

# ЭЛЕКТРОНИКА, ФОТОНИКА, ПРИБОРОСТРОЕНИЕ И СВЯЗЬ

УДК 621.317  
DOI: 10.25206/1813-8225-2024-191-125-132  
EDN: IXQSUI

С. В. БИРЮКОВ

Омский государственный  
технический университет,  
г. Омск

## СРАВНИТЕЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ДВОЙНОГО И СДВОЕННОГО ЭЛЕКТРОИНДУКЦИОННЫХ СФЕРИЧЕСКИХ ДАТЧИКОВ НАПРЯЖЕННОСТИ ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ПОЛЯ

В работе проводится сравнительное исследование двойных и сдвоенных датчиков напряженности электрического поля. В сравнении рассматривались конструктивные, технологические и метрологические параметры датчиков, а также сложность их измерительных цепей. Исследования выявили схожесть конструктивных и технологических параметров датчиков и отличие по метрологическим характеристикам и по сложности измерительных цепей.

По метрологическим характеристикам сдвоенные датчики значительно превосходят двойные. Установлено, что сдвоенный датчик, имеющий чувствительные элементы с угловыми размерами  $\theta_1=46,38^\circ$  и  $\theta_2=90^\circ$ , обладает меньшей погрешностью от неоднородности поля. Погрешность не превышает  $\delta \leq \pm 2,76\%$  в пространственном диапазоне измерений  $0 \leq a \leq 1$ . При той же погрешности двойные датчики можно использовать только в ограниченном пространственном диапазоне измерения  $0 \leq a \leq 0,89$ . Показано, что сдвоенные датчики по метрологическим параметрам превосходят двойные датчики. Это говорит о целесообразности их использования.

**Ключевые слова:** напряженность электрического поля, датчик электрического поля, двойной датчик, сдвоенный датчик, погрешность измерения, расстояние до источника поля.

**Введение.** Датчики напряженности электрического поля электроиндукционного типа из-за своей простоты получили широкое распространение в области измерения низкочастотных электриче-

ских полей (ЭП) вплоть до 1 МГц [1]. Такие датчики, например, могут быть использованы для построения приборов, выявляющих особенности воздействия ЭП промышленной частоты с техни-

ческими объектами и с живыми организмами [2]. Поля промышленной частоты самые распространённые техногенные поля. Техногенные поля создаются электросетями, высоковольтными линиями электропередач (ЛЭП), электрическими подстанциями (ПС), высоковольтными энергетическими установками. В 1972 г. были установлены [3] факты неблагоприятного воздействия ЭП на человека. Для этого использовались приборы, имеющие одинарные [4, 5] и двойные [6–9] датчики. Практика показала, что одинарные датчики обладают низкой, а двойные датчики высокой помехозащищённостью. Вследствие этого одинарные датчики имеют высокую погрешность, достигающую 40 %, а двойные датчики обладают средней погрешностью порядка 5 %. Отмеченные погрешности датчиков не позволяют достаточно полно установить механизм воздействия ЭП на человека. Поэтому требуется повышение точности измерения напряжённости ЭП. Повысить точность измерений напряжённости поля можно, повышая точность датчика и метода измерений. Повышение точности электроиндукционных датчиков достигло предела. Следовательно, необходим новый метод измерения. И такой метод был предложен в работах [10, 11]. Он получил название «метод измерения по среднему значению». Новый метод привел к необходимости создания сдвоенных датчиков напряжённости ЭП. В связи с этим возникла необходимость проведения сравнительного исследования двойных и сдвоенных датчиков.

**Постановка задачи.** Провести исследования двойных и сдвоенных датчиков напряжённости ЭП и установить их достоинства и недостатки. Для этого необходимы решения ряда задач, к которым можно отнести:

1) установить влияние на метрологические характеристики двойных и сдвоенных датчиков их электрических, технологических и конструктивных параметров;

2) сделать оценку двойных и сдвоенных датчиков по электрическим, технологическим и конструктивным параметрам;

3) сравнить двойные и сдвоенные датчики по электрическим, технологическим и конструктивным параметрам и выбрать датчики с лучшими метрологическими характеристиками.

**Теория.** Электроиндукционные датчики напряжённости ЭП основаны на явлении электростатической индукции. Такие датчики способны работать в электростатических и квазистатических полях, относящихся к области низких частот. Явление электростатической индукции сводится к перераспределению электрических зарядов на изолированном проводящем теле датчика при внесении его в ЭП. В результате перераспределения зарядов часть тела датчика становится заряженной положительными, а часть — отрицательными зарядами, разделенными плоскостью электрической нейтралити. Заряды, индуцированные ЭП на поверхности датчика, приводят к искажению исходного поля. Эти искажения поля можно условно разделить на два типа: геометрические и электрические [12].

Первый тип искажений обусловлен геометрией проводящего тела датчика, его размерами, материалами изготовления и положением в ЭП.

Второй тип искажений электрический. Такие искажения возникают при использовании между датчиком и измерительным устройством проводного канала связи. Это приводит к появлению

на датчике не скомпенсированного заряда  $Q_A$  [12]. Согласно теореме Гаусса, этот заряд будет создавать дополнительный векторный поток напряжённости электрического поля (НЭП)

$$\Phi = \oint_{S_A} \vec{E}_n d\vec{S} = \oint_{S_A} \vec{E} d\vec{S} = \frac{1}{\varepsilon} Q_A.$$

Поскольку поток вектора НЭП  $\Phi \neq 0$ , то это приводит к электрическим искажениям, вызывающим наибольшие проблемы и недостоверные измерения.

В связи со сказанным выработаем два требования к датчикам, работающим в условиях геометрических и электрических искажений:

1) полезный сигнал датчика должен определяться полем потока  $\Phi_E$  вектора НЭП;

2) поток  $\Phi_E$  вектора НЭП через замкнутую поверхность датчика  $S_A$  должен быть равен нулю

$$\oint_{S_A} \vec{E} d\vec{S} = \sum_q \Phi_E = 0. \quad (1)$$

Эти требования определяют минимально возможное число чувствительных элементов (ЧЭ) датчика, равное двум, поскольку  $\Phi_1 + \Phi_2 = 0$ . Это указывает на то, что один ЧЭ должен «принимать», а другой — «отдавать» поток  $\Phi_E$  вектора НЭП. В связи с этим предпочтение следует отдавать двойным датчикам.

**Двойной сферический датчик.** Двойной сферический датчик (ДД) состоит из двух датчиков одинарного типа (рис. 1). Конструктивно ДД представляет проводящее сферическое основание 1 радиуса  $R$ . Для снятия с определенных частей проводящей поверхности датчика электрических сигналов на её поверхности выделяются ЧЭ 2 и 3 так, чтобы они были диаметрально противоположны и располагались на одной координатной оси. ЧЭ 2 и 3 представляют собой части сферической поверхности, ограниченные окружностями, и являются сферическими сегментами с угловым размером  $\theta_0$ . Угол  $\theta_0$  ограничен двумя лучами, выходящими из центра сферического основания и проходящими один через центр сферического сегмента, а второй через его край. Угловой размер  $\theta_0$  может изменяться в пределах  $0 < \theta_0 \leq 90^\circ$ . Если  $\theta_0 < 90^\circ$ , то ЧЭ представляет собой сферический сегмент с угловым размером  $\theta_1 < 90^\circ$ , если же  $\theta_0 = 90^\circ$ , то ЧЭ превращается в полусферу с угловым размером  $\theta_2 = 90^\circ$  [8]. При внесении двойного датчика в ЭП и ориентации его координатной оси по направлению поля на ЧЭ 2

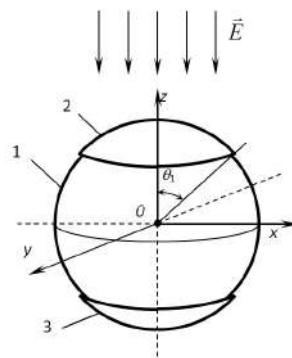
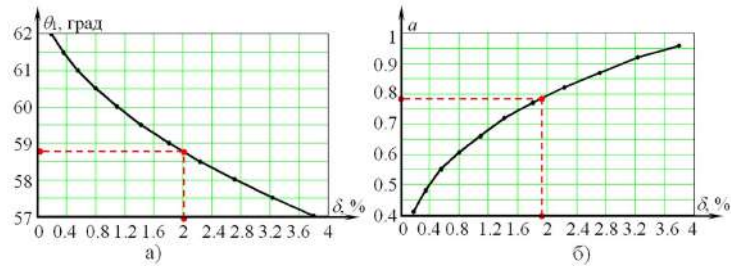


Рис. 1. Сферический датчик электрического поля двойного типа в однокоординатном исполнении

Результаты исследования двойного датчика

|                    | 1                    | 2                     | 3                    | 4                    | 5                    | 6                    |
|--------------------|----------------------|-----------------------|----------------------|----------------------|----------------------|----------------------|
| $\theta_1$ , град. | 57                   | 57,5                  | 58                   | 58,5                 | 59                   | 59,5                 |
| $\delta$ , %       | $\pm 3,796$          | $\pm 3,229$           | $\pm 2,71$           | $\pm 2,231$          | $\pm 1,807$          | $\pm 1,42$           |
| $a$                | $0 \leq a \leq 0,96$ | $0 \leq a \leq 0,92$  | $0 \leq a \leq 0,87$ | $0 \leq a \leq 0,82$ | $0 \leq a \leq 0,77$ | $0 \leq a \leq 0,72$ |
|                    | 7                    | 8                     | 9                    | 10                   | 11                   |                      |
| $\theta_1$ , град. | 60                   | 60,5                  | 61                   | 61,5                 | 62                   |                      |
| $\delta$ , %       | $\pm 1,088$          | $\pm 0,796$           | $\pm 0,549$          | $\pm 0,348$          | $\pm 0,192$          |                      |
| $a$                | $0 \leq a \leq 0,66$ | $0 \leq a \leq 0,605$ | $0 \leq a \leq 0,55$ | $0 \leq a \leq 0,48$ | $0 \leq a \leq 0,41$ |                      |

Рис. 2. Графики зависимости: а) зависимость  $\theta_1(\delta)$ ; б) зависимость  $a(\delta)$ 

первого и 3 второго одинарных датчиков, индуцируются электрические заряды  $q_2(t)$  и  $q_3(t)$ . Дифференциальный заряд, снятый с ЧЭ 2 и 3, будет равен [13]

$$\Delta q_{23}(t) = q_2(t) - q_3(t) = -6\pi\epsilon\epsilon_0 R^2 \sin^2 \theta_1 \cdot [1 + \delta(\theta_1)] \cdot E(t), \quad (2)$$

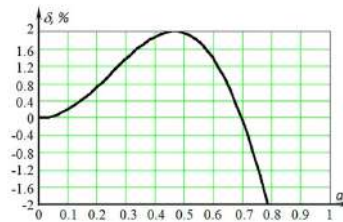
где  $\delta(\theta_1)$  — суммарная погрешность от неоднородности поля для двойного датчика в дифференциальном включении определяется выражением [9]

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

где параметр  $a = R/d$  — пространственный диапазон измерения, изменяющийся в пределах  $0 < a < 1$ ;  $R$  — радиус сферического основания 1 датчика;  $d$  — расстояние от центра сферического основания датчика до источника поля [9]. С помощью параметра  $a$  можно изменять степень неоднородности поля. Так, например, при  $a \rightarrow 0$  и  $a \rightarrow 1$  поле приближается к однородному и сильно неоднородному полю соответственно.

Анализ выражения (2) позволяет заключить, что при дифференциальном включении двух одинарных датчиков, входящих в датчик двойного типа удваивается измерительный сигнал, уменьшаются влияние синфазных помех и наводок и погрешность от неоднородности ЭП.

Из сказанного следует, что ДД обладают большей чувствительностью и меньшей дополнительной погрешностью в отличие от ОД. Это подтверждают выводы, сделанные в теоретической части статьи и в работе [8].

Рис. 3. График изменения погрешности  $\delta(a) = \pm 2\%$  в пространственном диапазоне  $0 \leq a \leq 0,78$ 

Для выявления рациональных угловых размеров  $\theta_1$  чувствительных элементов датчика составлена его математическая модель ДД. В основу модели было положено выражение (3). Математическая модель позволяет определять рациональные угловые размеры  $\theta_1$  чувствительных элементов датчика, при которых датчик будет обладать минимальной погрешностью  $\delta(\theta_1)$  и максимальным пространственным диапазоном измерения  $a$ . Полученные в результате математического моделирования ДД рациональные угловые размеры сведены в табл. 1 и представлены в виде графиков на рис. 2а, б.

Из табл. 1 и графиков (рис. 2а, б) следует, что рациональный диапазон угловых размеров ЧЭ ограничен условием  $57^\circ < \theta_1 < 62^\circ$ . Угловым размерам ЧЭ из этого диапазона будет соответствовать погрешность, выбираемая из условия  $|\pm 0,19\%| < \delta < |\pm 3,8\%|$ , и верхнее значение пространственного диапазона измерения, выбираемое из условия  $0,41 < a < 0,96$ . Согласно графикам (рис. 2), ДД с угловым размером ЧЭ, равным  $\theta_1 = 58,77^\circ$ , имеют погрешность  $\delta = \pm 2\%$  и пространственный диапазон измерения  $0 < a < 0,78$ , что соответствует расстоянию до источника поля  $d \approx 1,28R$ . График изменения этой погрешности в пределах  $-2\% < \delta < +2\%$  в пространственном диапазоне  $0 < a < 0,78$  представлен на рис. 3.

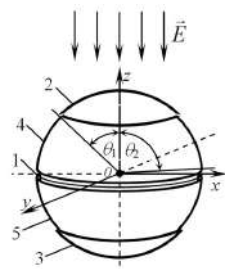


Рис. 4. Сферический однокоординатный датчик напряженности электрического поля двойного типа

**Сдвоенный сферический датчик.** Рассмотрим сдвоенный сферический датчик (СД) с накладными ЧЭ. В состав сдвоенного датчика входит два двойных датчика (ДД), составляющих единое целое (рис. 4). Конструкция СД [14] включает в себя проводящее тело 1 сферической формы и четыре проводящих ЧЭ 2-5 в форме сферических сегментов. ЧЭ 2, 4 и 3, 5 наложены друг на друга и на сферу, изолированы между собой и сферой и расположены на одной координатной оси z. Первая пара ЧЭ 2, 3 ограничена угловым размером  $\theta_1$ , а вторая пара ЧЭ 4, 5 ограничена угловым размером  $\theta_2 \leq 90^\circ$ .

Помещая СД в ЭП, на выходах его двойных датчиков индуцируются дифференциальные заряды. Эти заряды можно определить по выражению (2), подставляя в него соответствующие угловых размеров ЧЭ. При подстановке необходимо учитывать, что

$$E_1(t) = E(t) \cdot [1 + \delta_1(\theta_1)], \quad (4)$$

$$E_2(t) = E(t) \cdot [1 + \delta_2(\theta_2)]. \quad (5)$$

Погрешности  $\delta_1(\theta)$  и  $\delta_2(\theta)$  определяются выражением (3), соответственно, подставляя в них угловые  $\theta_1 = 45^\circ$  и  $\theta_1 = 90^\circ$  ЧЭ.

С учетом того, что выходной сигнал двойного датчика формируется как среднее значение из  $E_1(t)$  и  $E_2(t)$  в соответствии с методом измерений НЭП по среднему значению [10, 11], то выходной заряд СД можно представить как

$$q = \frac{E_1(t) + E_2(t)}{2} = -6\pi\epsilon\epsilon_0 R^2 \cdot \left(1 + \frac{\delta_1(\theta_1) + \delta_2(\theta_2)}{2}\right) \cdot E(t), \quad (6)$$

$$\text{где } \delta = \frac{\delta_1(\theta_1) + \delta_2(\theta_2)}{2} \quad (7)$$

— погрешность от неоднородности поля СД.

Следует отметить, что выражение (7) связывает погрешность СД от неоднородности поля, угловые размеры  $\theta_1$  и  $\theta_2$  его ЧЭ 2-3 и 4-5 и линейные размеры  $R$  датчика. Эта взаимосвязь позволила составить математическую модель СД.

Проведенное математическое моделирование СД, аналогичное моделированию ДД выявило рациональные угловые размеры  $\theta_1$  и  $\theta_2$  ЧЭ. При моделировании выявлялись угловые размеры  $\theta_1$  и  $\theta_2$  ЧЭ, при которых погрешность  $\delta$  была минимальна в максимально возможном пространственном диапазоне измерения  $a$ . Рассмотрены два варианта выбора ЧЭ сдвоенного датчика.

**Первый вариант** построения СД предусматривал выбор таких угловых размеров  $\theta_1$  и  $\theta_2$  ЧЭ, при

Таблица 2

Результаты исследования сдвоенного датчика. Вариант 1

|                    | 1                 | 2                 | 3                 | 4                 | 5                 | 6                 | 7                 |
|--------------------|-------------------|-------------------|-------------------|-------------------|-------------------|-------------------|-------------------|
| $\theta_1$ , град. | 52,25             | 52                | 50,95             | 49,9              | 49                | 48,29             | 47,75             |
| $\theta_2$ , град. | 62,5              | 63                | 65                | 67,5              | 70                | 72,5              | 75                |
| $\delta$ , %       | $\pm 4,02$        | $\pm 3,98$        | $\pm 3,84$        | $\pm 3,67$        | $\pm 3,51$        | $\pm 3,35$        | $\pm 3,20$        |
| $a$                | $0 \leq a \leq 1$ | $0 \leq a \leq 1$ | $0 \leq a \leq 1$ | $0 \leq a \leq 1$ | $0 \leq a \leq 1$ | $0 \leq a \leq 1$ | $0 \leq a \leq 1$ |
|                    | 8                 | 9                 | 10                | 11                | 12                | 13                |                   |
| $\theta_1$ , град. | 47,33             | 46,94             | 46,67             | 46,52             | 46,4              | 46,38             |                   |
| $\theta_2$ , град. | 77,5              | 80                | 82,5              | 85                | 87,5              | 90                |                   |
| $\delta$ , %       | $\pm 3,07$        | $\pm 2,95$        | $\pm 2,87$        | $\pm 2,81$        | $\pm 2,77$        | $\pm 2,76$        |                   |
| $a$                | $0 \leq a \leq 1$ | $0 \leq a \leq 1$ | $0 \leq a \leq 1$ | $0 \leq a \leq 1$ | $0 \leq a \leq 1$ | $0 \leq a \leq 1$ |                   |

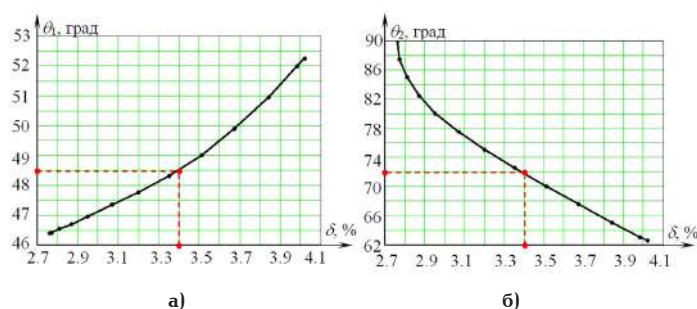
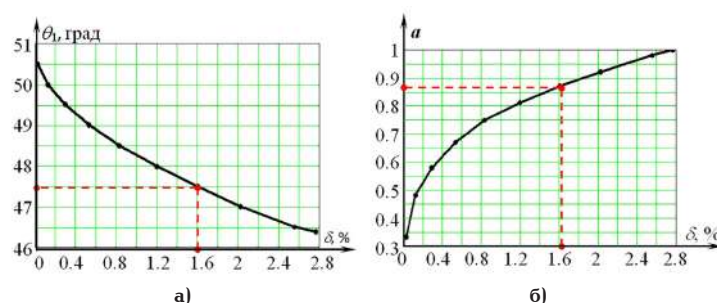


Рис. 5. Графики зависимости: а) зависимость  $\theta_1(\delta)$ ; б) зависимость  $\theta_2(\delta)$

Результаты исследования сдвоенного датчика. Вариант 2

|                    | 1                    | 2                    | 3                    | 4                    | 5                    |
|--------------------|----------------------|----------------------|----------------------|----------------------|----------------------|
| $\theta_1$ , град. | 46,38                | 46,5                 | 47                   | 47,5                 | 48                   |
| $\theta_2$ , град. | 90                   | 90                   | 90                   | 90                   | 90                   |
| $\delta$ , %       | $\pm 2,76$           | $\pm 2,55$           | $\pm 2,02$           | $\pm 1,6$            | $\pm 1,19$           |
| $a$                | $0 \leq a \leq 1$    | $0 \leq a \leq 0,98$ | $0 \leq a \leq 0,92$ | $0 \leq a \leq 0,87$ | $0 \leq a \leq 0,81$ |
|                    | 6                    | 7                    | 8                    | 9                    | 10                   |
| $\theta_1$ , град. | 48,5                 | 49                   | 49,5                 | 50                   | 50,5                 |
| $\theta_2$ , град. | 90                   | 90                   | 90                   | 90                   | 90                   |
| $\delta$ , %       | $\pm 0,83$           | $\pm 0,53$           | $\pm 0,29$           | $\pm 0,12$           | $\pm 0,02$           |
| $a$                | $0 \leq a \leq 0,75$ | $0 \leq a \leq 0,67$ | $0 \leq a \leq 0,58$ | $0 \leq a \leq 0,48$ | $0 \leq a \leq 0,33$ |

Рис. 6. Графики зависимости: а) зависимость  $\theta_1(\delta)$ ; б) зависимость  $a(\delta)$ 

которых во всем пространственном диапазоне измерений  $0 \leq a \leq 1$  погрешность измерения была бы равна  $\pm \delta$ .

**Второй вариант** построения СД предусматривал уменьшение погрешности измерения  $\delta$  за счет уменьшения пространственного диапазона измерений  $0 \leq a < 1$ .

Результатом математического моделирования первого варианта явились полученные:

- рациональные угловые размеры ЧЭ сдвоенного датчика;
- взаимосвязь угловых размеров ЧЭ с погрешностью  $\delta$  от неоднородности ЭП;
- взаимосвязь угловых размеров ЧЭ с пространственным диапазоном измерения  $a$ .

По результатам моделирования составлена табл. 2 и построены графики (рис. 5).

Из табл. 2 и рис. 5 следует, что СД при различных сочетаниях угловых размеров  $\theta_1$  и  $\theta_2$  ЧЭ могут иметь погрешность  $\delta$  от неоднородности поля в пределах  $|\pm 2,76| \% < \delta < |\pm 4,02| \%$  для всего пространственного диапазона измерения  $0 < a = 1$ . Однако сочетания угловых размеров  $\theta_1 = 46,38^\circ$  и  $\theta_2 = 90^\circ$  ЧЭ можно считать оптимальными. Для такого сочетания угловых размеров ЧЭ датчика минимально возможная погрешность от неоднородности поля не будет превышать  $\delta = \pm 2,76 \%$  в полном пространственном диапазоне измерения  $0 \leq a = 1$ .

В результате математического моделирования СД по второму варианту (ЧЭ 4,5 выполнены в форме полусфер с  $\theta_2 = 90^\circ$ ) выявлены верхние границы пространственного диапазона измерений  $a$ , принимающие значения от 0,33 до 0,98, в которых погрешность СД от неоднородности ЭП может принимать значения в пределах  $0,02 \% < \delta < 2,55 \%$ . Результаты моделирования занесены в табл. 3 и представлены в виде графиков (рис. 6).

На рис. 6 представлен график, который по заданной погрешности от неоднородности ЭП позволяет выбрать угловой размер  $\theta_1$  ЧЭ при  $\theta_2 = 90^\circ$ . Так, например, для выбранной погрешности  $\delta = \pm 1,6 \%$  угловой размер ЧЭ будет  $\theta_1 = 47,5^\circ$ , а пространственный диапазон измерения  $0 \leq a \leq 0,87$ .

Из табл. 3 и рис. 6 можно определиться с оптимальным решением построения СД с угловым размером ЧЭ  $\theta_1 = 48,5^\circ$ , которому будут соответствовать погрешность  $\delta = \pm 0,83 \%$  от неоднородности поля и пространственный диапазон измерения  $0 \leq a \leq 0,75$ .

**Сравнительное исследование.** Критерии сравнительного исследования ДД и СД включают в себя [15, 16]:

- 1) технологии изготовления;
- 2) конструктивным параметрам ( $R$ ,  $\theta_1$ ,  $\theta_2$ );
- 3) метрологическим характеристикам ( $\delta$ ,  $a$ ).

По технологии изготовления датчики мало отличаются друг от друга. Это отличие заключается в структуре построения датчиков. Оба датчика имеют слоистую структуру типа «проводник–диэлектрик–проводник». Двойной датчик выполнен по структуре «проводник–диэлектрик–проводник», а сдвоенный — по структуре «проводник–диэлектрик–проводник–проводник». В качестве проводников выступают сферическое основание датчика и его чувствительные элементы. При использовании методов напыления процесс изготовления сдвоенного датчика несколько усложняется.

Из выражений (2) и (3) установлено, что на систематическую погрешность исследуемых датчиков одинаковое влияние оказывают радиус сферического основания  $R$  и угловые размеры чувствительных элементов  $\theta_1$  и  $\theta_2$ . Основные отличия сдвоенных и двойных датчиков в их метрологических характеристиках, таких как погрешность от неоднород-



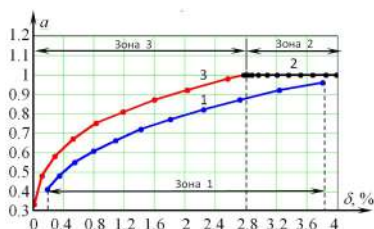


Рис. 7. Результаты сравнения сдвоенного и двойного датчиков и зоны их использования: зона 1 — двойной датчик с  $57^\circ < \theta_1 < 62^\circ$ ; зона 2 — сдвоенный датчик с  $46,38^\circ < \theta_1 < 52,25^\circ$  и  $62,5^\circ < \theta_3 < 90^\circ$ ; зона 3 — сдвоенный датчик с  $46,5^\circ < \theta_1 < 50,5^\circ$  и  $\theta_3 = 90^\circ$

ности ЭП  $\delta$  и пространственный диапазон измерения  $a$ .

Сравним метрологические характеристики ДД и СД и представим их на рис. 7. На нем в виде графиков показана зависимость  $a(\delta)$  для двойного датчика (график «зона 1», соответствующий рис. 2б) и двух вариантов сдвоенного датчика «зона 2» и «зона 3». Первому варианту соответствует график зоны 2, для которого  $a(\delta) = 1$ . Второму варианту — график «зона 3», соответствующий графику, приведенному на рис. 6б. Из рис. 7 видно, что при равенстве погрешностей сдвоенных и двойных датчиков сдвоенные датчики имеют более широкий пространственный диапазон измерения. Для первого варианта построения СД соответствует максимальный пространственный диапазон измерений  $0 \leq a \leq 1$ , в котором минимально возможные погрешности могут лежать в диапазоне  $|\pm 2,76\%| < \delta < |\pm 4,02\%|$ .

Оптимальной погрешностью этого диапазона следует считать погрешность  $\delta = \pm 2,76\%$ , для которой угловые размеры чувствительных элементов сдвоенного датчика должны иметь значения  $\theta_1 = 46,38^\circ$  и  $\theta_2 = 90^\circ$ .

Второй вариант построения сдвоенного датчика целесообразно использовать в пространственном диапазоне измерений, т.е. в диапазоне  $0 \leq a < 1$ . Этот диапазон считается менее опасным, т.к. в нем исключаются касания датчика источника поля. В этом пространственном диапазоне погрешность датчика может принимать значения  $|\pm 0,02\%| < \delta < |\pm 2,55\%|$ . Однако наиболее безопасным считается диапазон  $0 \leq a \leq 0,5$ , когда просвет между датчиком и источником поля равен радиусу датчика R. В безопасном диапазоне  $0 \leq a \leq 0,5$  погрешность от неоднородности поля СД не превысит  $\delta \leq |\pm 0,12\%|$  (табл. 3). Для обеспечения такой погрешности СД должен иметь угловые размеры ЧЭ, равные  $\theta_1 = 50^\circ$  и  $\theta_2 = 90^\circ$ .

Итак, сравнительные исследования показали значительные преимущества по метрологическим характеристикам сдвоенных датчиков перед двойными.

**Результаты исследования.** Результаты исследований позволили:

1) установить параметры сдвоенных и двойных сферических датчиков напряженности ЭП, влияющие на их метрологические характеристики. К ним можно отнести технологические и конструктивные параметры датчиков;

2) установить, что сдвоенные и двойные датчики незначительно отличаются по технологическим и конструктивным параметрам. Отличие наблюда-

ется только по сложности изготовления. Сдвоенные датчики несколько сложнее в изготовлении;

3) сравнить сдвоенные и двойные датчики по метрологическим характеристикам;

4) установить, что лучшими метрологическими характеристиками обладают сдвоенные датчики.

**Выводы.** Результаты исследований позволили сделать следующие выводы и заключение:

1) значительными преимуществами по метрологическим характеристикам в сравнении сдвоенных и двойных датчиков напряженности ЭП обладают сдвоенные датчики;

2) интерес могут представлять два варианта построения сдвоенных датчиков:

— первый вариант сдвоенного датчика обладает погрешностью  $\delta = \pm 2,76\%$  в широком пространственном диапазоне измерений  $0 \leq a \leq 1$  при выполнении его ЧЭ с угловыми размерами  $\theta_1 = 46,38^\circ$  и  $\theta_2 = 90^\circ$ ;

— второй вариант сдвоенного датчика обладает погрешностью  $\delta = \pm 0,12\%$  в полном пространственном диапазоне измерений  $0 \leq a \leq 0,5$  при выполнении его ЧЭ с угловыми размерами  $\theta_1 = 50^\circ$  и  $\theta_2 = 90^\circ$ .

**Закключение.** Сдвоенные датчики перспективны. Они позволяют значительно повысить точность измерения напряженности неоднородного ЭП в широком пространственном диапазоне измерения.

#### Библиографический список

- Птицына Н. Г., Виллорези Д., Дорман Л. И. [и др.]. Естественные и техногенные низкочастотные магнитные поля как факторы, потенциально опасные для здоровья // Успехи физических наук. 1998. № 168 (7). С. 767–791. DOI: 10.3367/UFNr.0168.199807d.0767.
- ГОСТ 12.1.045-84 ССБТ. Электростатические поля. Допустимые уровни на рабочих местах и требования к проведению контроля. Введ. 01–07–1995. Москва: Стандартинформ, 2006. 4 с.
- Коробкова В. П., Морозов Ю. А., Столяров М. Д. [и др.]. Воздействие электрического поля распределительных устройств 500 и 750 кВ на обслуживающий персонал и средства для его защиты // Подстанции переменного тока: материалы Междунар. конф. по большим электрическим системам (СИГРЭ-72). Москва: Энергоатомиздат, 1974. С. 33–43.
- Дез Ж., Пиррот П. Расчет и измерение напряженности электрического поля вблизи устройств высокого напряжения // Влияние электроустановок высокого напряжения на окружающую среду: пер. докл. междунар. конф. по большим электрическим системам (СИГРЭ-76) / под ред. Ю. П. Шкарина. Москва: Энергия, 1979. С. 10–19.
- Ложников В. Я. Цифровой измеритель напряженности электрического поля промышленной частоты // Приборы и техника эксперимента. 1981. № 1. С. 275.
- Гатман С. Двойной измеритель электрического поля с защитой // Приборы для научных исследований. 1968. № 1. С. 45–49.
- Берент Г. Н., Плейс И. Р. Датчик электрического поля // Приборы для научных исследований. 1971. № 6. С. 141–142.
- 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.
- 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.
- Пат. 2776097 С1 Российская Федерация, МПК G 01 R 29/12. Способ измерения напряженности электрического поля с использованием датчика сдвоенного типа / Бирю-

ков С. В., Тюкина Л. В., Тюкин А. В. № 2021120706; заявл. 14.07.2021; опубл. 13.07.2022. Бюл. № 20.

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

12. Чугунов С. А., Юркевич В. М. Расширение зоны измерения параметров электрического поля при применении зондового метода // Измерительная техника. 1981. № 1. С. 33–35.

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

14. Пат. 207465 U1 Российская Федерация, МПК G01R 29/12. Устройство для измерения напряженности электрического поля со сдвоенным датчиком / Тюкина Л. В., Данышина В. В. № 202111599; заявл. 23.04.2021; опубл. 28.10.2021. Бюл. № 31.

15. Бирюков С. В., Глуховец Е. Г., Тюкин А. В. Сравнительный анализ плоских многоэлементных датчиков напряженности электрического поля с круглым основанием и различными конструктивными особенностями // Омский научный вестник. 2020. № 3 (171). С. 57–64. DOI: 10.25206/1813-8225-2020-171-57-64.

16. Xiao D., Ma Q., Xie Y. A Power-Frequency Electric Field Sensor for Portable Measurement // Sensor (Basel Switzerland). 2018. № 18 (4). P. 1053. DOI: 10.3390/s18041053.

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

SPIN-код: 9384-0078

ORCID: 0000-0002-1362-9911

AuthorID (SCOPUS): 7006438919

Адрес для переписки: sbiryukov154@mail.ru

#### Для цитирования

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

Статья поступила в редакцию 18.12.2023 г.

© С. В. Бирюков

UDC 621.317.328

DOI: 10.25206/1813-8225-2024-191-125-132

EDN: IXQSUI

**S. V. BIRYUKOV**

Omsk State  
Technical University,  
Omsk, Russia

## COMPARATIVE STUDY OF DOUBLE AND DUAL ELECTROINDUCTION SPHERICAL ELECTRIC FIELD STRENGTH SENSORS

The work provides a comparative study of double and dual electric field strength sensors. The comparison examined the design, technological and metrological parameters of the sensors, as well as the complexity of their measuring circuits. Research has revealed similarities in the design and technological parameters of the sensors and differences in metrological characteristics and the complexity of the measuring circuits. In terms of metrological characteristics, dual sensors are significantly superior to double ones. It has been established that a dual sensor having sensitive elements with angular dimensions  $\theta_1=46,38^\circ$ , and  $\theta_2=90^\circ$ , has a smaller error due to field inhomogeneity. The error does not exceed  $\delta \leq \pm 2,76\%$  in the spatial measurement range  $0 \leq a \leq 1$ . With the same error, double sensors can only be used in a limited spatial measurement range of  $0 \leq a \leq 0,89$ . It is shown that dual sensors are superior to dual sensors in terms of metrological parameters. This indicates the advisability of their use.

**Keywords:** electric field strength, electric field sensor, double sensor, dual type sensor, measurement error, distance to the field source.

#### References

1. Ptitsyna N. G., Villorezi D., Dorman L. I. [et al.] Estestvennyye i tekhnogennyye nizkochastotnyye magnitnyye polya kak faktory, potentsial'no opasnyye dlya zdorov'ya [Natural and man-made low-frequency magnetic fields as a potential health hazard] //

Uspekhi fizicheskikh nauk. *Uspekhi Fizicheskikh Nauk*. 1998. No. 168 (7). P. 767–791. DOI: 10.3367/UFNr.0168.199807d.0767. (In Russ.).

2. GOST 12.1.045-84 SSBT. Elektrostaticheskiye polya. Dopustimyye urovni na rabochikh mestakh i trebovaniya k provedeniyu kontrolya [Occupational safety standards system.

Electrostatic fields. Tolerance levels and methods of control at working places]. Moscow, 2006. 4 p. (In Russ.).

3. Korobkova V. P., Morozov Yu. A., Stolyarov M. D. [et al.]. Vozdeystviye elektricheskogo polya raspredelitel'nykh ustroystv 500 i 750 kV na obsluzhivayushchiy personal i sredstva dlya ego zashchity [Impact of electric field of 500 and 750 kV switchgears on operating personnel and means for their protection] // Podstantsii peremennogo toka. *Alternating Current Substations*. Moscow, 1974. P. 33–43. (In Russ.).

4. Dez Zh., Pirrot P. Raschet i izmereniye napryazhennosti elektricheskogo polya vblizi ustroystv vysokogo napryazheniya [Calculation and measurement of electric field strength in the vicinity of high voltage devices] // Vliyaniye elektroustanovok vysokogo napryazheniya na okruzhayushchuyu sredu. *Environmental Impact of High Voltage Electrical Installations* / Ed. by. Yu. P. Shkarina. Moscow, 1979. P. 10–19. (In Russ.).

5. Lozhnikov V. Ya. Tsirovoy izmeritel' napryazhennosti elektricheskogo polya promyshlennoy chastoty [Digital meter of electric field strength at industrial frequency] // Pribory i tekhnika eksperimenta. *Instrumentation and Experimental Techniques*. 1981. No. 1. P. 275. (In Russ.).

6. Gatman S. Dvoynoy izmeritel' elektricheskogo polya s zashchitoy [Double electric field meter with protection] // Pribory dlya nauchnykh issledovaniy. *Research Instruments*. 1968. No. 1. P. 45–49. (In Russ.).

7. Berent G. N., Pleys I. R. Datchik elektricheskogo polya [Electric field sensor] // Pribory dlya nauchnykh issledovaniy. *Research Instruments*. 1971. No. 6. P. 141–142. (In Russ.).

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. (In Engl.).

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. (In Engl.).

10. Patent 2776097 S1 Russian Federation, IPC G 01 R 29/12. Sposob izmereniya napryazhennosti elektricheskogo polya s ispol'zovaniyem datchika sdvoyennogo tipa [Method for measuring electric field strength using a dual-type sensor] // Biryukov S. V., Tyukina L. V., Tyukin A. V. No. 2021120706. (In Russ.).

11. Tyukina L. V. Modernizirovanny metod izmereniya napryazhennosti elektricheskogo polya po srednemu znacheniyu sdvoyennymi datchikami i ustroystva ego realizatsii [An upgraded method for measuring the electric field strength by the average value of dual sensors and devices for its implementation] //

Dinamika sistem, mekhanizmov i mashin. *Dynamics of Systems, Mechanisms and Machines*. 2021. Vol. 9, no 3. P. 64–72. DOI: 10.25206/2310-9793-9-3-64-72. (In Russ.).

12. Chugunov S. A., Yurkevich V. M. Rasshireniye zony izmereniya parametrov elektricheskogo polya pri primenenii zondovogo metoda [Extension of the electric field measurement area using the probe method] // Izmeritelnaya tekhnika. *Measuring Technology*. 1981. No. 1. P. 33–35. (In Russ.).

13. Biryukov S. V. Izmereniye napryazhennosti elektricheskikh poley v dielektricheskikh sredakh elektroinduktsionnymi datchikami. Metody i sredstva izmereniy [Measurement of electric field strength in dielectric media by electroinduction sensors. Methods and means of measurement]. Omsk, 2011. 196 p. (In Russ.).

14. Patent 207465 U1 Russian Federation, IPC G 01 R 29/12. Ustroystvo dlya izmereniya napryazhennosti elektricheskogo polya so sdvoyennym datchikom [Device for measuring electric field strength with dual sensor] / Tyukina L. V., Dan'shina V. V. No. 202111599. (In Russ.).

15. Biryukov S. V., Glukhovaya E. G., Tyukin A. V. Sravnitel'nyy analiz ploskikh mnogoelementnykh datchikov napryazhennosti elektricheskogo polya s kruglym osnovaniyem i razlichnymi konstruktivnymi osobennostyami [Comparative analysis of flat multi-element electric field strength sensors with round base and various design features] // Omskiy nauchnyy vestnik. *Omsk Scientific Bulletin*. 2020. No. 3 (171). P. 57–64. DOI: 10.25206/1813-8225-2020-171-57-64. (In Russ.).

16. Xia D., Ma Q., Xie Y. A Power-Frequency Electric Field Sensor for Portable Measurement // Sensor (Basel Switzerland). 2018. No. 18 (4). P. 1053. DOI: 10.3390/s18041053. (In Engl.).

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

SPIN-code: 9384-0078

ORCID: 0000-0002-1362-9911

AuthorID (SCOPUS): 7006438919

Correspondence address: sbiryukov154@mail.ru

#### For citations

Biryukov S. V. Comparative study of double and dual electroinduction spherical electric field strength sensors // Omsk Scientific Bulletin. 2024. No. 3 (191). P. 125–132. DOI: 10.25206/1813-8225-2024-191-125-132.

Received December 18, 2023.

© S. V. Biryukov