форме их ЧЭ и улучшая их возможности, в данной работе исследуется двухкомпонентный сферический датчик напряженности ЭП сдвоенного типа с двугульными ЧЭ.

Постановка задачи

В задачи исследований входит:

1) разработка новых теоретических положений, по взаимодействию датчика, имеющего двугульные сферические электроды с ЭП различной неоднородности;

2) разработка двухкомпонентного сферического датчика напряженности ЭП сдвоенного типа с двенадцатью двугульными ЧЭ;

3) подбор лучших размеров двугульных сферических ЧЭ датчика, обеспечивающих ему минимально возможную погрешность от неоднородности поля в допустимом пространственном диапазоне измерений.

Краткая теория. Полная теория взаимодействия сферических датчиков с ЧЭ в форме сферических многоугольников с ЭП различной неоднородности, таких как однородное поле и поле точечного заряда, рассмотрена в работе [21], а краткая теория работы однокоординатного сферического датчика изложена в работах [22, 23]. Поэтому здесь из краткой теории, изложенной в работах [22, 23], будут приведены только основные формульные выражения, необходимые для пояснения работы двухкомпонентного сферического датчика с ЧЭ в форме сферических двугульников. Угловые размеры сферических двугульников задаются продольным $\alpha = 2\alpha_0$ и поперечным $\beta = 2\beta_0$ углами. Для двугульника угол $\alpha_0 = 90^\circ$, а угол β_0 может принимать значения от 0 до 90° (рис. 1).

В *однородном поле* [22, 23], направленном на диаметрально противоположные ЧЭ, индуцируются электрические заряды

$$q_{1,2\text{одн.}}(t) = \mp 3\pi\epsilon\epsilon_0 R^2 \sin\beta_0 \cdot E_0(t), \quad (1)$$

где здесь и далее q_1 и q_2 — электрические заряды, индуцированные полем на диаметрально противоположных ЧЭ 1 и ЧЭ 2; знак «–» соответствует ЧЭ 1, в который входит, а знак «+» соответствует ЧЭ 2, из которого выходит вектор напряженности ЭП.

Таким образом, при дифференциальном включении диаметрально противоположных ЧЭ датчика в измерительную цепь дифференциальный электрический будет определяться как

$$\begin{aligned} \Delta q_{\text{одн.}}(t) &= q_{1\text{одн.}}(t) - q_{2\text{одн.}}(t) = \\ &= 6\pi\epsilon\epsilon_0 R^2 \sin\beta_0 \cdot E_0(t); \end{aligned} \quad (2)$$

В *неоднородном поле точечного заряда* [21] на тех же ЧЭ датчика будут индуцироваться соответствующие электрические заряды

$$\begin{aligned} q_{1\text{неодн.}}(t) &= -6R^2\epsilon \cdot \int_0^\pi \int_0^{\arctg\left(\frac{\text{tg}\beta_0}{\sin\alpha}\right)} \frac{1}{3a} \left[\frac{1-a^2}{\sqrt{(1-2a\cos\beta+a^2)^3}} - 1 \right] \times \\ &\times \cos\beta \cdot da \cdot d\beta \cdot E(t). \end{aligned} \quad (3)$$

$$\begin{aligned} q_{2\text{неодн.}}(t) &= 6R^2\epsilon \cdot \int_0^\pi \int_0^{\arctg\left(\frac{\text{tg}\beta_0}{\sin\alpha}\right)} \frac{1}{3a} \left[\frac{1-a^2}{\sqrt{(1+2a\cos\beta+a^2)^3}} - 1 \right] \times \\ &\times \cos\beta \cdot da \cdot d\beta \cdot E(t). \end{aligned} \quad (4)$$

Тогда дифференциальный электрический заряд с диаметрально противоположных ЧЭ датчика определится как

$$\Delta q_{\text{неодн.}}(t) = q_{1\text{неодн.}}(t) - q_{2\text{неодн.}}(t). \quad (5)$$

Выражения (1)–(5) будут положены в основу построения сдвоенного двухкомпонентного сфери-

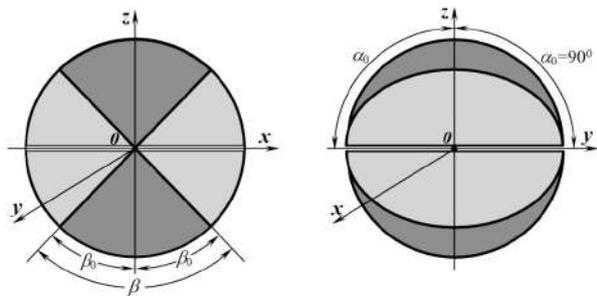


Рис. 1. Сфера с выделенными темным цветом участками её поверхности в форме сферических двуугольников с указанием их угловых размеров

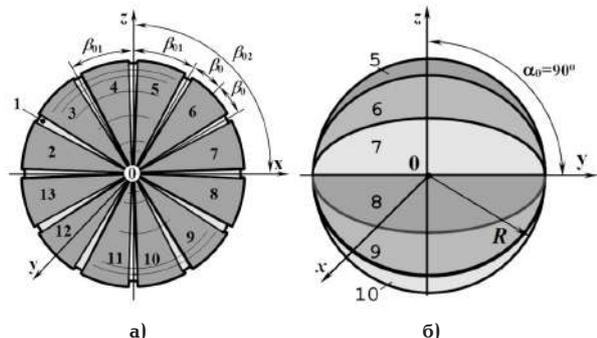


Рис. 2. Двухкомпонентный датчик напряженности ЭП с двенадцатью двуугольными сферическими электродами: а) вид на ось y; б) вид на ось x

ческого датчика напряженности ЭП с ЧЭ в форме сферических двуугольников и полусфер.

Сдвоенный двухкомпонентный сферический датчик. Датчик представлен на рис. 2.

В основе датчика лежит проводящее сферическое основание 1 (см. рис. 2) радиуса R , на поверхности которого через изоляционный слой (на рис. 2 не показан) и изолированно друг от друга располагаются двенадцать проводящих двуугольных сферических электродов 2–13 (рис. 2а).

Толщина изоляционного слоя и электродов 2–13 много меньше радиуса R сферического основания датчика, что позволяет считать поверхность датчика единой сферической поверхностью. Если мысленно разбить сферическое основание датчика на две полусферы, то на верхней и нижней полусферах будут находиться по шесть электродов: 2–7 и 8–13, которые можно объединить в диаметрально противоположные пары 2→8, 3→9, 4→10, 5→11, 6→12 и 7→13. Для построения двухкомпонентного датчика расположим его координатные оси x и z в двух взаимно перпендикулярных плоскостях, как показано на рис. 2. Согласно рис. 2, на координатной оси x расположатся шесть диаметрально противоположных пар электродов 5→11, 6→12, 7→13, 8→2, 9→3 и 10→4. На координатной оси z расположатся диаметрально противоположные пары электродов 2→8, 3→9, 4→10, 5→11, 6→12 и 7→13.

Все электроды датчика, выполненные в форме сферических двуугольников, ограничены двумя угловыми размерами α_0 и β_0 , (см. рис. 2). Для двуугольного сферического электрода первый угловой размер $\alpha_0 = 90^\circ$, а второй β_0 определяется требуемой погрешностью от неоднородности ЭП.

Из представленной системы электродов датчика можно сформировать одинарный, двойной и сдво-

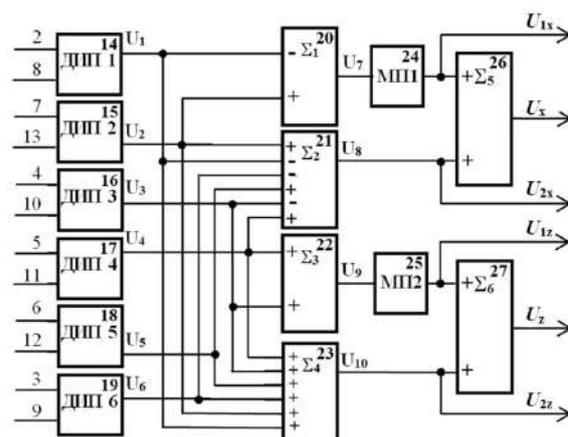


Рис. 3. Измерительная цепь сдвоенного датчика напряженности ЭП

енный двухкомпонентный датчики [1–4, 24]. Одинарные и двойные датчики хорошо известны. Они обладают рядом достоинств и недостатков. Общим их недостатком является высокая погрешность при измерении неоднородных ЭП. На смену им пришли сдвоенные датчики [24, 25], состоящие из двух двойных датчиков. Главным недостатком сдвоенных датчиков — сложность их конструктивного решения, однако малая погрешность при измерении неоднородных ЭП сводит на нет сложность их конструктивного изготовления. В связи с этим в работе будем рассматривать построение сдвоенного двухкомпонентного датчика, состоящего из двенадцати двуугольных сферических электродов.

Сформируем из двенадцати электродов двухкомпонентный сдвоенный датчик. По каждой координатной оси будут использоваться шесть пар электродов. Из шести пар электродов, расположенных на координатных осях x и z , сформируем два двойных датчика, входящих в состав сдвоенного датчика на соответствующей координатной оси. Первый двойной датчик по оси x будет состоять из диаметрально противоположных пар объединенных электродов 7+8→2+13. Второй двойной датчик по оси x сформируем из диаметрально противоположных пар объединенных электродов 5+6+7+8+9+10→2+3+4+11+12+13. Объединенные пары электродов второго двойного датчика формируют ЧЭ в форме полусфер (вырожденные сферические двуугольники). Аналогично ЧЭ первого двойного датчика по оси z будут состоять из объединенных электродов 4+5 и 10+11, а второго двойного датчика — из объединенных электродов 2+3+4+5+6+7 и 8+9+10+11+12+13.

Объединение электродов сдвоенного датчика осуществляется посредством измерительной цепи (рис. 3).

Измерительная цепь состоит из шести дифференциальных измерительных преобразователей 14–19 ДИП1 — ДИП6, шести сумматоров 20–23 и 26, 27 и двух масштабных преобразователей 24, 25 МП1 и МП2. Сумматоры 20, 22, 26 и 27 имеют два входа (у сумматора 20 один вход инвертирующий, обозначен минусом «–», а у сумматоров 22, 26 и 27 все входы неинвертирующие, обозначены плюсом «+»). Сумматоры 21, 23 имеют шесть входов (у сумматора 21 три инвертирующих, обозначены минусом «–» и три неинвертирующих входов, обозначены плюсом «+»), а у сумматора 23 шесть входов неинвертирующих обозначены плюсом

«+»), масштабные преобразователи 24 и 25 служат для выравнивания выходных сигналов первого и второго двойного датчика, находящихся на координатных осях x и z соответственно. Выравнивание выходных сигналов датчика должно выполняться в однородном поле.

В качестве измерительных преобразователей 14–19 используются дифференциальные интеграторы тока. Особенностью интеграторов тока является близкий к нулю входной импеданс и независимость выходного напряжения от частоты входного сигнала.

Сумматоры объединяют дифференциальные сигналы с электродов датчика и формируют выходной сигнал сдвоенного датчика.

Двухкомпонентный сферический сдвоенный датчик в электрическом поле. Идеей создания сдвоенных датчиков послужил новый метод измерения напряженности ЭП по среднему значению [20]. Реализация метода требует одновременного измерения в одной точке поля двух значений напряженности $E_1(t)$ и $E_2(t)$. В связи с чем возникла необходимость помещать в данную точку поля два датчика, имеющих противоположные по знаку погрешности, результат измерения $E(t)$ определять как среднее значение из измеренных значений $E_1(t)$ и $E_2(t)$, т.е.

$$E(t) = [E_1(t) + E_2(t)]/2. \quad (6)$$

В однородном поле $E_1(t) = E_2(t)$, а следовательно, $E(t) = E_1(t) = E_2(t)$. В неоднородном поле из-за погрешности, вызванной неоднородностью поля $E_1(t) \neq E_2(t)$, тогда, в этом случае, $E(t)$ будет равно среднему значению из $E_1(t)$ и $E_2(t)$. С учетом сказанного рассмотрим работу двухкомпонентного сферического сдвоенного датчика в полях различной неоднородности. В качестве таких полей выберем однородное поле свободного пространства и неоднородное поле точечного источника.

Однородное поле. В исследуемую точку однородного ЭП помещают датчик. Под действием поля на проводящих электродах датчика 2–13 индуцируются электрические заряды. Обозначим заряды, индуцированные на электродах датчика номерами соответствующих электродов и эти номера присвоим входам ДИП 1–ДИП 6 (см. рис. 3). С помощью ДИП 14–19 заряды с пар 2–8, 3–9, 4–10, 5–11, 6–12 и 7–13 проводящих электродов преобразуются в напряжения $U_1(t)$, $U_2(t)$, $U_3(t)$, $U_4(t)$, $U_5(t)$ и $U_6(t)$. Эти напряжения пропорциональны разности зарядов с пар проводящих электродов 2–8, 3–9, 4–10, 5–11, 6–12 и 7–13. Эти напряжения будут соответственно равны

$$U_1(t) = k\Delta q_1(t) = k[q_2(t) - q_8(t)];$$

$$U_2(t) = k\Delta q_2(t) = k[q_7(t) - q_{13}(t)];$$

$$U_3(t) = k\Delta q_3(t) = k[q_4(t) - q_{10}(t)];$$

$$U_4(t) = k\Delta q_4(t) = k[q_5(t) - q_{11}(t)];$$

$$U_5(t) = k\Delta q_5(t) = k[q_6(t) - q_{12}(t)];$$

$$U_6(t) = k\Delta q_6(t) = k[q_3(t) - q_9(t)],$$

где k — коэффициент преобразования дифференциальных измерительных преобразователей 14–19.

Из этих напряжений формируются напряжения выходных сигналов четырех двойных датчиков

два по координатной оси x и два по координатной оси z .

По координатной оси x из проводящих электродов формируются два двойных датчика. Первый датчик формируются из диаметрально противоположных пар электродов 7+8→2+13, а второй — из диаметрально противоположных пар электродов 5+6+7+8+9+10→2+3+4+11+12+13. Первому и второму датчику соответствуют напряжения $U_7(t)$ и $U_8(t)$, сформированные на выходах сумматоров 20 и 21:

$$\begin{aligned} U_7(t) &= U_2(t) - U_1(t) = \\ &= k[q_7(t) - q_{13}(t)] - k[q_2(t) - q_8(t)] = \\ &= k\{[q_7(t) + q_8(t)] - [q_2(t) + q_{13}(t)]\} = \\ &= 6k\pi\epsilon\epsilon_0 R^2 \sin\beta_{01} \cdot E_{0x}(t). \end{aligned} \quad (7)$$

$$\begin{aligned} U_8(t) &= U_1(t) - U_2(t) - U_3(t) + U_4(t) + U_5(t) - U_6(t) = \\ &= k[q_2(t) - q_8(t)] - k[q_7(t) - q_{13}(t)] - k[q_4(t) - q_{10}(t)] - \\ &+ k[q_5(t) - q_{11}(t)] + k[q_6(t) - q_{12}(t)] - k[q_3(t) - q_9(t)] = \\ &= k\left\{ \begin{aligned} &[q_5(t) + q_6(t) + q_7(t) + q_8(t) + q_9(t) + q_{10}(t)] - \\ &[-q_2(t) + q_3(t) + q_4(t) + q_{11}(t) + q_{12}(t) + q_{13}(t)] \end{aligned} \right\} = \\ &= 6k\pi\epsilon\epsilon_0 R^2 \sin\beta_{02} \cdot E_{0x}(t). \end{aligned} \quad (8)$$

Из выражения (7) видно, что сумматор 20 объединяет сигналы с электродов 7, 8 и 2, 13 и формирует диаметрально противоположные ЧЭ первого датчика, состоящие из электродов 7+8 и 2+13. Таким образом, ЧЭ первого двойного датчика, расположенные по оси x , представляют собой двуугольники с угловыми размерами $\alpha_0 = 90^\circ$ и $\beta_{01} = 30^\circ$. С учетом углового размера $\beta_{01} = 30^\circ$ выражение (7) можно записать

$$U_7(t) = 3k\pi\epsilon\epsilon_0 R^2 \cdot E_{01x}(t). \quad (9)$$

Выражение (8) показывает, что сумматор 21 объединяет сигналы с электродов 5, 6, 7, 8, 9, 10 и 2, 3, 4, 11, 12, 13 и формирует диаметрально противоположные ЧЭ второго двойного датчика, состоящие из электродов 4+6+7+8+9+10 и 2+3+4+11+12+13. Таким образом, чувствительные элементы второго двойного датчика по оси x представляют собой полусферы с угловыми размерами $\alpha_0 = 90^\circ$ и $\beta_{02} = 90^\circ$. Тогда для выходного напряжения второго двойного датчика с учетом выражения (8) можно записать

$$U_8(t) = 6k\pi\epsilon\epsilon_0 R^2 \cdot E_{02x}(t). \quad (10)$$

Аналогично рассуждая, получим выходные напряжения первого и второго двойных датчиков по координатной оси z .

Выходной сигнал первого двойного датчика $U_9(t)$ по оси z формируется на выходе сумматора 22. Он будет определяться суммой напряжений $U_3(t)$ и $U_4(t)$

$$\begin{aligned} U_9(t) &= U_3(t) + U_4(t) = \\ &= k[q_4(t) - q_{10}(t)] + k[q_5(t) - q_{11}(t)] = \\ &= k\{[q_4(t) + q_5(t)] - [q_{10}(t) + q_{11}(t)]\} = \\ &= 6k\pi\epsilon\epsilon_0 R^2 \sin\beta_{01} \cdot E_{0z}(t) = 3k\pi\epsilon\epsilon_0 R^2 \cdot E_{0z}(t), \end{aligned} \quad (11)$$

т.к. для ЧЭ 4+5 и 10+11 имеют угловой размер, как будет показано ниже, $\beta_{01} = 30^\circ$.

Выходной сигнал второго двойного датчика $U_{10}(t)$ по оси z формируется на выходе сумматора 23. Он

будет определяться суммой шести напряжений $U_1(t) - U_6(t)$ учетом их знаков

$$U_{10}(t) = U_1(t) + U_2(t) + U_3(t) + U_4(t) + U_5(t) + U_6(t) = \\ = k \left\{ \begin{aligned} & [q_2(t) + q_3(t) + q_4(t) + q_5(t) + q_6(t) + q_8(t)] - \\ & - [q_8(t) + q_9(t) + q_{10}(t) + q_{11}(t) + q_{12}(t) + q_{13}(t)] \end{aligned} \right\} = \\ = 6k\pi\epsilon\epsilon_0 R^2 \sin \beta_{02} \cdot E_{0z}(t) = 6k\pi\epsilon\epsilon_0 R^2 \cdot E_{0z}(t), \quad (12)$$

т.к. для ЧЭ $2+3+4+5+6+7$ и $8+9+10+11+12+13$ угловой размер $\beta_{02} = 90^\circ$.

В свою очередь выходные напряжения $U_7(t)$ и $U_8(t)$ датчиков, расположенных на оси x , соответственно пропорциональны составляющим вектора напряженности измеряемого ЭП E_{01x} и E_{02x} , а выходные напряжения $U_9(t)$ и $U_{10}(t)$ датчиков, расположенных на оси z , соответственно пропорциональны напряженностям измеряемого электрического поля E_{01z} и E_{02z} .

В однородном поле должны выполняться условия равенства напряженностей $E_{1x}(t) = E_{2x}(t)$ и $E_{1z}(t) = E_{2z}(t)$, а следовательно, и напряжений $U_7(t) = U_8(t)$ и $U_9(t) = U_{10}(t)$. Из-за разного числа проводящих электродов, участвующих в формировании выходных напряжений первых и вторых двойных датчиков в однородном поле напряжения $U_7(t) \neq U_8(t)$ и напряжения $U_9(t) \neq U_{10}(t)$. Следовательно, $E_{01x} \neq E_{02x}$ и $E_{01z} \neq E_{02z}$. Для правильной работы сдвоенного датчика необходимо обеспечить в однородном поле выполнение условий $U_7(t) = U_8(t)$ ($E_{01x}(t) = E_{02x}(t)$) и $U_9(t) = U_{10}(t)$ ($E_{01z}(t) = E_{02z}(t)$). Выполнение этих условий обеспечивается один раз в процессе эксплуатации датчика. Для этого датчик вносится в однородное ЭП и поочередно ориентируется по координатным осям x и z . С помощью масштабных преобразователей 24 МП1 и 25 МП2 (см. рис. 3) добиваются равенства напряжений $E_{01x}(t) = E_{02x}(t)$ и $E_{01z}(t) = E_{02z}(t)$. Для этого в измерительной цепи предусмотрены выходы U_{1x} , U_{2x} и U_{1z} , U_{2z} . При выполнении этих условий датчик готов к работе.

Из выражений (9), (10) и (11), (12) следует, что $U_8(t) = 2U_7(t) = U_7'(t)$ и $U_{10}(t) = 2U_9(t) = U_9'(t)$, где $U_7'(t)$ и $U_9'(t)$ напряжения после масштабных преобразователей 24 и 25. Тогда напряжения $U_7'(t)$ и $U_8(t)$ будут представлять собой выходные напряжения $U_{1x}(t)$ и $U_{2x}(t)$, пропорциональные составляющей напряженностям ЭП $E_{01x}(t)$ и $E_{02x}(t)$ и соответствующие первым и вторым двойным датчиков, расположенных по координатной оси x . В то же время $U_9(t)$ и $U_{10}(t)$ будут представлять собой выходные напряжения $U_{1z}(t)$ и $U_{2z}(t)$, пропорциональные составляющей напряженностям ЭП $E_{01z}(t)$ и $E_{02z}(t)$ соответствующие первым и вторым двойным датчиков, расположенных по координатной оси z .

Тогда, согласно методу измерения напряженности ЭП по среднему значению [27] и выражению (6), заложенному в работу сдвоенного датчика выходные напряжения $U_x(t)$ и $U_z(t)$ сдвоенных датчиков по координатной оси x и z , пропорциональные составляющим $E_{0x}(t)$ и $E_{0z}(t)$ вектора напряженности ЭП, определяются следующим образом

$$U_x(t) = \frac{U_{1x}(t) + U_{2x}(t)}{2} = 6k\pi\epsilon\epsilon_0 R^2 \sin \beta_{01} \cdot E_{0x}(t); \quad (13)$$

$$U_z(t) = \frac{U_{1z}(t) + U_{2z}(t)}{2} = 6k\pi\epsilon\epsilon_0 R^2 \sin \beta_{02} \cdot E_{0z}(t). \quad (14)$$

Напряжения $U_x(t)$ и $U_z(t)$ пропорциональны измеряемым составляющим вектора напряженности ЭП

$$E_{0x}(t) = kU_x(t) = \frac{E_{01x}(t) + E_{02x}(t)}{2}$$

и

$$E_{0z}(t)U_z(t) = kU_z(t) = \frac{E_{01z}(t) + E_{02z}(t)}{2}.$$

Таким образом, полученное выходное напряжение $U_x(t)$ и $U_z(t)$ сдвоенного датчика пропорционально среднему значению составляющих вектора напряженности ЭП $E_0(t)$.

Неоднородное поле. В отличие от однородного поля, в неоднородном поле $U_{1x}^n(t) \neq U_{2x}^n(t)$ и $U_{1z}^n(t) \neq U_{2z}^n(t)$. Неравенство выходных напряжений двойных датчиков по координатным осям x и z обусловлено погрешностями двойных датчиков, вызванными неоднородностью поля.

Поэтому выражения (7), (8) и (11), (12) для напряжений двойных датчиков по координатным осям x и z необходимо представить с учетом погрешностей

$$U_{1x}^n(t) = 6k\pi\epsilon\epsilon_0 R^2 \sin \beta_{01} [1 + \delta_1(a, \beta_{01})] \cdot E_{0x}(t) = \\ = G_x [1 + \delta_1(a, \beta_{01})] \cdot E_{0x}(t); \quad (15)$$

$$U_{2x}^n(t) = 6k\pi\epsilon\epsilon_0 R^2 \sin \beta_{02} [1 + \delta_2(a, \beta_{02})] \cdot E_{0x}(t) = \\ = G_x [1 + \delta_2(a, \beta_{02})] \cdot E_{0x}(t); \quad (16)$$

$$U_{1z}^n(t) = 6k\pi\epsilon\epsilon_0 R^2 \sin \beta_{01} [1 + \delta_1(a, \beta_{01})] \cdot E_{0z}(t) = \\ = G_z [1 + \delta_1(a, \beta_{01})] \cdot E_{0z}(t); \quad (17)$$

$$U_{2z}^n(t) = 6k\pi\epsilon\epsilon_0 R^2 \sin \beta_{02} [1 + \delta_2(a, \beta_{02})] \cdot E_{0z}(t) = \\ = G_z [1 + \delta_2(a, \beta_{02})] \cdot E_{0z}(t), \quad (18)$$

где индекс «н» у обозначений напряжений указывает на их принадлежность к неоднородному полю; $\delta_1(a, \beta_{01})$, $\delta_2(a, \beta_{02})$ — взаимно противоположные по знаку погрешности от неоднородности поля двойных датчиков; $a = R/d$ — пространственный диапазон измерения, характеризующий степень неоднородности поля; R — радиус сферического основания датчика; d — расстояние от центра сферического основания датчика до источника поля. Аналогично, выходные напряжения $U_x^n(t)$ и $U_z^n(t)$ сдвоенного датчика по составляющим модуля вектора напряженности ЭП, определяемые выражениями (13) и (14) с учетом погрешностей от неоднородности поля можно представить в виде

$$U_x^n(t) = 6k\pi\epsilon\epsilon_0 R^2 \sin \beta_{01} [1 + \delta(a, \beta_{01})] \cdot E_{0x}(t); \quad (19)$$

$$U_z^n(t) = 6k\pi\epsilon\epsilon_0 R^2 \sin \beta_{01} [1 + \delta(a, \beta_{01})] \cdot E_{0z}(t), \quad (20)$$

где $\delta(a, \beta_{01})$ — погрешность от неоднородности поля составляющих сдвоенного датчика.

Погрешность $\delta(a, \beta_{01})$ сдвоенного датчика, вызванную неоднородностью поля, по его составляющим можно найти на примере составляющей по оси z . Для этого воспользуемся выражениями (17) и (18) и проведем следующие преобразования

$$U_z(t) = \frac{U_{1z}^n(t) + U_{2z}^n(t)}{2} = \\ = \frac{G_z [1 + \delta_1(a, \beta_{01})] \cdot E_{0z}(t) + G_z [1 + \delta_2(a, \beta_{02})] \cdot E_{0z}(t)}{2} = \\ = G_z [1 + \delta(a, \beta_{01})] \cdot E_{0z}(t), \quad (21)$$

где

$$\delta(a, \beta_{01}) = \frac{\delta_1(a, \beta_{01}) + \delta_2(a, \beta_{02})}{2} \quad (22)$$

— результирующая погрешность составляющих модуля вектора напряженности ЭП $E_0(t)$ сдвоенного датчика, вызванная неоднородностью поля.

Погрешность $\delta_1(a, \beta_{01})$ первого двойного датчика с ЧЭ в форме сферических двуугольников находится из выражения

$$\delta_1(a, \beta_{01}) = \frac{\Delta q_{\text{неодн.}}(a, \beta_{01}) - \Delta q_{\text{одн.}}(\beta_{01})}{\Delta q_{\text{одн.}}(\beta_{01})} \cdot 100 \%, \quad (23)$$

где $\Delta q_{\text{одн.}}(\beta_0)$ и $\Delta q_{\text{неодн.}}(a, \beta_0)$ определяются выражениями (2) и (5) с учетом выражений (1)–(4).

Для второго двойного датчика с ЧЭ в форме полусфер ($\beta_{02} = 90^\circ$) погрешность $\delta_2(a, \beta_{02}) = \delta_2(a)$ определится выражением [26, 27]

$$\delta_2(a) = - \left[1 - \frac{2}{3a^2} \cdot \left(1 - \frac{1-a^2}{\sqrt{1+a^2}} \right) \right] \cdot 100 \%. \quad (24)$$

Представленная теория положена в основу математической модели для проведения математического моделирования работы сдвоенного датчика в полях различной неоднородности и выявления лучших угловых размеров его ЧЭ.

Математическое моделирование, проведенное в математическом редакторе Mathcad, позволило выявить лучшие угловые размеры β_{01} двуугольных составных сферических ЧЭ в широком пространственном диапазоне измерений $0 \leq a \leq 1$. Результаты моделирования в виде графика представлены на рис. 4.

При моделировании датчик перемещался в ЭП из бесконечности ($d \gg R$, где d — расстояние от центра датчика до источника поля; R — радиус датчика) к источнику поля до ($d \leq R$) вдоль оси x , а затем вдоль оси z . Из рис. 4 следует, что в пространственном диапазоне измерений $0 \leq a \leq 1$ погрешность датчика изменяется от отрицательной, принимающей минимальное значение минус 0,22 %, до положительной, принимающей максимальное значение плюс 1,1 %.

В связи с этим рассматриваемый двухкомпонентный сферический сдвоенный датчик будет обладать погрешностью $\pm 1,1$ % во всем пространственном диапазоне измерений $0 \leq a \leq 1$. Тогда лучшим угловым размером двуугольного ЧЭ датчика будет $\beta_{01} = 30^\circ$. Такие размеры попарно будут иметь ЧЭ 4, 5–10, 11 и 7, 8–2, 13. Остальные ЧЭ сдвоенного датчика будут иметь угловые размеры $\beta_0 = 15^\circ$.

Выводы и заключение. По результатам исследования можно сделать следующие выводы:

1. Предложено конструктивное решение двухкомпонентного сдвоенного сферического датчика напряженности электрического ЭП с двенадцатью ЧЭ в форме сферических двуугольников.

2. Датчик имеет по каждой координатной оси три выхода, два соответствуют одинарным датчикам, а один сдвоенному датчику. Такое конструктивное решение позволяет расширить функциональные возможности датчика.

3. Сдвоенный датчик обладает знакопеременной погрешностью от неоднородности поля, не превышающей $\pm 1,1$ % во всем пространственном диапазоне $0 \leq a \leq 1$.

4. Погрешность датчика обеспечивает обоснованно выбранные угловые размеры двенадцати двуугольных сферических электродов датчика $\alpha_0 = 90^\circ$ и $\beta_{01} = 30^\circ$.

В заключение необходимо сказать, что предложенный в работе двухкомпонентный сфериче-

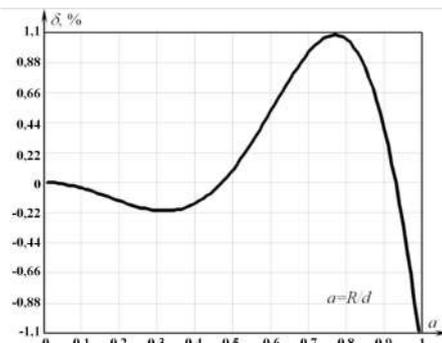


Рис. 4. График погрешности сдвоенного датчика для углового размера его ЧЭ в форме двуугольника $\alpha_{01} = 90^\circ$ и $\beta_{01} = 30^\circ$

ский сдвоенный датчик напряженности ЭП с ЧЭ в форме сферических двуугольников имеет определенные перспективы для использования в составе средств измерения напряженности ЭП. На следующем этапе необходимо рассмотреть возможность построения подобных сдвоенных трехкомпонентных сферических датчиков.

Список источников

1. Дез Ж., Пиррот П. Расчет и измерение напряженности электрического поля вблизи устройств высокого напряжения // Влияние электроустановок высокого напряжения на окружающую среду: переводы докл. Междунар. конф. по большим электрическим системам (СИГРЭ-76) / Под ред. Ю. П. Шкарина. Москва: Энергия, 1979. С. 10–19.
2. Chauzy S., Magnes P. Mise au point d'un mesureur de champ électrique alternatif 50 Hz // Rev. gen. elec. 1988. № 7. P. 27–38.
3. Прибор для измерения электрического поля ИНЭП-50. URL: https://www.tecnoshans2006.ru/Documents/ACS/pass_INAP.DOC (дата обращения: 10.12.2024).
4. Мисакян М., Коттер Ф. Р., Калер Р. Л. Миниатюрный датчик электрического поля // Приборы для научных исследований. 1978. № 7. С. 52–55.
5. Щигловский К. Б., Аксельрод В. С. Приборы для измерения параметров электростатического поля и их калибровка // Измерительная техника. 1978. № 5. С. 63–65.
6. Бирюков С. В., Ложников В. Я. Цифровой измеритель напряженности электрического поля промышленной частоты // Приборы и техника эксперимента. 1981. № 1. С. 275.
7. Бирюков С. В., Кац Р. А., Ложников В. Я. [и др.]. Расчет и измерение напряженности электрического поля в электроустановках сверх- и ультравысокого напряжения // Влияние электроустановок высокого напряжения на окружающую среду: переводы докл. Междунар. конф. по большим электрическим системам (СИГРЭ-76). Москва: Энергоатомиздат, 1988. С. 6–13.
8. Измеритель ближнего электромагнитного поля ЭЛОН. URL: https://ppxp.ru/rub/html/pribori/pkosiot/5_09 (дата обращения: 10.12.2024).
9. Измеритель напряженности ИНЭП-8. URL: <http://granat-e.ru/inep-8.html> (дата обращения: 10.12.2024).
10. Измеритель напряженности электрического и магнитного полей промышленной частоты ПЗ-50. URL: <https://all-pribors.ru/opisanie/17638-19-p3-50> (дата обращения: 10.12.2024).
11. Измеритель переменного электрического поля ИЭП-04. URL: <https://www.ccenter.msk.ru/cat/1832/izmeritel-elektricheskogo-polya-iep-04-izmerenie-napryajennosti> (дата обращения: 10.12.2024).
12. Измеритель напряженности ЭП промышленной частоты ГРАДАН. URL: https://www.korabel.ru/news/comments/izmeritel_napryazhennosti_elektricheskogo_

polya_promishlennoy_chastoti_gradan_ot_kompanii_elektroenergetika.html (дата обращения: 10.12.2024).

13. Индикатор параметров ЭМП промышленной частоты РАДЭКС ЭМИ 50. URL: https://www.izotop.ru/test/Инструкция_ЕМИ50.pdf. (дата обращения: 10.12.2024)

14. Field Analyzer System EFA-3. URL: https://elektrotanya.com/files/e_efa3.pdf (дата обращения: 10.12.2024).

15. Измеритель электрического поля промышленной частоты BE-50. URL: <https://ntm.ru/products/44/7261> (дата обращения: 10.12.2024).

16. Измеритель параметров электрического и магнитного полей BE-метр. URL: https://priborysgk.ru/upload/shop_3/2/0/9/item_209/shop_property_file_209_189.pdf (дата обращения: 10.12.2024).

17. Портативный анализатор электромагнитного поля EFA-300. URL: http://alfa-test.ru/public/catalog/files/1291_efa300_at_ru.pdf. (дата обращения: 10.12.2024).

18. Изотропный измеритель электромагнитного поля ПЗ-60. URL: <http://ciklon-pribor.ru> (дата обращения: 10.12.2024).

19. Бирюков С. В., Тюкина Л. В., Тюкин А. В. Метод измерения напряженности неоднородных электрических полей по среднему значению // Омский научный вестник. 2021. № 4 (178). С. 67–74. DOI: 10.25206/1813-8225-2021-178-67-74. EDN: VISFYM.

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

21. Бирюков С. В., Шиликов А. С. Датчик напряженности электрического поля с электродами в форме сферических многоугольников // Омский научный вестник. 2002. Вып. 18. С. 123–127.

22. Wilhelmy L. Sonde zur potenzialfreien Messung der periodischen und transienten elektrischen Feldstärke // Elektrotechnische Zeitschrift. 1973. A Bd. 94. № 8. S. 441–445.

23. Миролюбов Н. Н., Костенко М. В., Левинштейн М. Л. [и др.]. Методы расчёта электростатических полей. Москва: Высшая школа, 1963. 415 с.

24. 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.

25. 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.

26. Kaidanov F. G., Kats R. A., Biryukov S. V., Lozhnikov V. Ya. Calculation and measurement of fields on EHV and UHV substations and near transmission lines // CIGRE-86. International Conference on Large High Voltage Electric Systems, Report 36-06, Session 27th August-4th September. Paris. 1986. 5 p.

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

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

SPIN-код: 9384-0078

ORCID: 0000-0002-1362-9911

AuthorID (SCOPUS): 7006438919

Адрес для переписки: sbiryukov154@mail.ru

Для цитирования

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.

Статья поступила в редакцию 17.12.2024 г.

© С. В. Бирюков

TWO-COMPONENT SPHERICAL DUAL-TYPE ELECTRIC FIELD STRENGTH SENSOR

Simple and easy-to-use modern sensors are required to monitor the levels of electric field strength around high-voltage power equipment, power lines, substations. These sensors ensure safety and labour protection of power equipment maintenance personnel. Therefore, the development of electric field strength sensors is an important and urgent task. The article proposes one of the possible options for constructing such sensors. The sensor is a two-component spherical dual-type element. Twelve biangular spherical conductive electrodes are placed in isolation on the spherical conductive surface of the sensor. The electrodes serve to form the sensitive elements of four dual sensors: two on each coordinate axis. Moreover, the dimensions of the sensor sensitive elements affect its error caused by the inhomogeneity of the field. The dual spherical sensor has a variable error: not exceeding $\pm 1,1\%$ in the $0 \leq a \leq 1$ entire spatial range, which corresponds to the $d = R$ minimum distance to the field source. The error of the sensor is provided by reasonably selected angular dimensions of twelve bi-angular spherical electrodes of the $\alpha_0 = 90^\circ$ and $\beta_{01} = 30^\circ$ sensor basic. The sensor has three outputs on each coordinate axis, two corresponding to single sensors and one to a dual sensor. This type allows expanding the sensor's functional features. The dual spherical sensor is used for control and measurement means of electric field parameters of industrial frequency in high-intensity zones.

Keywords: electric field, field strength, dual spherical sensor, double spherical sensor, sensitive element, spherical biconvex, field inhomogeneity error.

References

1. Dez Zh., Pirrot P. Raschet i izmereniye napryazhennosti elektricheskogo polya vblizi ustroystv vysokogo napryazheniya [Calculation and measurement of electric field strength in the vicinity of high voltage devices]. / Ed. by Yu. P. Shkarina. *Vliyaniye Elektroustanovok Vysokogo Napryazheniya na Okruzhayushchuyu Sredu*. Moscow, 1979. P. 10–19. (In Russ.).
2. Chauzy S., Magnes P. Mise au point d'un mesureur de champ electrique alternatif 50 Hz [Development of the 50 Hz alternating electric field meter]. *Rev. gen. elec.* 1988. No. 7. P. 27–38. (In Fr.).
3. Pribor dlya izmereniya elektricheskogo polya INEP-50 [INEP-50 electric field measuring device]. URL: http://www.tecnoshans2006.ru/Documents/ACS/pass_INAP.DOC (accessed: 10.12.2024). (In Russ.).
4. Misakyan M., Kotter F. R., Kaler R. L. Miniaturnyy datchik elektricheskogo polya [Miniature electric field sensor]. *Pribory dlya nauchnykh issledovaniy. The Review of Scientific Instruments*. 1978. No. 7. P. 52–55. (In Russ.).
5. Shchiglovskiy K. B., Aksel'rod V. S. Pribory dlya izmereniya parametrov elektrostaticheskogo polya i ikh kalibrovka [Electrostatic field measurement devices and their calibration]. *Izmeritel'naya Tekhnika. Measurement Techniques*. 1978. No. 5. P. 63–65. (In Russ.).
6. Biryukov S. V., Lozhnikov V. Ya. Tsifrovoy izmeritel' napryazhennosti elektricheskogo polya promyshlennoy chastoty [Digital meter of electric field strength of industrial frequency]. *Pribory i tekhnika eksperimenta. Instruments and Experimental Techniques*. 1981. No. 1. P. 275. (In Russ.).
7. Biryukov S. V., Kats R. A., Lozhnikov V. Ya. [et al.]. Raschet i izmereniye napryazhennosti elektricheskogo polya v elektroustanovkakh sverkh- i ul'travysokogo napryazheniya

[Calculation and measurement of electric field strength in ultra-high and ultra-high voltage electrical systems]. *Vliyaniye Elektroustanovok Vysokogo Napryazheniya na Okruzhayushchuyu Sredu*. Moscow, 1988. P. 6–13. (In Russ.).

8. Izmeritel' blizhnego elektromagnitnogo polya ELON [ELON near electromagnetic field meter]. URL: https://ppxp.ru/rub/html/pribori/pkosiot/5_09 (accessed: 10.12.2024). (In Russ.).
9. Izmeritel' napryazhennosti INEP-8 [INEP-8 intensity meter]. URL: <http://granat-e.ru/inep-8.html> (accessed: 10.12.2024). (In Russ.).
10. Izmeritel' napryazhennosti elektricheskogo i magnitnogo poley promyshlennoy chastoty PZ-50 [PZ-50 industrial frequency electric and magnetic field strength meter]. URL: <https://all-pribors.ru/opisanie/17638-19-p3-50> (accessed: 10.12.2024). (In Russ.).
11. Izmeritel' peremennogo elektricheskogo polya IEP-04 [IEP-04 alternating electric field meter]. URL: <https://www.ccenter.msk.ru/cat/1832/izmeritel-elektricheskogo-polya-iep-04-izmerenie-napryajennosti> (accessed: 10.12.2024). (In Russ.).
12. Izmeritel' napryazhennosti EP promyshlennoy chastoty GRADAN [GRADAN industrial frequency EMF intensity meter]. URL: https://www.korabel.ru/news/comments/izmeritel_napryazhennosti_elektricheskogo_polya_promishlennoy_chastoti_gradan_ot_kompanii_elektroenergetika.html (accessed: 10.12.2024). (In Russ.).
13. Indikator parametrov EMP promyshlennoy chastoty RADEKS EMI 50 [RADEKS EMI 50 industrial frequency EMI parameter indicator]. URL: http://www.izotop.ru/test/Instruktsiya_EMI50.pdf. (accessed: 10.12.2024). (In Russ.).
14. Field Analyzer System EFA-3. URL: https://elektrotanya.com/files/e_efa3.pdf (accessed: 10.12.2024). (In Engl.).
15. Izmeritel' elektricheskogo polya promyshlennoy chastoty BE-50 [BE-50 industrial frequency electric field meter].

URL: <https://ntm.ru/products/44/7261> (accessed: 10.12.2024). (In Russ.).

16. Izmeritel' parametrov elektricheskogo i magnitnogo poley VE-metr [BE-meter electric and magnetic field meter]. URL: https://priborysgk.ru/upload/shop_3/2/0/9/item_209/shop_property_file_209_189.pdf (accessed: 10.12.2024). (In Russ.).

17. Portativnyy analizator elektromagnitnogo polya EFA-300 [EFA-300 portable electromagnetic field analyser]. URL: http://alfa-test.ru/public/catalog/files/1291_efa-300_at_ru.pdf (accessed: 10.12.2024). (In Russ.).

18. Izotropnyy izmeritel' elektromagnitnogo polya P3-60 [P3-60 isotropic electromagnetic field meter]. URL: https://ciklon-pribor.ru/pdf/p3-60_pasp.pdf (accessed: 10.12.2024). (In Russ.).

19. Biryukov S. V., Tyukina L. V., Tyukin A. V. Metod izmereniya napryazhennosti neodnorodnykh elektricheskikh poley po srednemu znacheniyu [Method for measuring intensity of inhomogeneous electrical fields by average value]. Omskiy nauchnyy vestnik. *Omsk Scientific Bulletin*. 2021. No. 4 (178). P. 67–74. DOI: 10.25206/1813-8225-2021-178-67-74. EDN: VISFYM. (In Russ.).

20. 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. P. 64–72. DOI: 10.25206/2310-9793-9-3-64-72. EDN: QDVMDJ. (In Russ.).

21. Biryukov S. V., Shilikov A. S. Datchik napryazhennosti elektricheskogo polya s elektrodami v forme sfericheskikh mnogougol'nikov [Sensor of electric field strength with spherical polygon electrodes]. Omskiy nauchnyy vestnik. *Omsk Scientific Bulletin*. 2002. Issue 18. P. 123–127. (In Russ.).

22. Wilhelmy L. Sonde zur potenzialfreien Messung der periodischen und transienten elektrischen Feldstärke. *Elektrotechnische Zeitschrift*. 1973. A Bd. 94. Nu. 8. S. 441–445. (In Germ.).

23. Miroyubov N. N., Kostenko M. V., Levinshiteyn M. L. [et al.]. Metody rascheta elektrosticheskikh poley [Calculation methods of electrostatic fields]. Moscow, 1963. 415 p. (In Russ.).

24. 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.).

25. 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.).

26. Kaidanov F. G., Kats R. A., Biryukov S. V., Lozhnikov V. Ya. Calculation and measurement of fields on EHV and UHV substations and near transmission lines // CIGRE-86. International Conference on Large High Voltage Electric Systems, Report 36-06, Session 27th August-4th September. Paris. 1986. 5 p. (In Engl.).

27. Kolmogorova S. S., Biryukov S. V. Proyektirovaniye elektroinduktsionnykh datchikov i sredstv izmereniya elektricheskikh poley [Designing of electroinduction sensors and electric field measuring devices]. Saint Petersburg, 2022. 180 p. ISBN 978-5-00125-731-8. DOI: 10.25990/7bky-3e46. EDN: DXISMN. (In Russ.).

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

For citations

Biryukov S. V. Two-component spherical dual-type electric field strength sensor. *Omsk Scientific Bulletin*. 2025. No. 1 (193). P. 98–106. DOI: 10.25206/1813-8225-2025-193-98-106. EDN: JXPOUZ.

Received December 17, 2024.

© S. V. Biryukov