

УДК 621.317.628

© С. В. Бирюков, 2024

## СДВОЕННЫЕ СФЕРИЧЕСКИЕ ДАТЧИКИ НАПРЯЖЕННОСТИ ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ПОЛЯ С НАКЛАДНЫМИ, СОСТАВНЫМИ И РАЗДЕЛЬНЫМИ ЧУВСТВИТЕЛЬНЫМИ ЭЛЕМЕНТАМИ И ИХ СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ

Датчики напряженности электрического поля являются неотъемлемой частью измерительных приборов и систем. Правильный их выбор обуславливает создание приборов и систем с высокими метрологическими характеристиками. В данной работе рассматривается сравнительный анализ известных сдвоенных датчиков напряженности электрического поля с накладными, составными и отдельными чувствительными элементами (ЧЭ), основанных на явлении электростатической индукции. В сравнении участвуют технологические и конструктивные параметры сдвоенных датчиков и их метрологические характеристики. Сравнивается также сложность измерительных устройств датчиков. Все анализируемые сдвоенные датчики имеют практически равнозначные технологические и конструктивные параметры. Незначительной сложностью по технологическим и конструктивным параметрам обладают сдвоенные датчики с накладными чувствительными элементами. Сдвоенные датчики с составными чувствительными элементами имеют незначительно сложные измерительные устройства. Сильное отличие анализируемых сдвоенных датчиков прослеживается по метрологическим характеристикам. Установлено, что лучшими метрологическими характеристиками обладают сдвоенные датчики, имеющие отдельные ЧЭ второго варианта исполнения. Такие датчики обеспечивают погрешность от неоднородности поля, не превышающую  $\delta = \pm 0.9\%$ , и максимальный пространственный диапазон измерения  $0 < a < 1$  при угловых размерах чувствительных элементов  $\theta_{11} = 35.6^\circ$ ,  $\theta_{21} = 90^\circ$ ,  $\theta_{12} = 0$ ,  $\theta_{22} = 35.5^\circ$ . Сдвоенные датчики с отдельными чувствительными элементами первого варианта исполнения обладают погрешностью, не превышающей  $\delta = \pm 2\%$ , и максимальным пространственным диапазоном измерения  $0 < a < 1$  при угловых размерах чувствительных элементов  $\theta_{11} = 40^\circ$ ,  $\theta_{21} = 90^\circ$ ,  $\theta_{12} = 0$ ,  $\theta_{22} = 35.5^\circ$ . Сдвоенные датчики с накладными ЧЭ первого варианта исполнения и с составными ЧЭ первого варианта исполнения обладают практически одинаковыми параметрами. Такие датчики имеют положительную погрешность от неоднородности поля, не превышающую  $\delta = 4.6\%$ , и максимальный пространственный диапазон измерения  $0 < a < 0.92$ . Отмечается метрологическое превосходство сдвоенных датчиков с отдельными чувствительными элементами второго варианта исполнения перед другими анализируемыми сдвоенными датчиками; им, в первую очередь, нужно отдавать предпочтение в использовании.

*Кл. сл.:* электрическое поле, напряженность электрического поля, датчик напряженности электрического поля, сдвоенный датчик, сравнительный анализ, погрешность от неоднородности поля

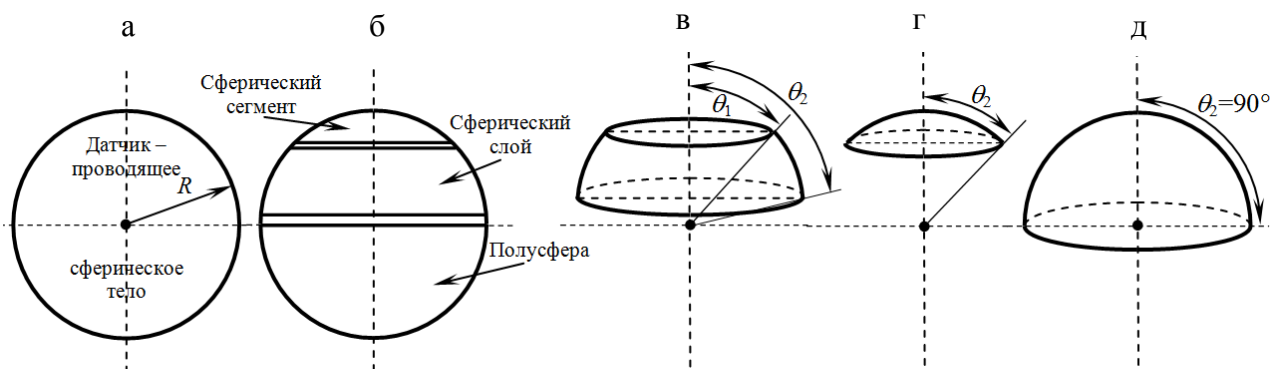
### ВВЕДЕНИЕ

В работе рассматриваются новые однокоординатные электроиндукционные сферические датчики напряженности электрического поля (НЭП). Электроиндукционные датчики НЭП основаны на явлении электростатической индукции, установленной и исследованной Уильямом Гильбертом (1544–1603 гг.) [1]. Согласно классификации, предложенной профессором В.Я. Ложниковым [2, 3], электроиндукционные датчики относятся к электроэлектрическим датчикам.

Выделим основные базовые понятия, сопровождающие известные и новые типы электроиндукционных сферических датчиков. К известным типам датчиков относятся *одинарные* и *двойные* дат-

чики. К новым типам датчиков автором отнесены *сдвоенные* датчики.

*Одинарные* электроиндукционные сферические датчики (ОЭСД) [4, 5] имеют один проводящий чувствительный элемент (ЧЭ). Он располагается изолированно от поверхности проводящего тела датчика, представляющего собой сферу радиуса  $R$  (рис. 1). Толщины изоляционного слоя  $l$  и ЧЭ  $\tau$  составляют порядка 0.1 мм. Чувствительный элемент служит для снятия измерительного сигнала с поверхности тела датчика. В связи с малыми значениями  $l$  и  $\tau$  чувствительные элементы можно считать частью сферической поверхности тела датчика, а датчик единой проводящей сферой (см. рис. 1, а).



**Рис. 1.** Составляющие электроиндукционного сферического датчика напряженности электрического поля. а — тело датчика; б — участки тела датчика, используемые в ЧЭ; в — ЧЭ в форме сферического слоя; г — ЧЭ в форме сферического сегмента ( $\theta_1 = 0$ ); д — ЧЭ в форме полусферы ( $\theta_1 = 0$ )

Чувствительным элементом может быть часть сферической поверхности в форме сферического слоя, угловые размеры которого задаются углами  $\theta_1$  и  $\theta_2$  (см. рис. 1, в). Частными случаями сферического слоя являются сферический сегмент, определяемый угловыми размерами  $\theta_1 = 0$  и  $\theta_2 < 90^\circ$  (см. рис. 1, г), и полусфера, определяемая угловыми размерами  $\theta_1 = 0$  и  $\theta_2 = 90^\circ$  (см. рис. 1, д).

Наличие одного ЧЭ позволяет снимать с ОЭСД однофазный сигнал. В связи с этим датчик чувствителен к синфазным помехам и наводкам, приводящим к большим погрешностям при измерении однородных и неоднородных полей. Такие датчики редко используются, и их применение по причинам, указанным выше, нецелесообразно.

Двойные электроиндукционные сферические датчики (ДЭСД) [6–9] состоят из двух ОЭСД, расположенных на одной координатной оси и объединенных в единое целое. При этом один ОЭСД располагается на верхней, а другой на нижней части полусферы, т.е. диаметрально противоположно. Чувствительные элементы и сферическое тело датчика изолированы между собой слоем диэлектрика. Наличие двух диаметрально противоположных ЧЭ позволяет снимать с ДЭСД два однофазных сигнала в противоположных фазах. Эта особенность ДЭСД позволяет включать его в дифференциальную измерительную цепь. Дифференциальное включение двойного датчика значительно повышает его помехозащищенность и чувствительность, а также приводит к уменьшению погрешности измерения неоднородных полей до погрешности порядка 5% [9].

Сдвоенные электроиндукционные датчики (СЭСД) [10–18] состоят из двух ДЭСД, расположенных на одной координатной оси и объединен-

ных в единое целое. Особенностью СЭСД является то, что входящие в состав сдвоенного датчика двойные датчики должны иметь противоположные по знаку погрешности одновременно измеренного одного и того же значения НЭП.

По формированию ЧЭ и их конструктивному исполнению СЭСД делятся на датчики с накладными [10–13], составными [13–16] и отдельными ЧЭ [13, 16–18]. При этом ЧЭ сдвоенных датчиков представляют собой различные сочетания составляющих электроиндукционного сферического датчика НЭП (см. рис. 1). Наличие такого многообразия СЭСД с различными конструктивными исполнениями ЧЭ требует их сравнительного анализа. В связи с этим данная работа посвящена сдвоенным сферическим датчикам НЭП с накладными, составными и отдельными чувствительными элементами и их сравнительному анализу.

## ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

Проведение сравнительного анализа трех разновидностей сдвоенных электроиндукционных сферических датчиков НЭП требует решения следующих задач:

- 1) разработать технологию изготовления СЭСД с накладными, составными и отдельными чувствительными элементами;
- 2) рассмотреть особенности конструктивного исполнения СЭСД с накладными, составными и отдельными чувствительными элементами;
- 3) оценить метрологические характеристики СЭСД с накладными, составными и отдельными чувствительными элементами;
- 4) провести сравнительный анализ СЭСД с накладными, составными и отдельными чувстви-

тельными элементами по их метрологическим характеристикам;

5) провести ранжирование СЭСД с накладными, составными и отдельными чувствительными элементами по их метрологическим характеристикам, выявить датчик с лучшими метрологическими характеристиками.

### ТЕХНОЛОГИЯ ИЗГОТОВЛЕНИЯ

Сдвоенные датчики с накладными ЧЭ представляют собой слоистую систему проводников и диэлектриков, состоящую из чередования проводящей поверхности (сферическое тело датчика) слоя диэлектрика, проводящей поверхности ЧЭ первого двойного датчика, слоя диэлектрика и проводящей поверхности второго двойного датчика. Проводящие поверхности ЧЭ первого и второго двойных датчиков выполняются в форме сферических сегментов с разными угловыми размерами  $\theta_2$  (см. рис. 1, г). При этом угловые размеры ЧЭ  $\theta_{21}$  первого двойного датчика близки к  $90^\circ$ , а угловые размеры ЧЭ  $\theta_{22}$  второго двойного датчика близки к  $45^\circ$  (вторые цифры в обозначении углов  $\theta_{21}$  и  $\theta_{22}$  указывают номер двойного датчика). Диэлектрические слои и проводящие ЧЭ наносятся на поверхность сферического тела датчика методом напыления. Для изготовления датчика требуются материалы с высокой электропроводимостью. Поэтому в качестве материала сферического тела датчика используется дюралюминий, впоследствии проходящий оксидирование. Оксидный слой дюралюминия является диэлектриком. Материалом ЧЭ служит медь. Таким образом, сначала на оксидированную поверхность сферического тела датчика напыляются медные чувствительные элементы первого двойного датчика с большим угловым размером  $\theta_{21}$ . Затем напыляется диэлектрический слой, поверх которого идет напыление медных чувствительных элементов второго двойного датчика с меньшим угловым размером  $\theta_{22}$ . Толщина диэлектрических слоев и проводящих ЧЭ составляет порядка 0.1 мм, что много меньше радиуса сферического тела датчика. В связи с этим датчик можно считать единой проводящей сферической поверхностью. По большому счету датчиком является проводящая сфера, а чувствительные элементы нужны для снятия информативных сигналов с различных участков поверхности сферы.

Сдвоенные датчики с составными и отдельными ЧЭ имеют одинаковое конструктивное решение. Технология их изготовления аналогична технологии изготовления сдвоенных датчиков с накладными ЧЭ. В отличие от сдвоенных датчиков

с накладными чувствительными элементами, ЧЭ датчиков с составными и отдельными ЧЭ выполняются разной формы. Так, у первого двойного датчика ЧЭ выполняются в форме сферического слоя с разными угловыми размерами  $\theta_1$  и  $\theta_2$  (см. рис. 1, в), а у второго двойного датчика ЧЭ выполняются в форме сферического сегмента с угловыми размерами  $\theta_2$  (см. рис. 1, г). При этом угловые размеры ЧЭ первого  $\theta_1$  и второго  $\theta_2$  двойных датчиков соотносятся как  $\theta_2 \leq \theta_1$ . При изготовлении таких датчиков сначала на оксидированную поверхность сферического тела датчика напыляются медные ЧЭ первого двойного датчика с угловыми размерами  $\theta_1$  и  $\theta_2$ , а затем — второго двойного датчика с угловым размером  $\theta_2$ . По причинам, указанным выше, сдвоенные датчики с составными и отдельными ЧЭ можно считать единой проводящей сферой.

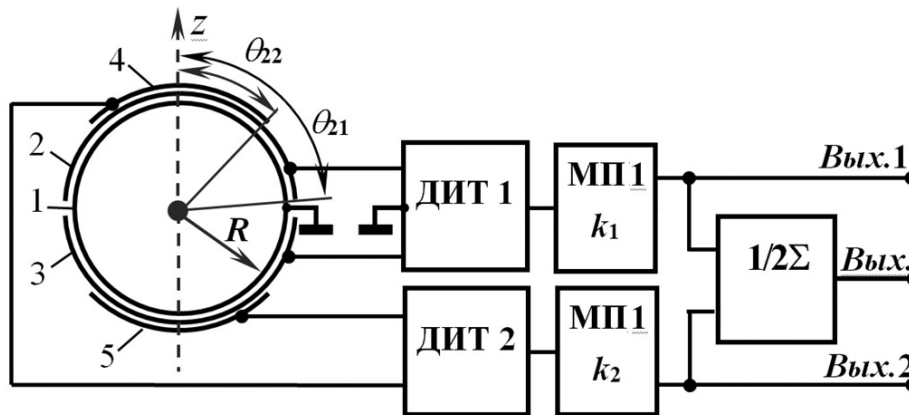
Отличие между сдвоенными датчиками с составными и отдельными ЧЭ состоит в измерительных устройствах. В сдвоенных датчиках с составными ЧЭ второй двойной датчик имеет ЧЭ в форме сферического сегмента. А первый двойной датчик имеет составные ЧЭ, состоящие из объединенных измерительным устройством сферического сегмента и сферического слоя. При таком объединении формируются ЧЭ в форме полусферы, и сдвоенный датчик становится адекватным сдвоенному датчику с накладными ЧЭ. Сдвоенные датчики с отдельными ЧЭ состоят из двух независимых двойных датчиков. Первый двойной датчик имеет ЧЭ в форме сферического слоя, а второй — в форме сферического сегмента.

Сдвоенные датчики с накладными, составными и отдельными ЧЭ имеют свои особенности. Для выяснения этих особенностей рассмотрим краткую теорию построения всех разновидностей СЭСД. Теория работы СЭСД основывается на взаимодействии проводящей сферы с однородным полем [19] и неоднородным полем точечного источника [20].

### СДВОЕННЫЙ ДАТЧИК С НАКЛАДНЫМИ ЧУВСТВИТЕЛЬНЫМИ ЭЛЕМЕНТАМИ

Сдвоенный электроиндукционный сферический датчик с накладными чувствительными элементами [10–13] состоит из двух независимых двойных датчиков, объединенных в единое целое, и измерительного устройства (рис. 2).

Датчик включает в себя проводящее сферическое тело 1 радиуса  $R$ , два ЧЭ 2 и 3, входящие в состав первого двойного датчика, два ЧЭ 4 и 5, входящие в состав второго двойного датчика, и измерительного устройства.



**Рис. 2.** Сдвоенный датчик напряженности электрического поля с накладными ЧЭ. 1 — проводящее сферическое тело; 2, 3 — чувствительные элементы первого двойного датчика; 4, 5 — чувствительные элементы второго двойного датчика; ДИТ 1, ДИТ 2 — дифференциальные интеграторы тока; МП 1, МП 2 — масштабные преобразователи;  $1/2\Sigma$  — сумматор с делением суммы на 2

Чувствительные элементы 2, 3 и 4, 5 выполнены в форме сферических сегментов с разными угловыми размерами  $\theta_2$ . Так, сферические сегменты первого двойного датчика имеют угловой размер  $\theta_{21} \leq 90^\circ$  (близки к полусфере), а сферические сегменты второго двойного датчика имеют угловой размер  $\theta_{22} \approx 45^\circ$ . Индексы в обозначении углов  $\theta_{21}$  и  $\theta_{22}$ , стоящие на первом месте, указывают на номер угла (первый или второй угол, см. рис. 1, в). Индексы, стоящие на втором месте, в обозначении углов указывают на принадлежность первому или второму двойному датчику. Все ЧЭ датчика через изоляционные слои поочередно накладываются (напыляются) на проводящую поверхность сферического тела и друг на друга и находятся на одной координатной оси z.

Измерительное устройство включает в себя два дифференциальных интегратора тока (усилителя заряда) [21] ДИТ 1 и ДИТ 2, два масштабных преобразователя МП 1 и МП 2, сумматор (с делителем на 2)  $1/2\Sigma$ .

Дифференциальные интеграторы тока служат для снятия разности зарядов с ЧЭ 2, 3 и 4, 5, пропорциональных напряженностям ЭП  $E_1(t)$  и  $E_2(t)$ . Масштабные преобразователи служат для выравнивания чувствительности двойных датчиков. Сумматор служит для нахождения среднего значения (полусуммы) между  $E_1(t)$  и  $E_2(t)$ , принимаемого за результат измерения и являющегося выходным сигналом сдвоенного датчика. Выходы измерительного устройства являются выходами первого и второго двойных датчиков (вых. 1 и вых. 2) и сдвоенного датчика (вых.) (см. рис. 2).

В ЭП на сферических сегментах двойных датчиков индуцируются электрические заряды — на первом двойном датчике  $q_2(t)$  и  $q_3(t)$ , а на втором —  $q_4(t)$  и  $q_5(t)$ . Разности этих зарядов создают информационные сигналы, пропорциональные напряженности ЭП в данной точке пространства.

В однородном поле дифференциальные разности зарядов для первого и второго двойных датчиков будут соответственно равны

$$\begin{aligned} \Delta q_{23}(t) &= q_2(t) - q_3(t) = \\ &= 6k_1\pi\epsilon\epsilon_0 R^2 \sin^2 \theta_{21} \cdot E_0(t) = G_1 \cdot E_0(t), \quad (1) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \Delta q_{45}(t) &= q_4(t) - q_5(t) = \\ &= 6k_2\pi\epsilon\epsilon_0 R^2 \sin^2 \theta_{22} \cdot E_0(t) = G_2 \cdot E_0(t), \quad (2) \end{aligned}$$

где  $k_1 = 1$ , а  $k_2 = \sin^2 \theta_{21} / \sin^2 \theta_{22}$  — коэффициенты пропорциональности;  $\epsilon$  — диэлектрическая проницаемость среды;  $\epsilon_0 = 8.85 \cdot 10^{-12}$  Ф/м — электрическая постоянная;  $E_0(t)$  — напряженность ЭП в точке измерения до внесения датчика;  $G_1$  и  $G_2$  — чувствительности первого и второго двойных датчиков. При указанных коэффициентах преобразования  $k_1$  и  $k_2$  чувствительности  $G_1 = G_2 = G$ . Равенство чувствительностей добиваются в однородном поле с помощью масштабных преобразователей МП 1 и МП 2 (см. рис. 2).

В неоднородном поле точечного источника дифференциальные разности зарядов для первого и второго двойных датчиков будут соответственно равны

$$\begin{aligned}\Delta q_{23}(t) &= q_2(t) - q_3(t) = \\ &= 6k_1 \pi \varepsilon \varepsilon_0 R^2 \sin^2 \theta_{21} \cdot E_1(t) = G \cdot E_1(t),\end{aligned}\quad (3)$$

$$\begin{aligned}\Delta q_{45}(t) &= q_4(t) - q_5(t) = \\ &= 6k_2 \pi \varepsilon \varepsilon_0 R^2 \sin^2 \theta_{22} \cdot E_2(t) = G \cdot E_2(t),\end{aligned}\quad (4)$$

где

$$\begin{aligned}E_1(t) &= [1 + \delta(\theta_{21})] \cdot E_0(t) \quad \text{и} \\ E_2(t) &= [1 + \delta(\theta_{22})] \cdot E_0(t)\end{aligned}\quad (5)$$

напряженности ЭП, измеренные сдвоенным датчиком с погрешностью, вызванной неоднородностью поля, первым и вторым двойными датчиками в точке измерения;  $\delta(\theta_{21})$  и  $\delta(\theta_{22})$  — противоположные по знаку погрешности от неоднородности поля первого и второго двойных датчиков. Погрешность  $\delta(\theta_{21})$  отрицательная, а погрешность  $\delta(\theta_{22})$  положительная.

Погрешности  $\delta(\theta_{21})$  и  $\delta(\theta_{22})$  для двойных датчиков в дифференциальном включении определяются выражением [9]

$$\delta(\theta_2) = \left[ \frac{1}{3a^2 \sin^2 \theta_2} \cdot \left( 2 - \frac{1-a^2}{\sqrt{1-2a \cos \theta_2 + a^2}} - \frac{1-a^2}{\sqrt{1+2a \cos \theta_2 + a^2}} \right) - 1 \right] \cdot 100, \quad (6)$$

где  $a = R/d$  — пространственный диапазон измерения, изменяющийся в пределах  $0 < a < 1$ ;  $R$  — радиус сферического тела датчика;  $d$  — расстояние от центра сферического тела датчика до источника поля.

Сдвоенные датчики лежат в основе реализации метода измерений по среднему значению [22, 23]. Поэтому принцип работы сдвоенного датчика заключается в одновременном измерении в одной точке поля двух значений напряженности  $E_1(t)$  и  $E_2(t)$  (см. выражения (5)) с противоположными по знаку погрешностями с последующим определением среднего значения из них:

$$E(t) = \frac{E_1(t) + E_2(t)}{2} = (1 + \delta) E_0(t), \quad (7)$$

где  $E(t)$  — результат измерения напряженности ЭП, полученный двойным датчиком;

$$\delta = \frac{\delta(\theta_{21}) + \delta(\theta_{22})}{2} \quad (8)$$

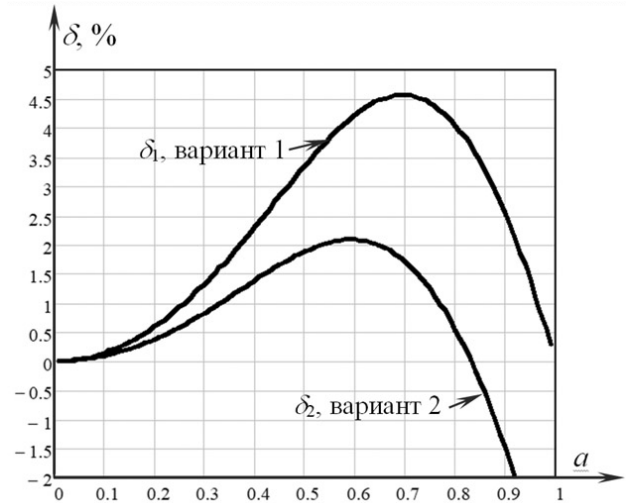
погрешность измерения  $E(t)$ , вызванная неоднородностью поля.

Выражения (6) и (8) позволяют установить взаимосвязь между погрешностью  $\delta$ , угловыми размерами  $\theta_{21}$  и  $\theta_{22}$  ЧЭ 2, 3 и 4, 5 и линейными размерами  $R$  сдвоенного датчика. Эта взаимосвязь может быть положена в основу построения математической модели сдвоенного датчика с накладными ЧЭ.

Математическая модель сдвоенного датчика с накладными ЧЭ описывается выражениями (6) и (8). Модель позволяет оценить погрешность двух вариантов конструктивного исполнения известных сдвоенных датчиков [10, 11]. Первый вариант сдвоенного датчика имеет угловые размеры ЧЭ  $\theta_{11} = 0$ ,  $\theta_{21} = 90^\circ$  и  $\theta_{12} = 0$ ,  $\theta_{22} = 45^\circ$  [10], а второй —  $\theta_{11} = 0$ ,  $\theta_{21} = 90^\circ$  и  $\theta_{12} = 0$ ,  $\theta_{22} = 47^\circ$  [11].

Результатом математического моделирования было определение лучших угловых размеров ЧЭ двойных датчиков. При этих угловых размерах ЧЭ сдвоенный датчик будет иметь меньшую погрешность и больший пространственный диапазон измерения.

С учетом сказанного найдены погрешности  $\delta$  сдвоенного датчика для первого [10] и второго [11] вариантов их исполнения. Графики погрешностей  $\delta_1$  и  $\delta_2$  в зависимости от пространственного диапазона измерения  $a$  представлены на рис. 3. Индексы 1 и 2 в обозначении погрешностей  $\delta_1$  и  $\delta_2$  указывают на их принадлежность первому или второму варианту исполнения сдвоенных датчиков.



**Рис. 3.** Графики изменений погрешности в пространственном диапазоне  $a$  первого [10] и второго [11] вариантов исполнения сдвоенных датчиков.

$\delta$  — погрешность двойного датчика от неоднородности поля;  $a = R/d$  — пространственный диапазон измерения;  $R$  — радиус сферического тела датчика;  $d$  — расстояние от центра сферического тела датчика до источника поля

Из графиков (рис. 3) следует, что сдвоенный датчик первого варианта имеет положительную погрешность (с максимумом  $\delta = +4.6\%$ ) во всем пространственном диапазоне измерения  $0 < a < 1$  ( $d > R$ ), а второго варианта — погрешность в пределах  $\delta = \pm 2.1\%$  и незначительно ограниченный пространственный диапазон измерения  $0 < a < 0.92$  ( $d \geq 1.1 R$ ).

### СДВОЕННЫЙ ДАТЧИК С СОСТАВНЫМИ ЧУВСТВИТЕЛЬНЫМИ ЭЛЕМЕНТАМИ

Сдвоенный электроиндукционный сферический датчик с составными ЧЭ [13–16] состоит из проводящего сферического тела 1 радиуса  $R$ , двух пар чувствительных электродов 2, 3 и 4, 5, объединенных в единое целое, и измерительного устройства (рис. 4).

Первая пара чувствительных электродов 2, 3 выполнена в форме сферических слоев с угловыми размерами  $\theta_{11}$  и  $\theta_{21}$  (см. рис. 1, в), а вторая пара чувствительных электродов 4, 5 выполнена в форме сферических сегментов с угловыми размерами  $\theta_{12} = 0$  и  $\theta_{22}$  (см. рис. 1, г).

Так, сферические слои первой пары чувствительных электродов имеют угловые размеры  $\theta_{11}$  и  $\theta_{21} \leq 90^\circ$  (близкий к полусфере), а сферические сегменты второй пары чувствительных электродов имеют угловой размер  $\theta_{22} \approx \theta_{11}$ . Центры пар чувствительных электродов расположены на одной координатной оси  $z$ .

Из чувствительных электродов 2, 3 и 4, 5 формируются ЧЭ двух двойных датчиков. Первый двойной датчик имеет составные ЧЭ, состоящие из чувствительных электродов 2+4 и 3+5, а у вто-

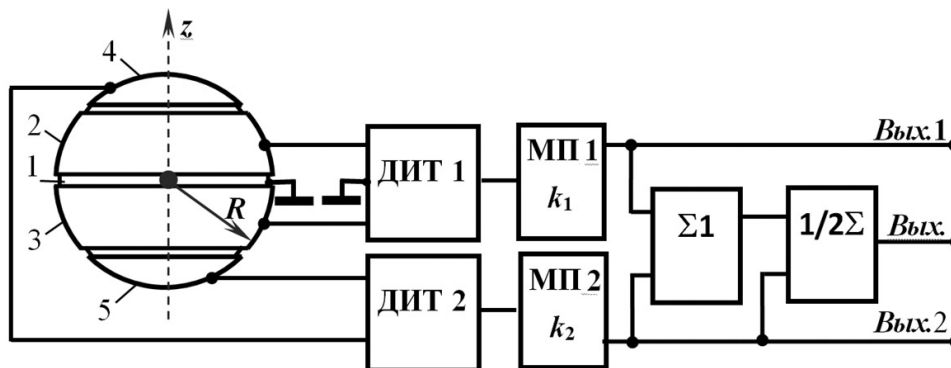
рого двойного датчика чувствительные электроды 4, 5 являются его ЧЭ. Вся система чувствительных электродов 2, ..., 5 и проводящее сферическое тело 1 представляют собой единую сферическую поверхность. Чувствительные электроды 2, 4 и 3, 5 объединяются попарно через измерительное устройство (см. рис. 4).

Измерительное устройство состоит из двух дифференциальных интеграторов тока ДИТ 1 и ДИТ 2, двух масштабных преобразователей МП 1 и МП 2, сумматора  $\Sigma 1$  и сумматора  $1/2\Sigma$ . Сумматор  $\Sigma 1$  служит для объединения сигналов с первого и второго двойных датчиков. При этом обеспечивается формирование составных ЧЭ в форме полусферы первого двойного датчика. ДИТ 1, ДИТ 2 и сумматор  $1/2\Sigma$  имеют назначения, аналогичные в схеме рис. 2. Выходы измерительного устройства являются выходами первого и второго двойных датчиков (вых. 1 и вых. 2) и двойного датчика (вых.) (см. рис. 4).

При помещении сдвоенного датчика в ЭП на его чувствительных электродах 2, 3 и 4, 5 будут индуцироваться электрические заряды: на первой паре 2, 3 —  $q_2(t)$  и  $q_3(t)$ , а на второй паре 4, 5 —  $q_4(t)$  и  $q_5(t)$ .

В однородном поле дифференциальные разности зарядов между первой 2, 3 и второй 4, 5 парами чувствительных электродов будут соответственно равны:

$$\begin{aligned} \Delta q_{23}(t) &= q_2(t) - q_3(t) = \\ &= 6k_3 \pi \epsilon \epsilon_0 R^2 \sin(\theta_{12} - \theta_{11}) \cdot \sin(\theta_{12} + \theta_{11}) \cdot E_0(t) = \\ &= G_3 \cdot E_0(t), \end{aligned} \quad (9)$$



**Рис. 4.** Сдвоенный датчик напряженности электрического поля с составными ЧЭ. 1 — проводящее сферическое тело; 2, 3 — чувствительные элементы в форме сферических слоев; 4, 5 — чувствительные элементы в форме сферических сегментов; ДИТ 1, ДИТ 2 — дифференциальные интеграторы тока; МП 1, МП 2 — масштабные преобразователи;  $\Sigma 1$  — сумматор;  $1/2\Sigma$  — сумматор с делением суммы на 2

$$\begin{aligned}\Delta q_{45}(t) &= q_4(t) - q_5(t) = \\ &= 6k_2 \pi \varepsilon \varepsilon_0 R^2 \sin^2 \theta_{22} \cdot E_0(t) = G_2 \cdot E_0(t).\end{aligned}\quad (10)$$

Для составных ЧЭ, состоящих из чувствительных электродов 2+4 и 3+5, дифференциальная разность электрических зарядов будет определяться:

$$\begin{aligned}\Delta q_{2-5}(t) &= [q_2(t) + q_4(t)] - [q_3(t) + q_5(t)] = \\ &= 6k_4 \pi \varepsilon \varepsilon_0 R^2 \times \\ &\times [\sin(\theta_{21} - \theta_{11}) \cdot \sin(\theta_{21} + \theta_{11}) + \sin^2 \theta_{22}] \cdot E_0(t) = \\ &= G_4 \cdot E_0(t).\end{aligned}\quad (11)$$

При выполнении условия  $\theta_{22} = \theta_{11}$  коэффициенты пропорциональности станут равны, т.е.  $k_4 = k_1$ , а выражение (11) преобразуется в выражение

$$\Delta q_{2-5}(t) = 6k_1 \pi \varepsilon \varepsilon_0 R^2 \sin^2 \theta_{21} \cdot E_0(t), \quad (12)$$

соответствующее выражению двойного датчика с ЧЭ, выполненными в форме полусферы (см. выражение (3)). Все входящие в выражения (9)–(12) числовые параметры соответствуют параметрам выражений (1) и (2).

В неоднородном поле точечного источника дифференциальные разности зарядов между первой (2, 3) и второй (4, 5) парами чувствительных электродов будут соответственно равны:

$$\begin{aligned}\Delta q_{23}(t) &= q_2(t) - q_3(t) = \\ &= 6k_3 \pi \varepsilon \varepsilon_0 R^2 \sin(\theta_{21} - \theta_{11}) \cdot \sin(\theta_{21} + \theta_{11}) \cdot E_1'(t) = \\ &= G_3 \cdot E_1'(t),\end{aligned}\quad (13)$$

$$\begin{aligned}\Delta q_{45}(t) &= q_4(t) - q_5(t) = \\ &= 6k_2 \pi \varepsilon \varepsilon_0 R^2 \sin^2 \theta_{22} \cdot E_2(t) = G_2 \cdot E_2(t).\end{aligned}\quad (14)$$

Тогда на составных ЧЭ 2+4 и 3+5 первого двойного датчика дифференциальная разность зарядов определится выражением

$$\begin{aligned}\Delta q_{2-5}(t) &= \Delta q_{23}(t) + q_{45}(t) = \\ &= 6\pi \varepsilon \varepsilon_0 R^2 \times \\ &\times [\sin(\theta_{21} - \theta_{11}) \cdot \sin(\theta_{21} + \theta_{11}) + \sin^2 \theta_{22}] \cdot E_1(t).\end{aligned}\quad (15)$$

Для составных ЧЭ 2+4 и 3+5, имеющих форму полусфер,  $\theta_{11} = \theta_{22}$ . Тогда после преобразования выражения (15) получим

$$\Delta q_{2-5}(t) = 6\pi \varepsilon \varepsilon_0 R^2 \cdot \sin^2 \theta_{21} \cdot E_1(t).\quad (16)$$

В выражениях (13)–(16)

$$\begin{aligned}E_1'(t) &= [1 + \delta(\theta_{11}, \theta_{21})] \cdot E_0(t), \\ E_1(t) &= [1 + \delta_2(\theta_{21})] \cdot E_0(t) \quad \text{и} \\ E_2(t) &= [1 + \delta_1(\theta_{22})] \cdot E_0(t)\end{aligned}\quad (17)$$

напряженности ЭП, измеренные соответственно чувствительными электродами (2, 3), (4, 5) и составными ЧЭ 2+4 и 3+5 с погрешностями  $\delta(\theta_{11}, \theta_{21})$ ,  $\delta_1(\theta_{22})$  и  $\delta_2(\theta_{21})$  соответственно. Погрешность  $\delta_1(\theta_{22})$  положительная, а погрешности  $\delta_2(\theta_{21})$  и  $\delta(\theta_{21}, \theta_{21})$  отрицательные. Указанные погрешности для ЧЭ в форме сферического слоя, сферического сегмента и составного ЧЭ определяются соответствующими выражениями:

– для сферического слоя [24]

$$\delta(\theta_{11}, \theta_{21}) = \left[ \frac{1 - a^2}{3a^2 \sin(\theta_{21} - \theta_{11}) \sin(\theta_{21} + \theta_{11})} \times \left( \frac{1}{\sqrt{1 - 2a \cos \theta_{11} + a^2}} + \frac{1}{\sqrt{1 + 2a \cos \theta_{11} + a^2}} \right) - \left( \frac{1}{\sqrt{1 - 2a \cos \theta_{21} + a^2}} - \frac{1}{\sqrt{1 + 2a \cos \theta_{21} + a^2}} \right) \right] \cdot 100;\quad (18)$$

– для сферического сегмента [9]  $\delta(\theta_{22})$  определяется выражением (6) при подстановке в него  $\theta_2 = \theta_{22} \geq 45^\circ$

$$\delta_1(\theta_{22}) = \left[ \frac{1}{3a^2 \sin^2 \theta_{22}} \cdot \left( 2 - \frac{1-a^2}{\sqrt{1-2a \cos \theta_{22} + a^2}} - \frac{1-a^2}{\sqrt{1+2a \cos \theta_{22} + a^2}} \right) - 1 \right] \cdot 100; \quad (19)$$

– для составного ЧЭ при выполнении условия  $\theta_{22} = \theta_{11}$  погрешность  $\delta_2(\theta_{21})$  будет определяться выражением (19), после подстановки в него  $\theta_{21}$ .

Таким образом, сдвоенные датчики с составными ЧЭ при упрощенном конструктивном и технологическом исполнении и одинаковых условиях эксплуатации обладают теми же погрешностями, что и сдвоенные датчики с накладными ЧЭ. Так, сдвоенному датчику с составными чувствительными элементами, имеющему угловые размеры ЧЭ  $\theta_{11} = 45^\circ$ ,  $\theta_{21} = 90^\circ$  и  $\theta_{22} = 45^\circ$  [14] соответствуют погрешности сдвоенного датчика с накладными ЧЭ, угловые размеры которых у первого двойного датчика  $\theta_{11} = 0^\circ$ ,  $\theta_{21} = 90^\circ$ , а у второго  $\theta_{12} = 0$ ,  $\theta_{22} = 45^\circ$  [10]. Для сдвоенного датчика, имеющего угловые размеры чувствительных элементов  $\theta_{11} = 47^\circ$ ,  $\theta_{21} = 90^\circ$  и  $\theta_{22} = 47^\circ$  [15], соответствуют погрешности сдвоенного датчика с накладными ЧЭ с угловыми размерами  $\theta_{11} = 0$ ,  $\theta_{21} = 90^\circ$  и  $\theta_{22} = 47^\circ$  [11].

Графики изменения погрешностей от неоднородности поля в пространственном диапазоне измерения для первого [14] и второго [15] вариантов построения сдвоенных датчиков с составными чувствительными элементами, совпадают с графиками, приведенными на рис. 3.

### СДВОЕННЫЙ ДАТЧИК С РАЗДЕЛЬНЫМИ ЧУВСТВИТЕЛЬНЫМИ ЭЛЕМЕНТАМИ

Сдвоенный электроиндукционный сферический

датчик с отдельными ЧЭ [17, 18] состоит из проводящего сферического тела 1 радиуса  $R$ , двух пар ЧЭ 2, 3 и 4, 5, представляющих собой единую сферическую поверхность, и измерительного устройства (рис. 5).

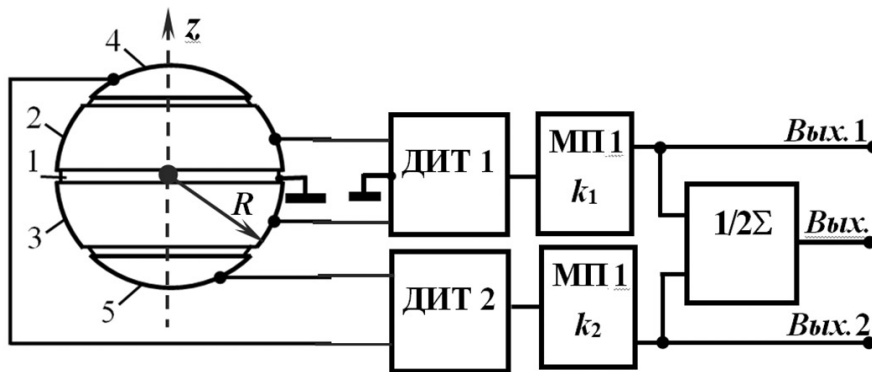
Рассматриваемый сдвоенный датчик аналогичен сдвоенному датчику с составными ЧЭ, а его измерительное устройство аналогично измерительному устройству сдвоенного датчика с накладными ЧЭ.

В связи с этим в ЭП дифференциальные разности зарядов между первой 2, 3 и второй 4, 5 парами чувствительных электродов двойных датчиков будут соответственно определяться

– в однородном поле выражениями (9) и (10);

– в неоднородном поле точечного источника выражениями (13) и (14).

В выражениях (9), (10) и (13), (14) входящие в них значения напряженностей  $E_0(t)$ ,  $E'_1(t) = E_1(t)$  и  $E_2(t)$  являются напряженностями соответственно измеренными сдвоенным датчиком в однородном и в неоднородном поле. При этом значение  $E_0(t)$  в однородном поле измерено двойными датчиками без погрешности, а значения  $E_1(t)$  и  $E_2(t)$  этими же датчиками измерены с противоположными по знаку погрешностями  $\delta(\theta_{11}, \theta_{21})$  и  $\delta_1(\theta_{22})$ , определяемыми выражениями (18) и (19) соответственно.



**Рис. 5.** Сдвоенный датчик напряженности электрического поля с отдельными ЧЭ. 1 — проводящее сферическое тело; 2, 3 — чувствительные элементы в форме сферических слоев; 4, 5 — чувствительные элементы в форме сферических сегментов; ДИТ 1, ДИТ 2 — дифференциальные интеграторы тока; МП 1, МП 2 — масштабные преобразователи;  $1/2\Sigma$  — сумматор с делением суммы на 2



Тогда результат измерения сдвоенного датчика с отдельными ЧЭ будет определяться выражением (7), а его погрешность

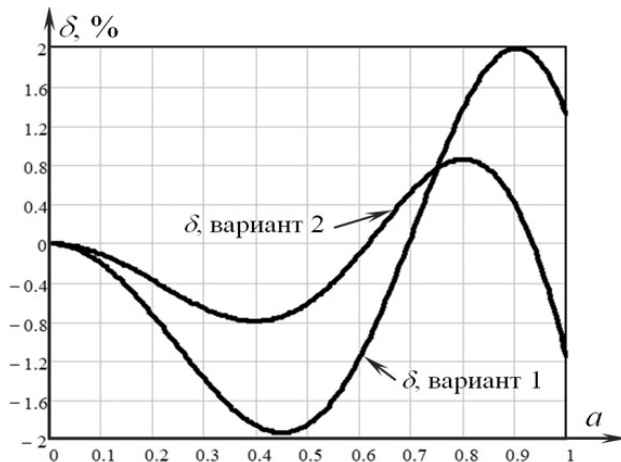
$$\delta = \frac{\delta(\theta_{11}, \theta_{21}) + \delta(\theta_{22})}{2}. \quad (20)$$

По полученной взаимосвязи параметров сдвоенного датчика с отдельными ЧЭ составлена его математическая модель и проведено математическое моделирование по определению оптимальных угловых размеров ЧЭ датчика при минимуме погрешности и максимуме пространственного диапазона измерений.

Математическая модель сдвоенного датчика с отдельными ЧЭ состоит из выражений (18)–(20). Модель позволяет оценить погрешность двух вариантов конструктивного исполнения известных сдвоенных датчиков [17, 18]. Первый вариант сдвоенного датчика имеет угловые размеры ЧЭ  $\theta_{11} = 40^\circ$ ,  $\theta_{21} = 90^\circ$  и  $\theta_{12} = 0$ ,  $\theta_{22} = 35^\circ$  [17], а второй —  $\theta_{11} = 35.6^\circ$ ,  $\theta_{21} = 90^\circ$  и  $\theta_{12} = 0$ ,  $\theta_{22} = 35.5^\circ$  [18].

Результаты моделирования в виде графика зависимости погрешности  $\delta$  от пространственного диапазона измерений  $a$  для первого и второго вариантов конструктивного исполнения сдвоенных датчиков представлены на рис. 6.

Из графиков (см. рис. 6) следует, что сдвоен-



**Рис. 6.** Графики изменений погрешности в пространственном диапазоне  $a$  первого [17] и второго [18] вариантов исполнения сдвоенных датчиков.

$\delta$  — погрешность сдвоенного датчика от неоднородности поля;  $a = R/d$  — пространственный диапазон измерения;  $R$  — радиус сферического тела датчика;  $d$  — расстояние от центра сферического тела датчика до источника поля

ный датчик первого варианта имеет погрешность  $\delta = \pm 2\%$ , а второго варианта — погрешность  $\delta = \pm 0.86\%$  в одном и том же максимальном пространственном диапазоне измерения  $0 < a < 1$  ( $d > R$ ).

## СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ

Проведем сравнительный анализ рассмотренных в статье сдвоенных датчиков с накладными [10, 11], составными [14, 15] и отдельными [17, 18] ЧЭ. В качестве элементов сравнения выбраны технология изготовления, конструктивное исполнение, конструктивные параметры, метрологические характеристики сдвоенных датчиков и сложность измерительного устройства.

Технология изготовления сравниваемых датчиков складывается из изготовления проводящего сферического тела датчика и напыления на него с чередующейся последовательностью диэлектрика и проводника. Общими элементами изготовления датчика являются процессы изготовления сферического тела и последовательного напыления на него диэлектрика и проводника. Отличие в технологии изготовления датчиков заключается в количестве слоев диэлектрика и проводника, нанесенных методом напыления на проводящую поверхность сферического тела. Максимальное количество слоев, нанесенных методом напыления, имеет датчик с накладными ЧЭ. Датчики с составными и отдельными ЧЭ имеют на два слоя меньше. Поэтому они более технологичны в изготовлении, и им должно быть отдано предпочтение.

По конструктивному исполнению сравниваемые датчики отличаются друг от друга. Наибольшее отличие имеет датчик с накладными ЧЭ. Конструктивные части датчиков с составными и отдельными ЧЭ схожи. Отличие состоит только лишь в угловых размерах ЧЭ.

Конструктивные параметры ( $\theta_{11}$ ,  $\theta_{21}$ ,  $\theta_{12}$ ,  $\theta_{22}$  и  $R$ ) датчиков зависят от области их применения, желаемых пространственного диапазона измерений и метрологических характеристик. В этом плане все сравниваемые датчики равнозначны.

При сравнении сложности измерительных устройств сдвоенных датчиков с накладными (см. рис. 2), составными (см. рис. 4) и отдельными (см. рис. 5) ЧЭ, то по количеству измерительных преобразователей наиболее сложным оказывается измерительное устройство для датчика с составными ЧЭ. Однако эта сложность несущественна.

К метрологическим характеристикам сравниваемых датчиков можно отнести дополнительную погрешность от неоднородности ЭП  $\delta$  и пространственный диапазон измерения  $a$ . По этим характе-

ристикам наблюдаются их основные отличия.

Для выявления этих отличий сравним полученные в статье результаты для сдвоенных датчиков с накладными, составными и раздельными ЧЭ, представленные на рис. 3 и рис. 6.

На рис. 3 и рис. 6 показаны графические зависимости погрешностей  $\delta(a)$  сдвоенных датчиков в пространственном диапазоне измерения  $a$  для двух вариантов исполнения каждого из датчиков.

Графики погрешностей, представленные на рис. 3, относятся к двум типам сдвоенных датчиков — датчиков с накладными и составными ЧЭ. На рис. 6 представлены графики погрешностей, относящиеся к одному типу сдвоенных датчиков — датчиков с раздельными ЧЭ. Датчики первого и второго вариантов (рис. 3 и рис. 6) отличаются только угловыми размерами их ЧЭ.

Так, датчики первого варианта (см. рис. 3), относящиеся к сдвоенным датчикам:

– с накладными ЧЭ имеют угловые размеры  $\theta_{11} = 0, \theta_{21} = 90^\circ, \theta_{12} = 0, \theta_{22} = 45^\circ$ ;

– с составными ЧЭ имеют угловые размеры  $\theta_{11} = 45^\circ, \theta_{21} = 90^\circ, \theta_{12} = 0, \theta_{22} = 45^\circ$ .

Погрешности этих датчиков не превышают  $\delta = +4.6\%$  в полном пространственном диапазоне измерения  $0 < a < 1$  ( $d > R$ ).

Датчики второго варианта (см. рис. 3), относящиеся к сдвоенным датчикам:

– с накладными ЧЭ имеют угловые размеры  $\theta_{11} = 0, \theta_{21} = 90^\circ, \theta_{12} = 0, \theta_{22} = 47^\circ$ ;

– с составными ЧЭ имеют угловые размеры  $\theta_{11} = 47^\circ, \theta_{21} = 90^\circ, \theta_{12} = 0, \theta_{22} = 47^\circ$ .

Погрешности этих датчиков не превышают  $\delta = \pm 2.1\%$  в пространственном диапазоне измерения  $0 < a < 0.92$  ( $d > 1.1R$ ).

Датчики первого варианта (см. рис. 6), относящиеся к сдвоенным датчикам с раздельными ЧЭ, имеют угловые размеры:

$\theta_{11} = 40^\circ, \theta_{21} = 90^\circ, \theta_{12} = 0, \theta_{22} = 35^\circ$ .

Погрешности датчиков этого варианта не превышают  $\delta = \pm 2\%$  в полном пространственном диапазоне измерения  $0 < a < 1$  ( $d > R$ ).

Датчики второго варианта (см. рис. 6), относящиеся к сдвоенным датчикам с раздельными ЧЭ, имеют угловые размеры:

$\theta_{11} = 35.6^\circ, \theta_{21} = 90^\circ, \theta_{12} = 0, \theta_{22} = 35.5^\circ$ .

Погрешности этих датчиков не превышают  $\delta = \pm 0.9\%$  в полном пространственном диапазоне измерения  $0 < a < 1$  ( $d > R$ ).

Результаты сравнения сдвоенных датчиков представлены в табл.

**Табл.** Результаты сравнения сдвоенных датчиков

Элементы сравнения		Сдвоенные датчики					
		Накладные ЧЭ		Составные ЧЭ		Раздельные ЧЭ	
		Вариант 1	Вариант 2	Вариант 1	Вариант 2	Вариант 1	Вариант 2
Технология изготовления		Сложная		Упрощенная		Упрощенная	
Конструктивное исполнение		Сложное		Упрощенное		Упрощенное	
Измерительное устройство		Простое		Усложненное		Простое	
Конструктивные параметры	$\theta_{11}$ , град	0	0	45	47	40	35.6
	$\theta_{21}$ , град	90	90	90	90	90	90
	$\theta_{12}$ , град	0	0	0	0	0	0
	$\theta_{22}$ , град	45	47	45	47	35	35.5
	$R$	Все одного радиуса					
Метрологические характеристики	$\delta$ , %	+4.6	$\pm 2.1$	+4.6	$\pm 2.1$	$\pm 2$	$\pm 0.9$
	$a$	$0 < a < 1$	$0 < a < 0.92$	$0 < a < 1$	$0 < a < 0.92$	$0 < a < 1$	$0 < a < 1$

Таким образом, проведенный сравнительный анализ сдвоенных датчиков с накладными, составными и отдельными ЧЭ показал, что по большинству элементов сравнения сдвоенные датчики с отдельными ЧЭ имеют значительные преимущества перед двумя другими.

## РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

В представленной статье проведен сравнительный анализ сдвоенных сферических датчиков напряженности ЭП с накладными, составными и отдельными ЧЭ по технологии изготовления, конструктивного исполнения, конструктивным параметрам, сложности измерительного устройства и метрологическим характеристикам.

В результате анализа:

1) установлено, что по технологии изготовления и конструктивного исполнения сдвоенные сферические датчики с накладными ЧЭ более сложны, чем сдвоенные датчики с составными и отдельными ЧЭ;

2) установлено, что при практически равнозначности измерительных устройств сдвоенных датчиков более сложное измерительное устройство имеет сдвоенный датчик с составными ЧЭ;

3) показано, что по конструктивным параметрам все варианты сдвоенных датчиков пригодны для исполнения;

4) установлено, что лучшими метрологическими характеристиками обладает второй вариант сдвоенного датчика с отдельными ЧЭ.

Таким образом, результаты сравнительного анализа сдвоенных датчиков позволили провести их ранжирование по простоте исполнения и по их метрологическим характеристикам.

К лучшему техническому решению следует отнести сдвоенный датчик с отдельными ЧЭ второго варианта исполнения. Такой сдвоенный датчик обладает погрешностью от неоднородности поля, не превышающей  $\delta = \pm 0.9\%$ , максимальным пространственным диапазоном измерения  $0 < a < 1$  при угловых размерах ЧЭ  $\theta_{11} = 35.6^\circ$ ,  $\theta_{21} = 90^\circ$ ,  $\theta_{12} = 0$ ,  $\theta_{22} = 35.5^\circ$ .

Ко второму техническому решению можно отнести сдвоенные датчики трех разновидностей. Это сдвоенные датчики с накладными ЧЭ второго исполнения, с составными ЧЭ второго исполнения и с отдельными ЧЭ первого исполнения. Лучшими характеристиками из них обладают сдвоенные датчики с отдельными ЧЭ. Они имеют погрешность от неоднородности поля, не превышающую  $\delta = \pm 2\%$ , и максимальный пространственный диапазон измерения  $0 < a < 1$  при угловых размерах ЧЭ  $\theta_{11} = 40^\circ$ ,  $\theta_{21} = 90^\circ$ ,  $\theta_{12} = 0$ ,  $\theta_{22} = 35.5^\circ$ .

К третьему техническому решению отнесены сдвоенные датчики с накладными ЧЭ первого исполнения и с составными ЧЭ первого исполнения. Датчики обладают практически одинаковыми параметрами. Однако по простоте технологического и конструктивного исполнения следует выделить сдвоенный датчик с составными ЧЭ. Такие датчики имеют положительную погрешность от неоднородности поля, не превышающую  $\delta = +4.6\%$ , и максимальный пространственный диапазон измерения  $0 < a < 0.92$ .

## ВЫВОДЫ И ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Сравнительный анализ сдвоенных датчиков с накладными, составными и отдельными ЧЭ привел к выводу о целесообразности использования в приборах для измерения напряженности ЭП сдвоенных датчиков с отдельными ЧЭ второго варианта. Такие датчики имеют значительные преимущества по всем параметрам и метрологическим характеристикам перед другими видами сдвоенных датчиков.

В заключение отметим, что сдвоенные датчики являются перспективными приборами, позволяющими значительно уменьшить погрешность измерения напряженности неоднородного ЭП и расширить пространственный диапазон измерения.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Гильберт Уильям // Большая советская энциклопедия: в 30 т. / ред. А.М. Прохоров. 3-е изд. М.: Советская энциклопедия, 1969.
2. Ложников В.Я. О классификации измерительных преобразователей, основанных на физических эффектах // Измерительные преобразователи (Межвуз. сб. науч. тр.). Омск: ОмПИ, 1975. С. 146–161.
3. Дьяков Е.П., Ложников В.Я., Рожков Н.Ф. Измерительные преобразователи напряженности электрического поля промышленной частоты: Обзор // Измерительные преобразователи (Межвуз. сб. науч. тр.). Омск: ОмПИ, 1975. С. 162–166.
4. Дез Ж., Пиррот П. Расчет и измерение напряженности электрического поля вблизи устройств высокого напряжения // Влияние электроустановок высокого напряжения на окружающую среду (Переводы докладов Междунар. конф. по большим электрическим системам (СИГРЭ-76) / Под ред. Ю.П. Шкарина). М.: Энергия, 1979. С. 10–19.
5. Ложников В.Я. Цифровой измеритель напряженности электрического поля промышленной частоты // Приборы и техника эксперимента. 1981. № 1. С. 275.
6. Гатман С. Двойной измеритель электрического поля с защитой // Приборы для научных исследований. 1968. № 1. С. 45–49.

7. Берент Г.Н., Плейс И.Р. Датчик электрического поля // Приборы для научных исследований. 1971. № 6. С. 141–142.
8. Misakian M., Kotter F.R., Kahler R.L. Miniature ELF Electric Field Probe // Instruments for scientific research. 1978. Vol. 7. P. 933–935. DOI: 10.1063/1.1135497
9. Biryukov S.V., Kaidanov F.G., Kats R.A., 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.
10. Бирюков С.В., Тюкина Л.В., Данышина В.В. Устройство для измерения напряженности электрического поля со сдвоенным датчиком. Патент № 207465 U1 РФ. Оpubл. 28.10.2021, Бюл. 31. URL: [https://yandex.ru/patents/doc/RU207465U1\\_20211028](https://yandex.ru/patents/doc/RU207465U1_20211028)
11. Бирюков С.В., Тюкина Л.В. Сдвоенный датчик для измерения напряженности электрического поля с накладными чувствительными элементами. Патент № 210427 U1 РФ. Оpubл. 15.04.2022, Бюл. 11. URL: [https://yandex.ru/patents/doc/RU210427U1\\_20220415](https://yandex.ru/patents/doc/RU210427U1_20220415)
12. Бирюков С.В. Исследование сдвоенного сферического датчика напряженности электрического поля с накладными чувствительными элементами // Приборы. 2022. № 7 (265). С. 28–36. URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=49450884>
13. Бирюков С.В., Тюкин А.В., Тюкина Л.В. Датчик напряженности электрического поля сдвоенного типа повышенной точности // Вестник Воронежского государственного технического университета. Т. 18, № 2. 2022. С. 86–93. URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=48315805>
14. Бирюков С.В., Тюкина Л.В., Эйсмонт Н.Г. Устройство для измерения напряженности электрического поля со сдвоенным датчиком. Патент № 207464 U1 РФ. Оpubл. 28.10.2021, Бюл. 31. URL: [https://yandex.ru/patents/doc/RU207464U1\\_20211028](https://yandex.ru/patents/doc/RU207464U1_20211028)
15. Бирюков С.В., Тюкина Л.В. Сдвоенный датчик для измерения напряженности электрического поля с составными чувствительными элементами. Патент № 210806 U1 РФ. Оpubл. 05.05.2022, Бюл. 13. URL: <https://patents.google.com/patent/RU210806U1/ru>
16. Бирюков С.В., Тюкин А.В., Тюкина Л.В. Исследование сдвоенного сферического датчика напряженности электрического поля с составными чувствительными элементами // Вестник Воронежского государственного технического университета. Т. 18, № 5. 2022. С. 113–123. URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=49606560>
17. Бирюков С.В., Тюкина Л.В. Сдвоенный датчик для измерения напряженности электрического поля. Патент № 211166 U1 РФ. Оpubл. 24.05.2022, Бюл. 15. URL: <https://patents.google.com/patent/RU211166U1/ru>
18. Бирюков С.В., Тюкина Л.В. Способ измерения напряженности электрического поля датчиком сдвоенного типа. Патент № 211936 U1 РФ. Оpubл. 29.06.2022, Бюл. 19. URL: <https://patents.google.com/patent/RU211936U1/ru>
19. Черноуцан А. Проводящий шар в однородном поле // Квант. 2001. № 1. С. 39–43.
20. Мирюлюбов Н.Н., Костенко М.В., Левинштейн М.Л. и др. Методы расчета электрических полей. М.: Высшая школа, 1963. 415 с.
21. Гутников В.С. Интегральная электроника в измерительных устройствах. Л.: Энергоатомиздат, Ленингр. отд., 1988. 304 с.
22. Бирюков С.В., Глуховева Е.Г. Способ измерения напряженности электрического поля. Патент 2733100 C1 РФ. Оpubл. 29.09.2020, Бюл. 28. URL: <https://patents.google.com/patent/RU2733100C1/ru>
23. 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.
24. Колмогорова С.С., Бирюков С.В. Проектирование электроиндукционных датчиков и средств измерений электрических полей. Санкт-Петербург: ООО "Реноме", 2022. 180 с.

**Омский государственный технический университет,  
Омск, Россия**

Контакты: Бирюков Сергей Владимирович,  
sbiryukov154@mail.ru

Материал поступил в редакцию 28.01.2024

## DUAL SPHERICAL ELECTRIC FIELD STRENGTH SENSORS WITH ATTACHABLE, COMPOSITE AND SEPARATE SENSITIVE ELEMENTS AND THEIR COMPARATIVE ANALYSIS

S. V. Biryukov

*Omsk State Technical University, Omsk, Russia*

Electric field strength sensors are an integral part of measuring instruments and systems. Their correct choice determines the creation of devices and systems with high metrological characteristics. This paper examines a comparative analysis of known dual electric field strength sensors with attachable, composite, and separate sensitive elements based on the phenomenon of electrostatic induction. The comparison involves the technological and design parameters of dual sensors and their metrological characteristics. The complexity of the sensor measuring devices is also compared. All the analyzed dual sensors have almost identical technological and design parameters. Dual sensors with attachable sensitive elements have little complexity in terms of technological and design parameters. Dual sensors with composite sensing elements have slightly complicated measuring working. The strong difference between the analyzed dual sensors can be seen in their metrological characteristics. It has been established that dual sensors with separate SEs of the second version have the best metrological characteristics. Such sensors provide an error due to field inhomogeneity not exceeding  $\delta = \pm 0.9\%$  and a maximum spatial measurement range of  $0 < a < 1$  with angular dimensions of the sensitive elements  $\theta_{11} = 35.6^\circ$ ,  $\theta_{21} = 90^\circ$ ,  $\theta_{12} = 0$ ,  $\theta_{22} = 35.5^\circ$ . Dual sensors with separate sensitive elements of the first design have an error not exceeding  $\delta = \pm 2\%$  and a maximum spatial measurement range of  $0 < a < 1$  with angular dimensions of the sensitive elements  $\theta_{11} = 40^\circ$ ,  $\theta_{21} = 90^\circ$ ,  $\theta_{12} = 0$ ,  $\theta_{22} = 35.5^\circ$ . Dual sensors with attachable SEs of the first design and with composite SE of the first design have almost identical parameters. Such sensors have a positive error due to field inhomogeneity not exceeding  $\delta = 4.6\%$  and a maximum spatial measurement range of  $0 < a < 0.92$ . The metrological superiority of dual sensors with separate sensitive elements of the second version over other analyzed dual sensors is noted; they, first of all, should be given preference in use.

*Keywords:* electric field, electric field strength, electric field strength sensor, dual sensor, comparative analysis, error due to field inhomogeneity

### REFERENCES

1. Prokhorov A.M., editor. [Gilbert William]. *Bol'shaya sovetskaya ehntsiklopediya: v 30 t. 3-e izd.* [Great Soviet Encyclopedia in 30 vol., 3rd ed.], Moscow, Sovetskaya ehntsiklopediya Publ., 1969. (In Russ.).
2. Lozhnikov V.Ya. [About classification of measuring transducers based on physical effects]. *Mezhvuzovskii sbornik nauchnykh trudov "Izmeritel'nye preobrazovateli"* [Interunivers. coll. of sci. proc. "Measuring transducers"], Omsk, OMPI Publ., 1975, pp. 146–161. (In Russ.).
3. Dyakov E.P., Lozhnikov V.Ya., Rozhkov N.F. [Measuring transducers of electric field strength of industrial frequency: Review]. *Mezhvuzovskii sbornik nauchnykh trudov "Izmeritel'nye preobrazovateli"* [Interunivers. coll. of sci. proc. "Measuring transducers"], Omsk: OMPI Publ., 1975, pp. 162–166. (In Russ.).
4. Des J., Pirrot P. [Calculation and measurement of electric field strength near high voltage devices]. Shkarin Yu.P., editor. *Trudy mezhdunarodnoi konferentsii po bol'shim ehlektricheskim sistemam (SIGREh-76) "Vliyaniye ehlektricheskoy vysokogo napryazheniya na okruzhayushchuyu sredyu"* [Proc. of the Int. Conf. on Large Electric Systems (CIGRE-76) "Environmental Impact of High Voltage Electrical Installations"], Transl. Moscow, Ehnergiya Publ., 1979, pp. 10–19. (In Russ.).
5. Lozhnikov V.Ya. [Digital meter of electric field strength of industrial frequency]. *Pribory i tekhnika eksperimenta* [Instruments and Experimental Techniques], 1981, vol. 24, no. 1, pp. 275. (In Russ.).
6. Gutmann S. [Double electric field meter with protection]. *Pribory dlya nauchnykh issledovaniy* [Instruments for scientific research], 1968, no. 1, pp. 45–49. (In Russ.).
7. Berent G.N., Place E.R. [Electric Field Sensor]. *Pribory dlya nauchnykh issledovaniy* [Instruments for scientific research], 1971, no. 6, pp. 141–142. (In Russ.).
8. Misakian M., Kotter F.R., Kahler R.L. Miniature ELF Electric Field Probe. *Rev. Sci. Instrum.*, 1978, vol. 49, no. 7, pp. 933–935. DOI: 10.1063/1.1135497
9. Biryukov S.V., Kaidanov F.G., Kats R.A., 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.
10. Biryukov S.V., Tyukina L.V., Dan'shina V.V. *Ustroystvo dlya izmereniya napryazhennosti ehlektricheskogo polya so sdvoennym datchikom. Patent RF no. 207465 U1* [De-

- vice for measuring electric field strength with dual sensor]. *Prioritet* 28.10.2021, Byul. 31. (In Russ.). URL: [https://yandex.ru/patents/doc/RU207465U1\\_20211028](https://yandex.ru/patents/doc/RU207465U1_20211028)
11. Biryukov S.V., Tyukina L.V. *Sdvoennyi datchik dlya izmereniya napryazhennosti ehlektricheskogo polya s nakladnymi chuvstvitel'nymi ehlementam. Patent RF no. 210427 U1* [Dual sensor for measuring electric field strength with clamp-on sensing elements]. *Prioritet* 15.04.2022, Byul. 11. (In Russ.). URL: [https://yandex.ru/patents/doc/RU210427U1\\_20220415](https://yandex.ru/patents/doc/RU210427U1_20220415)
  12. Biryukov S.V. [Investigation of a double spherical electric field strength sensor with overhead sensing elements]. *Pribory* [Instruments], 2022, no. 7 (265), pp. 28–36. URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=49450884> (In Russ.).
  13. Biryukov S.V., Tyukin A.V., Tyukina L.V. [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, pp. 86–93. (In Russ.). URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=48315805>
  14. Biryukov S.V., Tyukina L.V., Ehismont N.G. *Ustroistvo dlya izmereniya napryazhennosti ehlektricheskogo polya so sdvoennym datchikom. Patent RF no. 207464* [Device for measuring electric field strength with dual sensor]. *Prioritet* 28.10.2021, Byul. 31. (In Russ.). URL: [https://yandex.ru/patents/doc/RU207464U1\\_20211028](https://yandex.ru/patents/doc/RU207464U1_20211028)
  15. Biryukov S.V., Tyukina L.V. *Sdvoennyi datchik dlya izmereniya napryazhennosti ehlektricheskogo polya s sostavnymi chuvstvitel'nymi ehlementami. Patent RF no. 210806 U1* [Dual sensor for measuring electric field strength with composite sensing elements]. *Prioritet* 05.05.2022, Byul. 13. (In Russ.). URL: <https://patents.google.com/patent/RU210806U1/ru>
  16. Biryukov S.V., Tyukin A.V., Tyukina L.V. [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, pp. 113–123. (In Russ.). URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=49606560>
  17. Biryukov S.V., Tyukin A.V. *Sdvoennyi datchik dlya izmereniya napryazhennosti ehlektricheskogo polya. Patent RF no. 211166 U1* [Dual sensor for measuring the electric field strength]. *Prioritet* 24.05.2022, Byul. 15. (In Russ.). URL: <https://patents.google.com/patent/RU211166U1/ru>
  18. Biryukov S.V., Tyukin A.V. *Sposob izmereniya napryazhennosti ehlektricheskogo polya datchikom sdvoennogo tipa. Patent RF no. 211936 U1* [Method of measuring electric field strength by a dual-type sensor]. *Prioritet* 29.06.2022, Byul. 19. (In Russ.). URL: <https://patents.google.com/patent/RU211936U1/ru>
  19. Chernoutsan A. [Conducting ball in a homogeneous field]. *Kvant* [Quantum], 2001, no. 1, pp. 39–43. (In Russ.).
  20. Mirolubov N.N., Kostenko M.V., Levinshtein M.L., et al. *Metody rascheta ehlektricheskikh polei* [Methods of calculation of electric fields]. Moscow, Vysshaya shkola Publ., 1963. 415 p. (In Russ.).
  21. Gutnikov V.S. *Integral'naya ehlektronika v izmeritel'nykh ustroystvakh* [Integrated electronics in measuring devices]. Leningrad, Ehnergoatomizdat Publ., 1988. 304 p. (In Russ.).
  22. Biryukov S.V., Glukhoverya E.G. *Sposob izmereniya napryazhennosti ehlektricheskogo polya. Patent RF no. 2733100 C1* [Method of measuring electric field strength]. *Prioritet* 29.09.2020, Byul. 28. (In Russ.). URL: <https://patents.google.com/patent/RU2733100C1/ru>
  23. Biryukov S.V., Tyukina L.V. [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, pp. 64–72. (In Russ.).
  24. Kolmogorova S.S., Biryukov S.V. *Proektirovanie ehlektroinduktsionnykh datchikov i sredstv izmerenii ehlektricheskikh polei* [Design of electric induction sensors and electric field measuring instruments]. Saint Petersburg, OOO "Renome", 2022. 180 p. (In Russ.).

Contacts: *Biryukov Sergey Vladimirovich*,  
sbiryukov154@mail.ru

Article received by the editorial office on 28.01.2024

## INTRODUCTION

The paper considers new single-coordinate electric induction spherical sensors for electric field strength (EFS) measurement. Electric induction EFS sensors are based on the phenomenon of electrostatic induction, revealed and researched by William Hilbert (1544–1603) [1]. According to the classification proposed by professor V.Ya. Lozhnikov [2, 3], electric induction sensors belong to electric-electric sensors.

Let's highlight the basic concepts accompanying the well-known and new types of electric induction spherical sensors. Known sensor types include *single* and *double* sensors. The author attributed *dual* sensors to new types of sensors.

*Single* electric induction spherical sensors (SESS) [4, 5] have one conductive sensitive element (SE). It is located in isolation from the surface of the conductive body of the sensor, which is a sphere of radius  $R$  (Fig. 1). The thickness of the insulation layer  $l$  and SE  $\tau$  is of the order of 0.1 mm. The sensor is used to pick up the measuring signal from the surface of the sensor body. Due to the small values of  $l$  and  $\tau$  the sensors can be considered part of the spherical surface of the sensor body, and the sensor is a single conductive sphere (see Fig. 1, a).

Fig. 1. Components of electric induction spherical sensor of electric field strength.  
 a — sensor body; б — sensor body areas used as SE;  
 в — SE in the form of a spherical layer; г — SE in the form of a spherical segment ( $\theta_1 = 0$ ); д — SE in the form of a hemisphere ( $\theta_1 = 0$ )

The sensitive element can be a part of a spherical surface in the form of a spherical layer, the angular dimensions of which are given by angles  $\theta_1$  and  $\theta_2$  (see Fig. 1, в). Special cases of a spherical layer are a spherical segment set by angular dimensions  $\theta_1 = 0$  and  $\theta_2 < 90^\circ$  (see Fig. 1, г), and hemisphere set by angular dimensions  $\theta_1 = 0$  and  $\theta_2 = 90^\circ$  (refer to Fig. 1, д).

The presence of one SE allows one to record a single-phase signal from the SESS. In this regard, the sensor is prone to sinphase interference and aiming, leading to large errors when measuring uniform and inhomogeneous fields. Such sensors are rarely used, and their use for the reasons mentioned above is impractical.

*Double* electric induction spherical sensors (DESS) [6–9] consist of two SESSs located on the same coordinate axis and combined into a single whole. In this case, one SESS is located on the upper, and the other on the lower part of the hemisphere, i.e., diametrically opposite. Sensitive elements and spherical body of the

sensor are isolated from each other by a layer of dielectric. The presence of two diametrically opposite SEs allows one to record two single-phase signals from the DESS in opposite phases. This feature of DESS allows it to be included in the differential measuring circuit. Differential activation of the double sensor significantly increases its noise immunity and sensitivity, and also leads to a decrease in the measurement error of inhomogeneous fields to an error of the order of  $\pm 5\%$  [9].

*Dual* electric induction sensors DuESS [10–18] consist of two DESSs located on the same coordinate axis and combined into a single whole. A feature of the DuESS is that the double sensors included in the dual sensor must have opposite sign errors of the simultaneously measured one and the same EFS value.

According to the formation of SE and their design, DuESSs are divided into sensors with attachable [10–13], composite [13–16], and separate SE [13, 16–18]. The SE of the dual sensors are various combinations of the components of the EFS electric induction spherical sensor (see Fig. 1). The presence of such a variety of DuESSs with different SE designs requires their comparative analysis. In this regard, this work is devoted to EFS dual spherical sensors with attachable, composite, and separate sensors and their comparative analysis.

## PROBLEM STATEMENT

Carrying out a comparative analysis of three types of dual electric induction spherical EFS sensors requires solving the following problems:

- 1) develop a technology for manufacturing DuESS with attachable, composite and separate sensitive elements;
- 2) consider the features of the design of the DuESS with attachable, composite and separate sensitive elements;
- 3) evaluate the metrological characteristics of the DuESS with attachable, composite, and separate sensitive elements;
- 4) perform a comparative analysis of the DuESS with attachable, composite and separate sensitive elements according to their metrological characteristics;
- 5) rank the DuESS with attachable, composite, and separate sensitive elements according to their metrological characteristics, identify the sensor with the best metrological characteristics.

## MANUFACTURING TECHNIQUES

Dual sensors with attachable SEs are a layered system of conductors and dielectrics consisting of an alternation of the conducting surface (spherical body of the sensor) of the dielectric layer, the conducting sur-

face of SEs of the first double sensor, the dielectric layer and the conductive surface of the second double sensor. The conductive surfaces of the SEs of the first and second double sensors are made in the form of spherical segments with different angular dimensions  $\theta_2$  (see Fig. 1, r). The angular dimensions  $\theta_{21}$  of the SE of the first double sensor are close to  $90^\circ$ , and the angular dimensions  $\theta_{22}$  of the SEs of the second double sensor are close to  $45^\circ$  (the second digits in the designation of the angles  $\theta_{21}$  and  $\theta_{22}$  indicate the number of the double sensor). Dielectric layers and conductive SEs are deposited on the surface of the spherical body of the sensor by spraying. High conductivity materials are required to manufacture the sensor. Therefore, duralumin is used as the material of the spherical body of the sensor, subsequently undergoing oxidation. The oxide layer of duralumin is a dielectric. The SE material is copper. Thus, copper sensors of the first double sensor with a large angular dimension of  $\theta_{21}$  are first sprayed onto the oxidized surface of the spherical body of the sensor. Then a dielectric layer is sprayed over it. Then the copper sensors of the second double sensor with a smaller angular size of  $\theta_{22}$  are sprayed. The thickness of the dielectric layers and conductive SEs is about 0.1 mm, which is much less than the radius of the spherical body of the sensor. In this regard, the sensor can be considered a single conductive spherical surface. By and large, the sensor is a conductive sphere, and sensitive elements are needed to receive informative signals from various parts of the surface of the sphere.

Dual sensors with composite and separate SEs have the same design solution. The technology of their manufacture is similar to the technology of manufacturing dual sensors with attachable SEs. Unlike attachable sensing elements, composite and separate SEs are made of different shapes. So, for the first double sensor, the SE are made in the form of a spherical layer with different angular dimensions  $\theta_1$  and  $\theta_2$  (see Fig. 1, b), and for the second double sensor, the SEs are made in the form of a spherical segment with angular dimensions  $\theta_2$  (see Fig. 1, r). The angular dimensions of the SEs of the first  $\theta_1$  and second  $\theta_2$  double sensors are related as  $\theta_2 \leq \theta_1$ . In the manufacture of such sensors, copper SEs of the first double sensor are first sprayed onto the oxidized surface of the spherical body of the sensor with angular dimensions  $\theta_1$  and  $\theta_2$ , followed by a second double sensor with angular dimension  $\theta_2$ . For the reasons mentioned above, dual sensors with composite and separate SEs can be considered a single conductive sphere.

The difference between dual sensors with composite and separate SEs is a measuring design. In dual sensors with composite SEs, the second double sensor has SEs in the form of a spherical segment. The first double sensor has composite SEs consisting of a spherical segment and a spherical layer united by

a measuring unit. With this combination, the SEs are formed in the form of a hemisphere, and the dual sensor becomes adequate to the dual sensor with the attachable SEs. Dual sensors with separate SEs consist of two independent double sensors. The first double sensor has a SE in the form of a spherical layer, and the second — in the form of a spherical segment.

Dual sensors with attachable, composite and separate SEs have their own features. To clarify them, consider a brief theory of the construction of all varieties of DuESS. The theory of DuESS operation is based on the interaction of the conducting sphere with a homogeneous field [19] and an inhomogeneous field of the point source [20].

### DUAL SENSOR WITH ATTACHABLE SENSITIVE ELEMENTS

The dual electric induction spherical sensor with attachable sensors [10–13] consists of two independent double sensors integrated into a single whole, and a measuring device (Fig. 2).

**Fig. 2.** Dual electric field strength sensor with attachable SE.

1 — conductive spherical body; 2, 3 — sensing elements of the first double sensor; 4, 5 — sensing elements of the second double sensor; ДИТ 1, ДИТ 2 — differential current integrators; МП 1, МП 2 — scale converters;  $1/2\Sigma$  — adder dividing the sum by 2

The sensor includes a conductive spherical body 1 of radius  $R$ , two SEs 2 and 3, which are included in the first double sensor, two SEs 4 and 5, which are part of the second double sensor and a measuring device.

Sensitive elements 2, 3 and 4, 5 are made in the form of spherical segments with different angular dimensions  $\theta_2$ . So, the spherical segments of the first double sensor have an angular size of  $\theta_{21} \leq 90^\circ$  (close to the hemisphere), and the spherical segments of the second double sensor have an angular size of  $\theta_{22} \approx 45^\circ$ . Indices in the designation of angles  $\theta_{21}$  and  $\theta_{22}$ , which are in the first place, indicate the angle number (the first or second angle, see Fig. 1, b). Indices in second place in the designation of angles indicate belonging to the first or second double sensor. All SEs of the sensor are alternately superimposed (sprayed) through insulating layers onto the conducting surface of the spherical body and onto each other and are located on the same coordinate axis  $z$ .

The measuring device includes two differential current integrators (charge amplifiers) [21] ДИТ 1 and ДИТ 2, two scale converters МП 1 and МП 2, adder (with divider on 2)  $1/2\Sigma$ .



Differential current integrators are used to pick up the difference in charges from SEs 2, 3 and 4, 5, proportional to the EF strengths  $E_1(t)$  and  $E_2(t)$ . Scale converters are used to equalize the sensitivity of double sensors. The adder serves to find the average value (half sum) between  $E_1(t)$  and  $E_2(t)$ , which is taken as the measurement result and is the output signal of the dual sensor. Outputs of the measuring device are outputs of the first and second double sensors (ВЫХ. 1 and ВЫХ. 2) and dual sensor (ВЫХ.) (see Fig. 2).

Electric charges are induced in EF on spherical segments of double sensors —  $q_2(t)$  and  $q_3(t)$  on the first double sensor, and —  $q_4(t)$  and  $q_5(t)$  on the second one. Differences in these charges create information signals proportional to the electric field strength at a given point in space.

In a uniform field, the differential charge differences for the first and second double sensors are respectively

$$\begin{aligned} \Delta q_{23}(t) &= q_2(t) - q_3(t) = \\ &= 6k_1\pi\varepsilon\varepsilon_0 R^2 \sin^2 \theta_{21} \cdot E_0(t) = G_1 \cdot E_0(t), \quad (1) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \Delta q_{45}(t) &= q_4(t) - q_5(t) = \\ &= 6k_2\pi\varepsilon\varepsilon_0 R^2 \sin^2 \theta_{22} \cdot E_0(t) = G_2 \cdot E_0(t), \quad (2) \end{aligned}$$

where  $k_1 = 1$  and  $k_2 = \sin^2 \theta_{21} / \sin^2 \theta_{22}$  are the proportionality coefficients;  $\varepsilon$  is the dielectric medium permeability;  $\varepsilon_0 = 8.85 \cdot 10^{-12}$  F/m — electric constant;  $E_0(t)$  — EF strength at the measurement point before the sensor is inserted;  $G_1$  and  $G_2$  — sensitivity of the first and second double sensors. With the specified conversion factors  $k_1$  and  $k_2$ , sensitivity  $G_1 = G_2 = G$ . Equality of sensitivities is achieved in a homogeneous field using scale converters МП 1 and МП 2 (see Fig. 2).

In an inhomogeneous field of a point source, the differential charge differences for the first and the second double sensors are respectively equal to

$$\begin{aligned} \Delta q_{23}(t) &= q_2(t) - q_3(t) = \\ &= 6k_1\pi\varepsilon\varepsilon_0 R^2 \sin^2 \theta_{21} \cdot E_1(t) = G \cdot E_1(t), \quad (3) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \Delta q_{45}(t) &= q_4(t) - q_5(t) = \\ &= 6k_2\pi\varepsilon\varepsilon_0 R^2 \sin^2 \theta_{22} \cdot E_2(t) = G \cdot E_2(t), \quad (4) \end{aligned}$$

where

$$\begin{aligned} E_1(t) &= [1 + \delta(\theta_{21})] \cdot E_0(t) \quad \text{и} \\ E_2(t) &= [1 + \delta(\theta_{22})] \cdot E_0(t) \end{aligned} \quad (5)$$

of EF strength measured by double a sensor with an

error caused by non-uniformity of the field, the first and second double sensors at the measurement point;  $\delta(\theta_{21})$  and  $\delta(\theta_{22})$  — opposite in sign errors due to non-uniformity of the field of the first and second double sensors. Error  $\delta(\theta_{21})$  is negative, and error  $\delta(\theta_{22})$  is positive.

Errors  $\delta(\theta_{21})$  and  $\delta(\theta_{22})$  for double sensors in differential actuation are determined by the expression [9]

$$\delta(\theta_2) = \left[ \frac{1}{3a^2 \sin^2 \theta_2} \cdot \left( 2 - \frac{1-a^2}{\sqrt{1-2a \cos \theta_2 + a^2}} - \frac{1-a^2}{\sqrt{1+2a \cos \theta_2 + a^2}} \right) - 1 \right] \cdot 100, \quad (6)$$

where  $a = R / d$  — spatial measurement range varying within  $0 < a < 1$ ;  $R$  — radius of the spherical body of the sensor;  $d$  — distance from the center of the spherical body of the sensor to the field source.

Dual sensors are the basis for the implementation of the average measurement method [22, 23]. Therefore, the principle of operation of the dual sensor is to simultaneously measure two values of the strengths  $E_1(t)$  and  $E_2(t)$  (see expressions (5)) at one point in the field. These values have errors of opposite sign. Then the determination of their average value is carried out

$$E(t) = \frac{E_1(t) + E_2(t)}{2} = (1 + \delta) E_0(t), \quad (7)$$

where  $E(t)$  is the result of the measurement of EF strength obtained by the double sensor;

$$\delta = \frac{\delta(\theta_{21}) + \delta(\theta_{22})}{2} \quad (8)$$

error of measurement  $E(t)$  caused by field heterogeneity.

Expressions (6) and (8) establish the relationship between the error  $\delta$ , the angular dimensions  $\theta_{21}$  and  $\theta_{22}$  of the SEs 2, 3 and 4, 5, and the linear dimensions  $R$  of the dual sensor. This relationship can be the basis for building a mathematical model of a dual sensor with the attachable SEs.

Dual sensor mathematical model with attachable SE is described by expressions (6) and (8). The model allows us to estimate the error of two versions of the design of known dual sensors [10, 11]. The first version of the dual sensor has angular dimensions of SE  $\theta_{11} = 0$ ,  $\theta_{21} = 90^\circ$  and  $\theta_{12} = 0$ ,  $\theta_{22} = 45^\circ$  [10], and the second —  $\theta_{11} = 0$ ,  $\theta_{21} = 90^\circ$  and  $\theta_{12} = 0$ ,  $\theta_{22} = 47^\circ$  [11].

The result of mathematical modeling was the determination of the best angular dimensions of the SEs of double sensors. With these angular dimensions of the SE, the dual sensor will have a smaller error and a larger spatial measurement range.

Taking into account the above, errors  $\delta$  of the dual sensor were found for the first [10] and second [11] versions of their design. Graphs of errors  $\delta_1$  and  $\delta_2$  depending on the spatial range of measurement  $a$  are presented in Fig. 3. Indices 1 and 2 in the error notation  $\delta_1$  and  $\delta_2$  indicate that they belong to the first or second version of the dual sensors.

**Fig. 3.** Graphs of changes in error in the spatial range  $a$  of the first [10] and second [11] versions of dual sensors.

$\delta$  — error of the double sensor due to field heterogeneity;  $a = R / d$  — spatial measurement range;  $R$  — radius of the spherical body of the sensor;  $d$  — distance from the center of the spherical body of the sensor to the field source

From the graphs (Fig. 3), it follows that the dual sensor of the first variant has a positive error (with a maximum of  $\delta = +4.6\%$ ) in the entire spatial measurement range  $0 < a < 1$  ( $d > R$ ), and of the second variant — an error in the limits of  $\delta = \pm 2.1\%$  and a slightly limited spatial measurement range  $0 < a < 0.92$  ( $d \geq 1.1 R$ ).

#### DUAL SENSOR WITH COMPOSITE SENSITIVE ELEMENTS

The dual electric induction spherical sensor with composite SEs [13–16] consists of a conducting spherical body 1 of radius  $R$ , two pairs of sensitive electrodes 2, 3 and 4, 5, combined into a single whole, and a measuring device (Fig. 4).

**Fig. 4.** Dual electric field strength sensor with composite SE.

1 — conductive spherical body; 2, 3 — sensitive elements in the form of spherical layers; 4, 5 — sensitive elements in the form of spherical segments; ДИТ 1, ДИТ 2 — differential current integrators; МП 1, МП 2 — scale converters;  $\Sigma 1$  — adder;  $1/2\Sigma$  — adder dividing the sum by 2

The first pair of sensitive electrodes 2, 3 is made in the form of spherical layers with angular dimensions  $\theta_{11}$  and  $\theta_{21}$  (see Fig. 1, в), and the second pair of sensitive electrodes 4, 5 is made in the form of spherical segments with angular dimensions  $\theta_{12} = 0$  and  $\theta_{22}$  (see Fig. 1, г).

Thus, the spherical layers of the first pair of sensitive electrodes have angular dimensions  $\theta_{11}$  and  $\theta_{21} \leq 90^\circ$  (close to the hemisphere), and the spherical segments of the second pair of sensing electrodes have an angular dimension of  $\theta_{22} \approx \theta_{11}$ . The centers of pairs

of sensitive electrodes are located on one coordinate axis  $z$ .

Sensitive electrodes 2, 3 and 4, 5 form sensitive elements of two double sensors. The first double sensor has composite FE consisting of sensitive electrodes 2 + 4 and 3 + 5, and the second double sensor has its sensitive electrodes 4, 5. The whole system of sensitive electrodes 2, ..., 5 and conducting spherical body 1 represents a single spherical surface. Sensitive electrodes 2, 4 and 3, 5 are combined in pairs through a measuring device (see Fig. 4).

The measuring device consists of two differential current integrators ДИТ 1 and ДИТ 2, two scale converters МП 1 and МП 2, adder  $\Sigma 1$ , and adder  $1/2\Sigma$ . Adder  $\Sigma 1$  serves to combine signals from the first and second double sensors. The formation of composite SEs in the form of the hemisphere of the first double sensor is provided. ДИТ 1, ДИТ 2 and adder  $1/2\Sigma$  have the same purposes as in Fig. 2. Outputs of the measuring device are outputs of the first and second double sensors (вых.1 and вых. 2) and dual sensor (вых.) (see Fig. 4).

When the dual sensor is placed in the EF, electric charges will be induced on its sensitive electrodes 2, 3 and 4, 5: on the first pair 2, 3 —  $q_2(t)$  and  $q_3(t)$ , and on the second pair 4, 5 —  $q_4(t)$  and  $q_5(t)$ .

In a uniform field, the differential charge differences between the first 2, 3 and second 4, 5 pairs of sensing electrodes will be respectively equal to:

$$\begin{aligned} \Delta q_{23}(t) &= q_2(t) - q_3(t) = \\ &= 6k_3\pi\epsilon\epsilon_0 R^2 \sin(\theta_{12} - \theta_{11}) \cdot \sin(\theta_{12} + \theta_{11}) \cdot E_0(t) = \\ &= G_3 \cdot E_0(t), \end{aligned} \quad (9)$$

$$\begin{aligned} \Delta q_{45}(t) &= q_4(t) - q_5(t) = \\ &= 6k_2\pi\epsilon\epsilon_0 R^2 \sin^2 \theta_{22} \cdot E_0(t) = G_2 \cdot E_0(t). \end{aligned} \quad (10)$$

For composite SE consisting of sensitive electrodes 2 + 4 and 3 + 5, the differential difference of electric charges is determined by:

$$\begin{aligned} \Delta q_{2-5}(t) &= [q_2(t) + q_4(t)] - [q_3(t) + q_5(t)] = \\ &= 6k_4\pi\epsilon\epsilon_0 R^2 \times \\ &\times [\sin(\theta_{21} - \theta_{11}) \cdot \sin(\theta_{21} + \theta_{11}) + \sin^2 \theta_{22}] \cdot E_0(t) = \\ &= G_4 \cdot E_0(t). \end{aligned} \quad (11)$$

If  $\theta_{22} = \theta_{11}$  the proportionality coefficients become equal, i.e.  $k_4 = k_1$ , and the expression (11) is converted into the expression

$$\Delta q_{2-5}(t) = 6k_1\pi\epsilon\epsilon_0 R^2 \sin^2 \theta_{21} \cdot E_0(t), \quad (12)$$

corresponding to the expression of a double sensor

with SE made in the form of a hemisphere (see expression (3)). All numeric parameters included in expressions (9)–(12) correspond to the parameters of expressions (1) and (2).

In an inhomogeneous field of point source, the differential differences of charges between the first (2, 3) and second (4, 5) pairs of sensitive electrodes will be respectively equal to:

$$\begin{aligned} \Delta q_{23}(t) &= q_2(t) - q_3(t) = \\ &= 6k_3 \pi \varepsilon \varepsilon_0 R^2 \sin(\theta_{21} - \theta_{11}) \cdot \sin(\theta_{21} + \theta_{11}) \cdot E_1'(t) = \\ &= G_3 \cdot E_1'(t), \end{aligned} \quad (13)$$

$$\begin{aligned} \Delta q_{45}(t) &= q_4(t) - q_5(t) = \\ &= 6k_2 \pi \varepsilon \varepsilon_0 R^2 \sin^2 \theta_{22} \cdot E_2(t) = G_2 \cdot E_2(t). \end{aligned} \quad (14)$$

Then, on the composite SEs 2 + 4 and 3 + 5 of the first double sensor, the differential charge difference is determined by the expression

$$\begin{aligned} \Delta q_{2-5}(t) &= \Delta q_{23}(t) + q_{45}(t) = \\ &= 6\pi \varepsilon \varepsilon_0 R^2 \times \\ &\times \left[ \sin(\theta_{21} - \theta_{11}) \cdot \sin(\theta_{21} + \theta_{11}) + \sin^2 \theta_{22} \right] \cdot E_1(t). \end{aligned} \quad (15)$$

For composite SEs 2 + 4 and 3 + 5 having the shape of hemispheres  $\theta_{11} = \theta_{22}$ . Then, after transforming the expression (15), we get

$$\Delta q_{2-5}(t) = 6\pi \varepsilon \varepsilon_0 R^2 \cdot \sin^2 \theta_{21} \cdot E_1(t). \quad (16)$$

In expressions (13)–(16)

$$\begin{aligned} E_1'(t) &= [1 + \delta(\theta_{11}, \theta_{21})] \cdot E_0(t), \\ E_1(t) &= [1 + \delta_2(\theta_{21})] \cdot E_0(t), \\ E_2(t) &= [1 + \delta_1(\theta_{22})] \cdot E_0(t) \end{aligned} \quad (17)$$

EF strengths were measured by sensitive electrodes (2, 3), (4, 5) and composite SEs 2 + 4 and 3 + 5, respectively, with errors  $\delta(\theta_{11}, \theta_{21})$ ,  $\delta_1(\theta_{22})$  and  $\delta_2(\theta_{21})$ , respectively. Error  $\delta_1(\theta_{22})$  is positive, and errors  $\delta_2(\theta_{21})$  and  $\delta(\theta_{21}, \theta_{21})$  are negative. The specified errors for SE in the form of spherical layer, spherical segment, and composite SEs are determined by the corresponding expressions:

---

– for spherical layer [24]

$$\delta(\theta_{11}, \theta_{21}) = \left[ \frac{1 - a^2}{3a^2 \sin(\theta_{21} - \theta_{11}) \sin(\theta_{21} + \theta_{11})} \times \left( \frac{1}{\sqrt{1 - 2a \cos \theta_{11} + a^2}} + \frac{1}{\sqrt{1 + 2a \cos \theta_{11} + a^2}} \right) - \left( \frac{1}{\sqrt{1 - 2a \cos \theta_{21} + a^2}} - \frac{1}{\sqrt{1 + 2a \cos \theta_{21} + a^2}} \right) - 1 \right] \cdot 100; \quad (18)$$

– for spherical segment [9]  $\delta(\theta_{22})$  is determined by expression (6) when  $\theta_2 = \theta_{22} \geq 45^\circ$  is substituted into it

$$\delta_1(\theta_{22}) = \left[ \frac{1}{3a^2 \sin^2 \theta_{22}} \cdot \left( 2 - \frac{1 - a^2}{\sqrt{1 - 2a \cos \theta_{22} + a^2}} - \frac{1 - a^2}{\sqrt{1 + 2a \cos \theta_{22} + a^2}} \right) - 1 \right] \cdot 100; \quad (19)$$

– for a composite SE, if the condition  $\theta_{22} = \theta_{11}$  is met, the error  $\delta_2(\theta_{21})$  is determined by the expression (19), after substituting  $\theta_{21}$  into it.

---

Thus, dual sensors with composite SEs, in the case of a simplified design and technological implementation but the same operating conditions, have the same errors as dual sensors with attachable SEs. So, a dual sensor with composite sensors, and angular dimensions of SEs  $\theta_{11} = 45^\circ$ ,  $\theta_{21} = 90^\circ$  and  $\theta_{22} = 45^\circ$  [14] corresponds to the errors of a dual sensor with attachable SEs, the angular dimensions of which for the first double sensor are  $\theta_{11} = 0^\circ$ ,  $\theta_{21} = 90^\circ$ , and for the second one are  $\theta_{12} = 0^\circ$ ,  $\theta_{22} = 45^\circ$  [10]. A dual sensor with angular dimensions of sensitive elements  $\theta_{11} = 47^\circ$ ,  $\theta_{21} = 90^\circ$  and  $\theta_{22} = 47^\circ$  [15] corresponds to the errors of a dual sensor with attachable SEs with angular dimensions  $\theta_{11} = 0^\circ$ ,  $\theta_{21} = 90^\circ$  and  $\theta_{22} = 47^\circ$  [11].

The graphs of variation of errors due to field inhomogeneity in the spatial measurement range for the first [14] and second [15] versions of construction of dual sensors with composite sensitive elements coincide with the graphs given in Fig. 3.

### DUAL SENSOR WITH SEPARATE SENSITIVE ELEMENTS

The dual electric induction spherical sensor with separate SE [17, 18] consists of a conducting spherical body 1 of radius  $R$ , two pairs of SEs 2, 3 and 4, 5, which are a single spherical surface, and a measuring device (Fig. 5).

**Fig. 5.** Dual electric field strength sensor with separate SE.

1 — conductive spherical body; 2, 3 — sensitive elements in the form of spherical layers; 4, 5 — sensitive elements in the form of spherical segments; ДИТ 1, ДИТ 2 — differential current integrators; МП 1, МП 2 — scale converters;  $1/2\Sigma$  — adder dividing the sum by 2

The dual sensor under consideration is similar to the dual sensor with composite SEs, and its measuring device is similar to the measuring device of the dual sensor with attachable SEs.

In this regard, in EF, the differential charge differences between the first 2, 3 and second 4, 5 pairs of sensitive electrodes of the double sensors are respectively determined

– in a homogeneous field by expressions (9) and (10);

– in a non-uniform field of point source by expressions (13) and (14).

The values of the strengths  $E_0(t)$ ,  $E'_1(t) = E_1(t)$  and  $E_2(t)$  in expressions (9), (10) and (13), (14), are the strengths respectively measured by the dual sensor in a uniform and in a heterogeneous field. The value  $E_0(t)$  in a homogeneous field is measured by double

sensors without error, and the values  $E_1(t)$  and  $E_2(t)$  — by the same sensors with opposite-sign errors  $\delta(\theta_{11}, \theta_{21})$  and  $\delta_1(\theta_{22})$ , determined by expressions (18) and (19), respectively.

Then the measurement result of the dual sensor with separate SEs is determined by the expression (7), and its error is

$$\delta = \frac{\delta(\theta_{11}, \theta_{21}) + \delta(\theta_{22})}{2}. \quad (20)$$

Based on the obtained relationship between parameters of the dual sensor with separate SEs, a mathematical model thereof was compiled, and mathematical modelling was carried out to determine the optimum angular dimensions of the sensor with minimum error and maximum spatial measurement range.

The dual sensor mathematical model with separate SEs consists of expressions (18)–(20). The model allows us to estimate the error of two versions of the design of known dual sensors [17, 18]. The first version of the dual sensor has angular dimensions of SE  $\theta_{11} = 40^\circ$ ,  $\theta_{21} = 90^\circ$  and  $\theta_{12} = 0^\circ$ ,  $\theta_{22} = 35^\circ$  [17], and the second —  $\theta_{11} = 35.6^\circ$ ,  $\theta_{21} = 90^\circ$  and  $\theta_{12} = 0^\circ$ ,  $\theta_{22} = 35.5^\circ$  [18].

The results of modeling as a graph of the dependence of the error  $\delta$  on the spatial range of measurements  $a$  for the first and second versions of the design of dual sensors are presented in Fig. 6.

**Fig. 6.** Graphs of changes in error in the spatial range  $a$  of the first [17] and second [18] versions of dual sensors.

$\delta$  — error of a dual sensor due to field inhomogeneity;  $a = R / d$  — spatial measurement range;  $R$  — radius of the spherical body of the sensor;  $d$  — distance from the center of the spherical body of the sensor to the field source

From the graphs (see Fig. 6), it follows that the dual sensor of the first option has an error of  $\delta = \pm 2\%$ , and of the second option — an error of  $\delta = \pm 0.86\%$  in the same maximum spatial measurement range of  $0 < a < 1$  ( $d > R$ ).

### COMPARATIVE ANALYSIS

We will conduct a comparative analysis of the dual sensors with attachable [10, 11], composite [14, 15] and separate [17, 18] SEs, as considered above. Manufacturing technology, design concept and parameters, metrological characteristics of dual sensors, and complexity of the measuring device are selected as comparison elements.

The manufacturing technology of the compared sensors consists of the manufacture of a conductive

spherical body of the sensor and spraying an alternating sequence of dielectric and conductor on it. Common elements of sensor manufacturing are processes of spherical body manufacturing and successive spraying of dielectric and conductor on it. The difference in the technology of manufacturing sensors lies in the number of dielectric and conductor layers applied by spraying onto the conductive surface of a spherical body. The maximum number of layers deposited by spraying has a sensor with attachable SEs. Sensors with composite and separate SEs have two layers less. Therefore, they are more technological in manufacture, and they should be given preference.

Compared sensors differ from each other in design concept. The sensor with attachable SEs has the greatest difference. The structural parts of sensors with composite and separate SEs are similar. The difference is only in the angular dimensions of the SEs.

The design parameters ( $\theta_{11}$ ,  $\theta_{21}$ ,  $\theta_{12}$ ,  $\theta_{22}$  and  $R$ ) of the sensors depend on their usage, the desired spatial range of measurements, and metrological characteristics. In this regard, all compared sensors are equivalent.

When comparing the complexity of measuring design of dual sensors with attachable (see Fig. 2), composite (see Fig. 4) and separate (see Fig. 5) SEs, in terms of the number of measuring transducers, the measuring design of a sensor with composite SEs is the most difficult. However, this complexity is insignificant.

Metrological characteristics of compared sensors can be attributed to additional error due to EF heterogeneity  $\delta$  and spatial measurement range  $a$ . According to these characteristics, their main differences are observed.

To identify these differences, compare results obtained in the article for dual sensors with attachable, composite and separate SEs shown in Figs. 3 and 6.

Fig. 3 and Fig. 6 show the graphical dependences of the errors  $\delta(a)$  of the dual sensors in spatial measurement range  $a$  for two versions of each sensor.

Error plots presented in Fig. 3, refer to two types of dual sensors — sensors with attachable and composite SE. Fig. 6 shows error graphs related to one type of dual sensors — sensors with separate SEs. Sensors of the first and second versions (Fig. 3 and Fig. 6) differ only in the angular dimensions of their SEs.

So, dual sensors of the first variant (see Fig. 3):

- with attachable SEs: have angular dimensions  $\theta_{11} = 0$ ,  $\theta_{21} = 90^\circ$ ,  $\theta_{12} = 0$ ,  $\theta_{22} = 45^\circ$ ;
- with composite SEs: have angular dimensions  $\theta_{11} = 45^\circ$ ,  $\theta_{21} = 90^\circ$ ,  $\theta_{12} = 0$ ,  $\theta_{22} = 45^\circ$ .

The errors of these sensors do not exceed  $\delta = +4.6\%$  in the full spatial measurement range  $0 < a < 1$  ( $d > R$ ).

Dual sensors of the second variant (see Fig. 3):

- with attachable SEs: have angular dimensions  $\theta_{11} = 0$ ,  $\theta_{21} = 90^\circ$ ,  $\theta_{12} = 0$ ,  $\theta_{22} = 47^\circ$ ;
- with composite SEs: have angular dimensions  $\theta_{11} = 47^\circ$ ,  $\theta_{21} = 90^\circ$ ,  $\theta_{12} = 0$ ,  $\theta_{22} = 47^\circ$ .

The errors of these sensors do not exceed  $\delta = \pm 2.1\%$  in the spatial measurement range  $0 < a < 0.92$  ( $d > 1.1R$ ).

Dual sensors of the first variant (see Fig. 6) with separate SEs have angular dimensions:

$$\theta_{11} = 40^\circ, \theta_{21} = 90^\circ, \theta_{12} = 0, \theta_{22} = 35^\circ.$$

The errors of the sensors of this variant do not exceed  $\delta = \pm 2\%$  in the full spatial measurement range  $0 < a < 1$  ( $d > R$ ).

Dual sensors of the second variant (see Fig. 6) with separate SE have angular dimensions:

$$\theta_{11} = 35.6^\circ, \theta_{21} = 90^\circ, \theta_{12} = 0, \theta_{22} = 35.5^\circ.$$

The errors of these sensors do not exceed  $\delta = \pm 0.9\%$  in the full spatial measurement range  $0 < a < 1$  ( $d > R$ ).

The results of the comparison of the dual sensors are shown in Table.

**Tab.** Results of comparison of dual sensor

Thus, a comparative analysis of dual sensors with attachable, composite, and separate SEs showed that, in terms of the most compared elements, dual sensors with separate SEs have significant advantages over the other two.

## RESULTS OF THE STUDY

In the presented article, a comparative analysis of dual spherical sensors of EF strength with attachable, composite, and separate SEs according to manufacturing technology, design concept, design parameters, complexity of the measuring device, and metrological characteristics.

As a result of the analysis:

1) it was found that, according to the manufacturing technology and design concept, dual spherical sensors with attachable SEs are more complex than dual sensors with composite and separate SEs;

2) It has been established that while the measuring devices of dual sensors are practically equivalent, a dual sensor with composite SEs has more complex measuring design;

3) it is shown that, in terms of design parameters, all versions of dual sensors are suitable for usage;

4) it was found that the second version of the dual sensor with separate SEs has the best metrological characteristics.

Thus, the results of the comparative analysis of the dual sensors made it possible to rank them according to their ease of implementation and their metrological characteristics.

The best technical solution includes a dual sensor with separate SEs of the second version. Such a dual sensor has an error due to field inhomogeneity not exceeding  $\delta = \pm 0.9\%$ , a maximum spatial measurement range of  $0 < a < 1$  with angular dimensions of SE  $\theta_{11} = 35.6^\circ$ ,  $\theta_{21} = 90^\circ$ ,  $\theta_{12} = 0$ ,  $\theta_{22} = 35.5^\circ$ .

The second technical solution includes dual sensors of three varieties. These are dual sensors with attachable SEs of the second version, composite SEs of the second version, and separate SEs of the first version. The best characteristics of them have dual sensors with separate SE. They have an error from field heterogeneity not exceeding  $\delta = \pm 2\%$  and a maximum spatial measurement range of  $0 < a < 1$  with angular dimensions of SE  $\theta_{11} = 40^\circ$ ,  $\theta_{21} = 90^\circ$ ,  $\theta_{12} = 0$ ,  $\theta_{22} = 35.5^\circ$ .

The third technical solution includes dual sensors with attachable elements of the first version and composite elements of the first version. The sensors have almost the same parameters. However, a dual sensor with composite SEs should be distinguished by the simplicity of technological and constructive design. Such sensors have a positive error from field heterogeneity not exceeding  $\delta = +4.6\%$ , and a maximum spatial measurement range of  $0 < a < 0.92$ .

## CONCLUSION

A comparative analysis of dual sensors with attachable, composite, and separate SEs led to the conclusion that it is advisable to use dual sensors with separate SEs of the second variant in devices for measuring electric field strength. Such sensors have significant advantages in all parameters and metrological characteristics over other types of dual sensors.

In conclusion, we note that dual sensors are promising devices that can significantly reduce the error in measuring the strength of an inhomogeneous EF and expand the spatial measurement range.