

СДВОЕННЫЕ СФЕРИЧЕСКИЕ ДАТЧИКИ НАПРЯЖЕННОСТИ ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ПОЛЯ С РАЗДЕЛЬНЫМИ ЧУВСТВИТЕЛЬНЫМИ ЭЛЕМЕНТАМИ И ИХ ИССЛЕДОВАНИЯ

Исследуется новый вид электроиндукционных сферических датчиков напряженности электрического поля, отнесенный по вновь введенному классификационному признаку к сдвоенным датчикам. В работе уделено внимание исследованию сдвоенных датчиков с отдельными чувствительными элементами. В результате исследования получена взаимосвязь между угловыми размерами чувствительных элементов сдвоенного датчика и его погрешности от неоднородности поля, поддерживаемой в максимально возможном пространственном диапазоне измерения. Эта взаимосвязь легла в основу построения математической модели сдвоенного датчика, позволившей выявить диапазоны угловых размеров чувствительных элементов датчика и его погрешностей от неоднородности электрического поля. Диапазон установленных угловых размеров чувствительных элементов первого двойного датчика $35,53^\circ \geq \theta_1 \geq 33,53^\circ$ и второго двойного датчика $35,53^\circ \leq \theta_2 \leq 85^\circ$ при $\theta_3 = 90^\circ$ и соответствующие им диапазоны погрешностей $|\pm 0,78| \% \leq \delta \leq |\pm 9,12|$ и пространственный диапазон измерения $0 < a < 1$.

Результаты проведенных исследований показывают перспективность использования сдвоенных датчиков с составными чувствительными элементами.

Ключевые слова: напряженность электрического поля, измерение, одинарные датчики, двойные датчики, сдвоенные датчики, составные чувствительные элементы, погрешность от неоднородности поля, математическая модель, оптимизация.

Введение. Напряженность электрического поля — это важнейшая фундаментальная силовая характеристика электромагнитного поля. Животный и растительный мир в наше время полностью окружен электромагнитными полями. Причина тому широкое и полномасштабное развитие электроэнергетики, которая немыслима без высоковольтных энергетических систем, являющихся первоисточником электромагнитных полей. Анализ научно-технической литературы показывает, что напряженность электрического поля оказалась не обеспеченной ни методами, ни средствами измерения. Это в первую очередь относится к средствам измерений напряженности ЭП промышленной частоты на территориях подстанций (ПС), вблизи линий электропередачи (ЛЭП), электротехнического оборудования и на поверхности высоковольтных изоляторов. Решение этой проблемы неразрывно связано с разработкой датчиков напряженности

электрического поля, в частности, электроиндукционных сферических датчиков, в основе которых лежат явления электрической индукции. Такие датчики хорошо зарекомендовали себя на практике и просты в конструктивном исполнении. Существует большое разнообразие технических решений электроиндукционных датчиков. Все технические решения таких датчиков классифицированы. К классификационным признакам датчиков относятся: 1) чувствительность к направлению [1]; 2) число координат; 3) форма чувствительных элементов; 4) конструктивное исполнение. Согласно этой классификации датчики соответственно делятся на датчики: направленного [2–29] и не направленного [30–34] приема; одно- [2–26], двух- [6, 27–29] и трехкоординатные [30–35]; планарные [2–14], кубические [15–18], цилиндрические [18–20] и сферические [21–35]; одинарные [2, 4, 6, 29], двойные [3, 5–35] и сдвоенные [22–28].

Из всего этого многообразия датчиков понятие «сдвоенный датчик» [22–28] введено впервые [25], и оно пополнило классификационный признак, сформулированный как конструктивное исполнение датчика. Предпосылкой создания сдвоенных датчиков является разработанный авторами новый метод измерения напряженности электрического поля по среднему значению [36].

Конструктивно сдвоенные датчики состоят из двух двойных датчиков и общего сферического основания, образующих единое целое. С появлением сдвоенных датчиков возникла необходимость в формулировке нового классификационного признака — способ формирования чувствительных элементов. По этому классификационному признаку сдвоенные датчики можно разделить на датчики с накладными, составными и раздельными чувствительными элементами.

Ранее авторами были проведены исследования сдвоенных датчиков с накладными и составными чувствительными элементами [25]. Сдвоенные датчики с раздельными чувствительными элементами еще не исследованы. Поэтому дальнейшие исследования авторов будут направлены на изучение особенностей сдвоенных датчиков с раздельными чувствительными элементами с целью выявления их возможностей.

Постановка задачи. При исследовании сдвоенных датчиков с раздельными чувствительными элементами были поставлены следующих задачи:

1) провести теоретические исследования сдвоенных электроиндукционных сферических датчиков напряженности электрического поля в полях различной неоднородности и выявить конструктивные элементы датчика, влияющие на его погрешность от неоднородности поля и пространственный диапазон измерения;

2) установить взаимосвязь размеров чувствительных элементов сдвоенного датчика с раздельными чувствительными элементами с его погрешностью от неоднородности поля и пространственным диапазоном измерения;

3) составить математическую модель сдвоенного датчика с раздельными чувствительными элементами, учитывающую конструктивные размеры датчика и их взаимосвязь с погрешностью и пространственным диапазоном измерения;

4) на основе математической модели сдвоенного датчика выполнить оптимизацию конструктивных размеров его чувствительных элементов исходя из заданной погрешности от неоднородности поля и пространственного диапазона измерения.

Теория. Теория разработки сдвоенных электроиндукционных сферических датчиков напряженности ЭП основывается на теории построения однарных и двойных сферических датчиков [37].

На рис. 1 представлены возможные варианты исполнения сдвоенных сферических датчиков с накладными (рис. 1а), составными (рис. 1б) и раздельными (рис. 1в) чувствительными элементами, состоящих из двух двойных датчиков.

Основными составными частями сдвоенных датчиков являются проводящее сферическое основание 1 и проводящие чувствительные элементы 2, 3, 4', 5' и 4, 5 (рис. 1).

Чувствительные элементы могут выполняться разной формы и с разными угловыми размерами. В датчиках в качестве геометрических форм чувствительных элементов используются сферический сегмент (чувствительные элементы 2 и 3 рис. 1),

сферический слой (чувствительные элементы 4', 5' рис. 1б и 4, 5 рис. 1в) и полусфера (чувствительные элементы 4, 5 рис. 1а). Формы и обозначения угловых размеров чувствительных элементов представлены на рис. 2.

Сдвоенный сферический датчик с накладными чувствительными элементами (см. рис. 1а) имеет первую 2, 3 и вторую 4, 5 пары чувствительных элементов. Элементы 2, 3 выполнены в форме сферических сегментов с угловым размером θ_1 , а элементы 4, 5 — в форме, близкой к полусферам с угловыми размерами $\theta_3 \leq 90^\circ$. В таком конструктивном исполнении чувствительные элементы 4, 5 сдвоенного датчика накладываются через диэлектрическую прослойку на проводящее сферическое основание 1, а чувствительные элементы 2, 3 накладываются через диэлектрическую прослойку на чувствительные элементы 4, 5. Таким образом, формируется трехслойная структура сдвоенного датчика с накладными чувствительными элементами, изолированными друг от друга и его сферического основания (см. рис. 1а).

Сдвоенный датчик с составными чувствительными элементами состоит из проводящего сферического основания 1 и элементов 2, 3 и 4', 5' (рис. 1б). Элементы 2, 3 выполнены в форме сферических сегментов с угловым размером θ_1 , а элементы 4', 5' выполнены в форме сферического слоя с угловыми размерами у вершины $\theta_2 \geq \theta_1$ и у основания $\theta_4 \leq 90^\circ$ (см. рис. 2).

Элементы 2, 3 являются чувствительными элементами, входящими в состав первого двойного датчика и частями чувствительных элементов второго двойного датчика. Элементы 2+4' и 3+5' являются чувствительными элементами второго двойного датчика. В этом конструктивном исполнении сдвоенного датчика первый двойной датчик состоит из чувствительных элементов 2, 3. А у второго двойного датчика чувствительные элементы выполняются составными, первый чувствительный элемент которого состоит из элементов 2+4' → 4, а второй — из элементов 3+5' → 5. Все чувствительные элементы изолированы от проводящего сферического основания 1 и друг от друга. Таким образом, формируется сдвоенный датчик с изолированными друг от друга и сферического основания с составными чувствительными элементами (см. рис. 1б).

Сдвоенный датчик с раздельными чувствительными элементами включает в себя проводящее сферическое основание 1 и две пары чувствительных элементов 2, 3 и 4, 5 (рис. 1в), входящих в два двойных датчика соответственно. Первый двойной датчик имеет чувствительные элементы 2, 3 в форме сферических сегментов с угловыми размерами θ_1 . Второй двойной датчик имеет чувствительные элементы 4, 5 в форме сферических слоёв с угловыми размерами у вершины $\theta_2 \geq \theta_1$ и у основания $\theta_3 \leq 90^\circ$.

Двойные сферические датчики, входящие в состав сдвоенного датчика с раздельными чувствительными элементами имеют две пары диаметрально противоположных элементов 2 и 3 и 4 и 5 (см. рис. 1в).

При внесении сдвоенного датчика в электрическое поле на его чувствительных элементах 2 и 3 первой пары, выполненных в форме сферических сегментов, индуцируются электрические заряды, с учетом погрешностей можно записать [37]

$$q_2(t) = -3\pi\epsilon_0 R^2 \sin^2 \theta_1 \times [1 + (\delta_{сф} + \delta_x + \delta_{n2})] \cdot E(t) \quad (1)$$

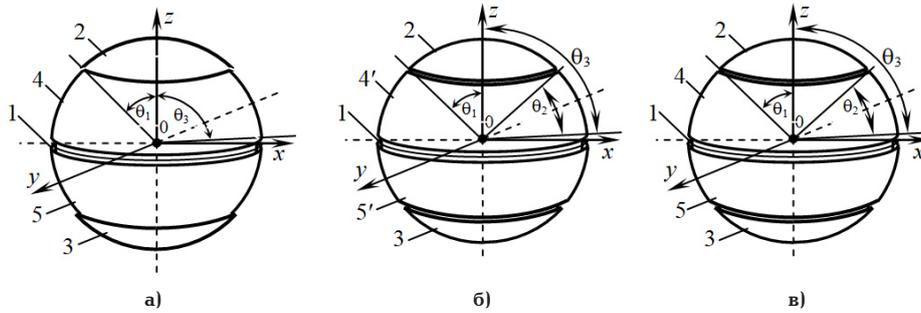


Рис. 1. Сдвоенные сферические датчики
с а) накладными, б) составными, в) раздельными чувствительными элементами

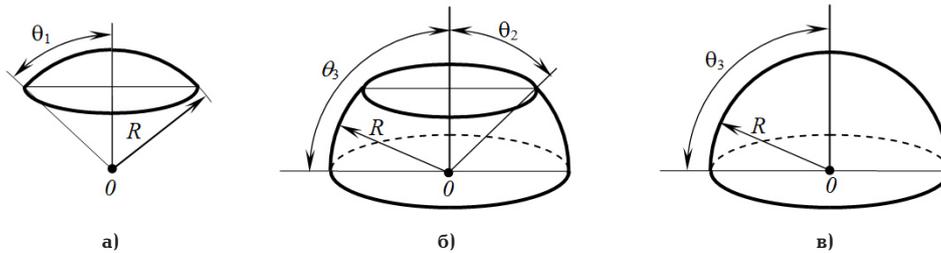


Рис. 2. Различные формы чувствительных элементов:
а) сферический сегмент; б) сферический слой; в) полусфера

$$q_3(t) = 3\pi\epsilon\epsilon_0 R^2 \sin^2\theta_1 \times [1 + (\delta_{сф} + \delta_{\kappa} + \delta_{н3})] \cdot E(t). \quad (2)$$

Для чувствительных элементов 4 и 5 второй пары, выполненных в форме сферических слоев, индуцируются электрические заряды, которые можно представить выражениями [37]

$$q_4(t) = -3\pi\epsilon\epsilon_0 R^2 \sin(\theta_3 - \theta_2) \times \sin(\theta_3 + \theta_2) \cdot [1 + (\delta_{сф} + \delta_{\kappa} + \delta_{н4})] \cdot E(t); \quad (3)$$

$$q_5(t) = 3\pi\epsilon\epsilon_0 R^2 \sin(\theta_3 - \theta_2) \times \sin(\theta_3 + \theta_2) \cdot [1 + (\delta_{сф} + \delta_{\kappa} + \delta_{н5})] \cdot E(t), \quad (4)$$

где в выражениях (1) и (3) знак «-» показывает, что ЭП направлено на чувствительные элементы 2 и 4, а в выражениях (1)–(4) ϵ — диэлектрическая проницаемость среды; R — радиус сферического сегмента; $\epsilon_0 = 8,85 \cdot 10^{-12}$ ф/м — диэлектрическая постоянная; θ_1 — угловой размер чувствительных элементов 2 и 3; θ_2 и θ_3 — угловые размеры чувствительных элементов 4 и 5; $\delta_{сф}$ — погрешность от синфазных помех и наводок, δ_{κ} — конструктивные погрешности, определяемые неточностью выполнения R , θ_1 , θ_2 и θ_3 ; $\delta_{н2}$, $\delta_{н3}$ и $\delta_{н4}$ и $\delta_{н5}$ — погрешность от неоднородности ЭП; $E(t)$ — измеряемая напряженность ЭП.

В этом случае алгоритм снятия измерительного сигнала сводится к прямому измерению электрического заряда с помощью усилителя заряда (интегратора тока). При таком алгоритме снятия сигнала в измерительном сигнале датчика будут присутствовать все погрешности, указанные в выражениях (1)–(4). Следовательно, одинарные датчики будут не защищены от синфазных помех и наводок, приводящих к значительным дополнительным погрешностям.

Далее в работе будут рассмотрены особенности сдвоенного датчика с раздельными чувствительными

элементами, построена его математическая модель, по которой будут проводиться исследования датчика по выявлению его минимальной погрешности при максимально возможном пространственном диапазоне измерения.

Сдвоенный датчик с раздельными чувствительными элементами. Сдвоенный сферический датчик с раздельными чувствительными элементами состоит из двух пар диаметрально противоположных и расположенных на одной координатной оси чувствительных элементов (см. рис. 1в). Чувствительные элементы первой пары выполнены в форме сферических сегментов (см. рис. 2а), а чувствительные элементы второй пары выполнены в форме сферических слоев (см. рис. 2б). При таком конструктивном решении сдвоенный датчик с раздельными чувствительными элементами имеет двухслойную структуру.

Все чувствительные элементы отделены друг от друга воздушными промежутками, а от проводящего основания датчика 1 (см. рис. 1) — диэлектрической прослойкой.

Для сохранения сферической формы датчика чувствительные элементы и диэлектрическая прослойка наносятся на поверхность сферического основания тонким слоем $l \ll R$ (~50 нм) методом напыления с использованием нанотехнологий. Это позволяет считать поверхность датчика единой сферической поверхностью, упрощающей рассмотрение взаимодействия датчика с электрическим полем.

При внесении сдвоенного датчика с раздельными чувствительными элементами в электрическое поле на выходах его двойных датчиков формируются дифференциальные заряды. Алгоритм снятия сигналов с двойных датчиков сводится к формированию дифференциального заряда с помощью дифференциальных усилителей заряда (ДУЗ) [37].

Тогда с чувствительных элементов первой пары 2, 3 дифференциальный заряд будет равен разности зарядов $q_2(t)$ и $q_3(t)$

$$\begin{aligned} \Delta q_{23}(t) &= q_2(t) - q_3(t) = \\ &= -6\pi\epsilon\epsilon_0 R^2 \sin^2 \theta_1 \cdot \left(1 + \frac{\delta_{н2} + \delta_{н3}}{2}\right) \cdot E(t), \end{aligned} \quad (5)$$

а с чувствительных элементов второй пары 4, 5

$$\begin{aligned} \Delta q_{45}(t) &= q_4(t) - q_5(t) = -6\pi\epsilon\epsilon_0 R^2 \sin(\theta_3 - \theta_2) \times \\ &\times \sin(\theta_3 + \theta_2) \cdot \left(1 + \frac{\delta_{н4} + \delta_{н5}}{2}\right) \cdot E(t). \end{aligned} \quad (6)$$

Из выражений (5) и (6) следует, что двойные датчики при дифференциальном включении позволяют удвоить измерительный сигнал, избавиться от синфазных помех и наводок и уменьшить погрешность, вызванную неоднородностью поля. Таким образом, двойные датчики обладают большей чувствительностью и меньшей дополнительной погрешностью в отличие от одинарных датчиков.

Однако двойные электроиндукционные сферические датчики напряженности ЭП достигли метрологических пределов по дополнительным погрешностям, нижний предел которых в неоднородных полях составляет не менее $\pm 5\%$. На смену им пришли сдвоенные датчики [16–18, 39] — датчики нового поколения (см. рис. 1). Такие датчики позволяют получить дополнительную погрешность измерения значительно меньше $\pm 5\%$. Созданию сдвоенных датчиков способствовала разработка нового метода измерений напряженности ЭП по среднему значению [36]. В основе метода по среднему значению лежит особенность двойных сферических датчиков с разными угловыми размерами чувствительных элементов — иметь в неоднородном поле противоположные по знаку

погрешности. Эта особенность заложена в алгоритм формирования выходного сигнала сдвоенного датчика.

Суть этого алгоритма сводится к следующему. На выходах первого и второго двойных датчиков, входящих в состав сдвоенного датчика, формируются информативные сигналы, определяемые выражениями (7) и (8):

$$\Delta q_{23}(t) = -6\pi\epsilon\epsilon_0 R^2 \sin^2 \theta_1 \cdot E_1(t); \quad (7)$$

$$\begin{aligned} \Delta q_{45}(t) &= \\ &= -6\pi\epsilon\epsilon_0 R^2 \sin(\theta_3 - \theta_2) \cdot \sin(\theta_3 + \theta_2) \cdot E_2(t) = \\ &= -6\pi\epsilon\epsilon_0 R^2 \sin^2 \theta_3 \left(1 - \frac{\sin^2 \theta_2}{\sin^2 \theta_3}\right) \cdot E_2(t), \end{aligned} \quad (8)$$

где

$$E_1(t) = E(t) \cdot \left(1 + \frac{\delta_{н2} + \delta_{н3}}{2}\right) = E(t) \cdot (1 + \delta_{23}) — \quad (9)$$

напряженность ЭП, измеренная первым двойным датчиком;

$$\delta_{н2} = \left[\frac{\left[\left(\frac{1+a}{2a^2 \sin^2 \frac{\theta_1}{2}} \right) \cdot \left(1 - \frac{1-a}{\sqrt{1-2a \cos \theta_1 + a^2}} \right) - \frac{1}{a} \right]}{3 \cos^2 \frac{\theta_1}{2}} - 1 \right] \cdot 100, \quad (10)$$

$$\delta_{н3} = \left[\frac{\left[\left(\frac{1-a}{2a^2 \sin^2 \frac{\theta_1}{2}} \right) \cdot \left(1 - \frac{1+a}{\sqrt{1-2a \cos \theta_1 + a^2}} \right) + \frac{1}{a} \right]}{3 \cos^2 \frac{\theta_1}{2}} - 1 \right] \cdot 100 — \quad (11)$$

погрешности от неоднородности ЭП одинарных датчиков 2 и 3;

$$\delta_{23} = \frac{\delta_{н2} + \delta_{н3}}{2} = \left[\frac{1}{3a^2 \sin^2 \theta_1} \cdot \left(2 - \frac{1-a^2}{\sqrt{1-2a \cos \theta_1 + a^2}} - \frac{1-a^2}{\sqrt{1+2a \cos \theta_1 + a^2}} \right) - 1 \right] \cdot 100 — \quad (12)$$

суммарная погрешность первого двойного датчика;

$$E_2(t) = E(t) \cdot \left(1 + \frac{\delta_{н4} + \delta_{н5}}{2}\right) = E(t) \cdot (1 + \delta_{45}) — \quad (13)$$

напряженность ЭП, измеренная вторым двойным датчиком;

$$\delta_{н4} = \left[\frac{1}{3 \cos \frac{\theta_3 - \theta_2}{2} \cdot \cos \frac{\theta_3 + \theta_2}{2}} \cdot \left[\frac{(1-a^2)}{2a^2 \sin \frac{\theta_3 - \theta_2}{2} \cdot \sin \frac{\theta_3 + \theta_2}{2}} \times \left(\frac{1}{\sqrt{1-2a \cos \theta_2 + a^2}} - \frac{1}{\sqrt{1-2a \cos \theta_3 + a^2}} \right) - \frac{1}{a} \right] - 1 \right] \cdot 100, \quad (14)$$

$$\delta_{н5} = \left[\frac{1}{3 \cos \frac{\theta_3 - \theta_2}{2} \cdot \cos \frac{\theta_3 + \theta_2}{2}} \cdot \left[\frac{(1 - a^2)}{2a^2 \sin \frac{\theta_3 - \theta_2}{2} \cdot \sin \frac{\theta_3 + \theta_2}{2}} \times \left(\frac{1}{\sqrt{1 + 2a \cos \theta_2 + a^2}} - \frac{1}{\sqrt{1 + 2a \cos \theta_3 + a^2}} \right) + \frac{1}{a} \right] - 1 \right] \cdot 100 \quad (15)$$

погрешности от неоднородности ЭП одинарных датчиков 4 и 5;

$$\delta_{45} = \frac{\delta_{н4} + \delta_{н5}}{2} = \left[\frac{1}{3a^2 \sin(\theta_3 - \theta_2) \cdot \sin(\theta_3 + \theta_2)} \cdot \left(\frac{1}{\sqrt{1 - 2a \cos \theta_2 + a^2}} + \frac{1}{\sqrt{1 + 2a \cos \theta_2 + a^2}} - \frac{1}{\sqrt{1 - 2a \cos \theta_3 + a^2}} - \frac{1}{\sqrt{1 + 2a \cos \theta_3 + a^2}} \right) - 1 \right] \cdot 100 \quad (16)$$

суммарная погрешность второго двойного датчика.

В формулах (10)–(16) $a = R/d$ — пространственный диапазон измерения, характеризующий степень неоднородности поля и изменяющийся от нуля до единицы, где R — радиус сферического основания 1 датчика; d — расстояние от центра сферического основания датчика до источника поля. При $a \rightarrow 0$ поле приближается к однородному полю, а при $a \rightarrow 1$ — к сильно неоднородному.

Тогда алгоритм работы сдвоенного датчика, основанный на методе измерений напряженности ЭП по среднему значению, будет иметь вид

$$\begin{aligned} q &= \frac{k_2 \Delta q_{23}(t) + k_4 \Delta q_{45}(t)}{2} = \\ &= -6\pi\epsilon\epsilon_0 R^2 \cdot \frac{E_1(t) + E_2(t)}{2} = \\ &= -6\pi\epsilon\epsilon_0 R^2 \left(1 + \frac{\delta_{23} + \delta_{45}}{2} \right) \cdot E(t), \end{aligned} \quad (17)$$

где k_2 и k_4 — коэффициенты, устанавливающиеся при настройке сдвоенного датчика в однородном поле, соответственно равные

$$k_2 = \frac{1}{\sin^2 \theta_1}; \quad (18)$$

$$k_4 = \frac{1}{\sin^2 \theta_3 \left(1 - \frac{\sin^2 \theta_2}{\sin^2 \theta_3} \right)} \quad (19)$$

Учтем, что погрешности δ_{23} и δ_{45} противоположны по знаку, тогда выражение (17) можно привести к виду

$$\begin{aligned} q &= -6\pi\epsilon\epsilon_0 R^2 \cdot \left(1 + \frac{\delta_{23} - \delta_{45}}{2} \right) \cdot E(t) = \\ &= -6\pi\epsilon\epsilon_0 R^2 \cdot (1 + \delta) \cdot E(t) \end{aligned} \quad (20)$$

где

$$\delta = \frac{\delta_{23} - \delta_{45}}{2} \quad (21)$$

погрешность от неоднородности поля сдвоенного датчика с отдельными чувствительными элементами.

Из выражения (17) следует, что нахождение среднего значения из значений, полученных первым и вторым двойным датчиком (см. выражения (7) и (8)), значительно уменьшает погрешность измерения напряженности ЭП сдвоенным датчиком. Эта особенность позволила создать сдвоенные сферические датчики, совмещающие в своей конструкции два двойных датчика.

Исследования. Воспользовавшись выражениями (12) и (16) для погрешностей двойных датчиков и сформировав из них выражение (21), для погрешности сдвоенного датчика была составлена математическая модель сдвоенного датчика. Математическая модель составлена с учетом установленной взаимосвязи угловых размеров чувствительных элементов сдвоенного датчика и его погрешностью от неоднородности поля. Эта математическая модель позволила провести исследования по оптимизации угловых размеров чувствительных элементов сдвоенного датчика с точки зрения минимальной погрешности и максимально возможного пространственного диапазона измерения. В результате математического моделирования были получены оптимальные угловые размеры чувствительных элементов сдвоенного датчика. Результаты исследований в виде графиков представлены на рис. 3, где приведены графики зависимости угловых размеров чувствительных элементов $\theta_1(\delta)$ и $\theta_2(\delta)$ при $\theta_3 = 90^\circ$ от погрешности, вызванной неоднородностью поля в пространственном диапазоне $0 \leq a \leq 1$.

Графики позволяют по заданной погрешности δ от неоднородности поля сдвоенного датчика определить угловые размеры его чувствительных элементов, выполненных в форме сферического сегмента θ_1 и сферического слоя θ_2 при $\theta_3 = 90$. Для примера, на рис. 3 показано, что сдвоенный датчик с погрешностью $\delta = \pm 4\%$, поддерживаемой в пространственном диапазоне измерения $0 \leq a \leq 1$, должен иметь угловые размеры чувствительных элементов 2, 3 и 4, 5 (см. рис. 1в), соответственно равные $\theta_1 = 34,5^\circ$, $\theta_2 = 47,5^\circ$ и $\theta_3 = 90^\circ$.

Из рис. 3 следует, что минимально возможная погрешность $\delta = \pm 0,78\%$ двоянного датчика в пространственном диапазоне измерения $0 \leq \alpha \leq 0,97$ будет при выполнении угловых размеров его чувствительных элементов 2, 3 и 4, 5 соответственно $\theta_1 = 35,53^\circ$, $\theta_2 = 35,53^\circ$ и $\theta_3 = 90^\circ$. Это наиболее приемлемое техническое решение для двоянного датчика с отдельными чувствительными элементами. Данное техническое решение рассмотрено в работе [28]. Для правильного обеспечения снятия сигналов со двоянного датчика используются измерительные цепи, рассмотренные в работе [38]. Одна из возможных вариантов структурных схем таких измерительных цепей двоянного датчика с отдельными чувствительными элементами представлена на рис. 4.

Структурная схема (рис. 4) содержит двоянный датчик, два дифференциальных усилителя заряда ДУЗ 1 и ДУЗ 2, два масштабных преобразователя МП 1 и МП 2 и полусумматор $\frac{1}{2}\Sigma$. Дифференциальные усилители заряда преобразуют разностные заряды $(q_2 - q_3)$ и $(q_4 - q_5)$ в напряжения U_1' и U_2' соответственно. Поскольку чувствительности двойных датчиков 2, 3 и 4, 5 не равны, то с помощью масштабных преобразователей в однородном поле добиваются равенства выходных напряжений $U_1 = U_2$ двойных датчиков, где $U_1 = k_1 \cdot U_1'$ и $U_2 = k_2 \cdot U_2'$. Этим добиваются равенства чувствительностей по каждому двойному датчику. При этом масштабные преобразователи отвечают: МП 1 за коэффициент k_2 выражение (18), а МП 2 — за коэффициент k_4 выражение (19). Полусумматор $\frac{1}{2}\Sigma$ отвечает за формирование выходного сигнала U двоянного датчика как среднее значение из сигналов U_1 и U_2 двух двойных датчиков, согласно выражению (20).

Результаты исследований. Проведенные исследования позволили обобщить угловые размеры

отдельных чувствительных элементов двоянного датчика, выполненных в форме сферических сегментов и сферических слоев. Полученные результаты способствуют созданию серии двоянных датчиков с заданными погрешностями от неоднородности поля и пространственным диапазоном измерения. Получены графические зависимости угловых размеров θ_1 и θ_2 чувствительных элементов двоянного датчика от погрешности, вызванной неоднородностью поля δ . Эти зависимости позволяют изготавливать двоянные датчики с отдельными чувствительными элементами с погрешностью, выбираемой из неравенства $|\pm 0,78| \% < \delta < |\pm 9,12| \%$ и поддерживаемой во всем пространственном диапазоне измерения $0 < \alpha < 1$. Пример использования графических зависимостей представлен на рис. 3. Так, для двоянного датчика с отдельными чувствительными элементами с заданной погрешностью $\delta = \pm 4\%$ чувствительные элементы должны быть выполнены с угловыми размерами $\theta_1 = 34,5^\circ$ и $\theta_2 = 47,5^\circ$ при $\theta_3 = 90^\circ$. Так можно поступать для выполнения любой реализации двоянного датчика с отдельными чувствительными элементами.

Однако наилучшим решением построения двоянного датчика с отдельными чувствительными элементами будет решение, при котором чувствительные элементы выполняются с угловыми размерами $\theta_1 = 35,53^\circ$ и $\theta_2 = 35,53^\circ$ при $\theta_3 = 90^\circ$. При таких угловых размерах погрешность датчика составит $\delta = \pm 0,78\%$ в пространственном диапазоне $0 < \alpha < 0,97$.

Выводы и заключения. Результаты проведенных в работе исследований показывают перспективность использования двоянных датчиков с отдельными чувствительными элементами и ранее рассмотренных автором в других работах датчиков с накладными и составными чувствительными эле-

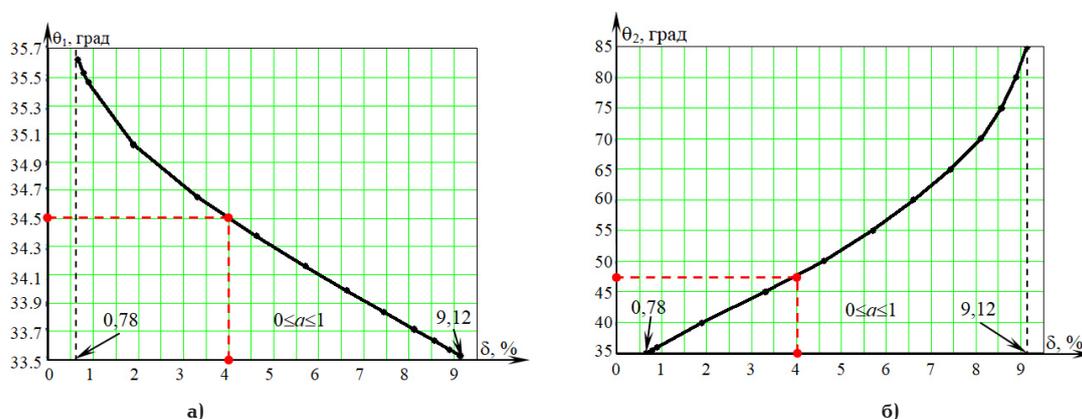


Рис. 3. Графики зависимости угловых размеров составных чувствительных элементов двоянного датчика от погрешности, вызванной неоднородностью поля: а) зависимость $\theta_1(\delta)$; б) зависимость $\theta_2(\delta)$

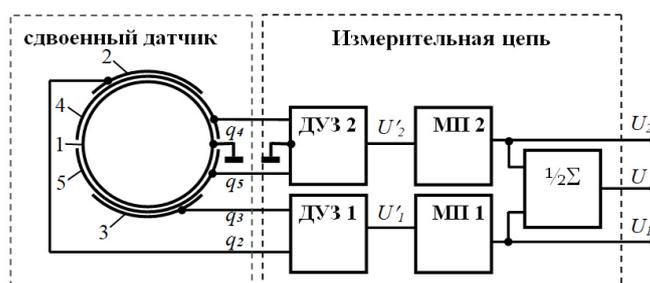


Рис. 4. Структурная схема измерительной цепи двоянного датчика с отдельными чувствительными элементами

ментами. Сдвоенные датчики без усложнения процесса измерений позволяет значительно снизить погрешность от неоднородности электрических полей и могут использоваться в широком пространственном диапазоне измерения.

В заключение хотелось бы отметить целесообразность использования сдвоенных датчиков для построения новых средств измерения напряженности электрических полей с повышенными метрологическими характеристиками.

Библиографический список

- ГОСТ Р 51070-97. Государственный стандарт Российской Федерации. Измерители напряженности электрического и магнитного полей. Общие технические требования и методы испытаний. Введ. 1998–01–01. Москва: Изд-во стандартов, 1997. 16 с.
- Biryukov S. V., Korolyova M. A. Electroinduction disk sensor of electric field strength // *Journal of Physics: Conference Series*. 2017. Vol. 944. P. 012017-1–012017-8. DOI: 10.1088/1742-6596/944/1/012017.
- Берент Г. Н., Плейс И. Р. Датчик электрического поля // *Приборы для научных исследований*. 1971. № 6. С. 141–142.
- Qin R., Yang Z., An L. [et al.]. Design of high voltage electric field measurement based on parallel plate sensor // *Electrical Application*. 2016. Vol. 19. P. 72–78.
- Zhang T., Fang Z., Chen T. [et al.]. Application of spherical electric field measurement system in the field of high voltage measurement // *Electrical Measurement and Instrumentation*. 2007. Vol. 44, № 11. P. 11–16.
- Suo C., Ran W., Wenbin Z. [et al.]. Research on the Three-Dimensional Power Frequency Electric Field Measurement System // *Journal of Sensor*. 2021. Vol. 6. 8859022. 15 p. DOI: 10.1155/2021/8859022.
- Пат. 181781 Российская Федерация, МПК G 01 R 29/12. Датчик напряженности электрического поля / Бирюков С. В., Колмогоров А. С., Колмогорова С. С. № 2018115125; заявл. 23.04.18; опубл. 26.07.18, Бюл № 21.
- Renno N. O., Arbor A. Rotating electric-field sensor. US Patent 2011/0062968; filed June 2nd, 2009; published March 17th, 2011.
- А. с. 1273845 СССР, МКИ G 01 R 29/12. Способ измерения напряженности электрического поля / Цагарели Н. И. № 3885485/24-21; заявл. 19.04.85; опубл. 30.11.86. Бюл. № 44.
- А. с. 1173352 СССР, МКИ G 01 R 29/12. Цифровое устройство для измерения напряженности электрического поля / Цагарели Н. И. № 3560165/24-21; заявл. 24.12.82; опубл. 15.08.85. Бюл. № 30.
- А. с. 1257568 СССР, МКИ G 01R 29/12. Устройство для измерения напряженности электрического поля / Цагарели Н. И. № 3800418/24-21; заявл. 12.10.84; опубл. 15.09.86. Бюл. № 34.
- Vesteen R. E. Electric field meter. US Patent 3.873.919; filed February 11th, 1974; published March 25th, 1975.
- Xiao D., Ma Q., Xie Y. A Power-Frequency Electric Field Sensor for Portable Measurement // *Sensor (Basel)*. 2018. № 18 (4). P. 1053. DOI: 10.3390/s18041053.
- Xiao D., Ma Q., Xie Y. A Power-Frequency Electric Field Sensor for Portable Measurement // *Sensor (Basel)*. 2018. № 18 (4). P. 1053. DOI: 10.3390/s18041053.
- Гатман С. Двойной измеритель электрического поля с защитой // *Приборы для научных исследований*. 1968. № 1. С. 45–49.
- Praft W. R. Accuracy of spherical sensor for the measurement of three-dimensional electric fields // *Fifth International Symposium on High Voltage Engineering*. 1987. Vol. 32, № 5. P. 83–92.
- Pittman P., Stanford R. A. Electric field sensor. US Patent 3.641.427; filed September 2th, 1969; published February 08th, 1972.
- Щигловский К. Б., Аксельрод В. С. Приборы для измерения параметров электростатического поля и их калибровка // *Измерительная техника*. 1978. № 5. С. 63–65.
- Tan X., Sun H., Suo C. [et al.]. Research of electrostatic field measurement sensors // *Ferroelectrics*. 2019. Vol. 549. P. 172–183. DOI: 10.1080/00150193.2019.1592558.
- Fang Y.-T., Wang Y.-Y., Xia J. Large-range electric field sensor based on parity-time symmetry cavity structure // *Acta Physica Sinica*. 2019. Vol. 68. 194201. DOI: 10.7498/aps.68.20190784.
- Misakian M., Kotter F. R., Kahler R. L. Miniature ELF Electric Field Probe // *Instruments for scientific research*. 1978. Vol. 49 (7). P. 933–935. DOI: 10.1063/1.1135497.
- Пат. 207464 Российская Федерация, МПК G 01 R 29/12. Устройство для измерения напряженности электрического поля со сдвоенным датчиком / Бирюков С. В., Тюкина Л. В., Эйсмонт Н. Г. № 2021111582; заявл. 23.04.21; опубл. 28.10.21, Бюл № 31.
- Пат. 207465 Российская Федерация, МПК G 01 R 29/12. Устройство для измерения напряженности электрического поля со сдвоенным датчиком / Бирюков С. В., Тюкина Л. В., Данышина В. В. № 2021111599; заявл. 23.04.21; опубл. 28.10.21, Бюл № 31.
- Пат. 211166 U1 Российская Федерация, МПК G01R 29/12. Сдвоенный датчик для измерения напряженности электрического поля / Бирюков С. В., Тюкина Л. В. № 2022101440; заявл. 24.01.22; опубл. 24.05.22. Бюл. 15.
- 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.
- Пат. 175038. Российская Федерация, МПК G 01 R 29/12. Датчик напряженности электрического поля / Бирюков С. В. № 2017118612; заявл. 29.05.17; опубл. 16.11.17, Бюл. № 32.
- Пат. 2768200 Российская Федерация, МПК G 01 R 29/12. Сдвоенный датчик составляющих вектора напряженности электрического поля / Бирюков С. В., Тюкина Л. В., Эйсмонт Н. Г. № 2021111582; заявл. 23.04.21; опубл. 28.10.21, Бюл. № 31.
- Пат. 211166 Российская Федерация, МПК G 01 R 29/12. Сдвоенный датчик для измерения напряженности электрического поля / Бирюков С. В., Тюкина Л. В. № 202210440; заявл. 24.01.22; опубл. 24.05.22, Бюл. № 15.
- Дез Ж., Пиррот П. Расчет и измерение напряженности электрического поля вблизи устройств высокого напряжения // *Влияние электроустановок высокого напряжения на окружающую среду / под ред. Ю. П. Шкарина*. Москва: Энергия, 1979. С. 10–19.
- Михайляну С., Мунтяну С., Данкила М. [и др.]. Измерение электрического поля вблизи оборудования высокого напряжения и оценка его биологического и физиологического влияния // *Влияние электроустановок высокого напряжения на окружающую среду / под ред. Ю. П. Шкарина*. Москва: Энергия, 1979. С. 33–41.
- Pop E., Crişans S., Stoica V. Măsurarea intensităţii cîmpului electric alternativ // *Metrologia aplicată*. 1975. Vol. 22, № 2. P. 73–81.
- Фридман Д. Е., Курзон Ф. Л., Фили М. [и др.]. Газоразрядный измеритель электрического поля // *Приборы для научных исследований*. 1982. № 8. С. 167–172.
- Ramirez J., Pacheco M., Rodriguez J. G. G. A device for the X-Y measurement of electric fields // *Measurement Science Technique*. 1994. Vol. 5, № 5. P. 1436–1442. DOI: 10.1088/0957-0233/5/12/003.
- А. с. 1401407 СССР, МКИ G 01R 29/12. Датчик напряженности электрического поля / Юркевич В. М., Климашевский И. Л., Полетаев В. А., Сидоров И. А. № 4114543/24-09; заявл. 09.09.86; опубл. 07.06.88. Бюл. № 21.

35. Baicry M., Le Prado M. Device for measuring an electric field in a conducting medium and method of calibrating such a device. US Patent № US20160238646 A1, USA, / № US 15/045,445; filed February 17th, 2016; published August 18th, 2017.

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

37. Бирюков С. В. Измерение напряженности электрических полей в диэлектрических средах электроиндукционными датчиками. Методы и средства измерений: моногр. Омск: Изд-во ОмГТУ, 2011. 196 с.

38. Бирюков С. В., Тюкина Л. В., Тюкин А. В. Измерительные цепи сдвоенных электроиндукционных сферических датчиков напряженности электрического поля замкнутой конфигурации // Омский научный вестник. 2022. № 2 (182). С. 102–109. DOI: 10.25206/1813-8225-2022-182-102-109.

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

КОЛМОГорова Светлана Сергеевна, кандидат технических наук, доцент (Россия), доцент кафедры информационных систем и технологий Санкт-Петербургского государственного лесотехнического университета, г. Санкт-Петербург.

SPIN-код: 4216-9920

ORCID: 0000-0001-8032-0095

ResearcherID: E-4652-2017

Для цитирования

Бирюков С. В., Колмогорова С. С. Сдвоенные сферические датчики напряженности электрического поля с раздельными чувствительными элементами и их исследования // Омский научный вестник. 2022. № 4 (184). С. 58–65. DOI: 10.25206/1813-8225-2022-184-58-65.

Статья поступила в редакцию 21.07.2022 г.

© С. В. Бирюков, С. С. Колмогорова