

# ПРИБОРОСТРОЕНИЕ, МЕТРОЛОГИЯ И ИНФОРМАЦИОННО- ИЗМЕРИТЕЛЬНЫЕ ПРИБОРЫ И СИСТЕМЫ

УДК 621.317.328

DOI: 10.25206/1813-8225-2021-178-67-74

**С. В. БИРЮКОВ<sup>1</sup>**

**Л. В. ТЮКИНА<sup>1</sup>**

**А. В. ТЮКИН<sup>2</sup>**

<sup>1</sup>Омский государственный  
технический университет,  
г. Омск

<sup>2</sup>Сибирский государственный  
автомобильно-дорожный университет,  
г. Омск

## МЕТОД ИЗМЕРЕНИЯ НАПРЯЖЕННОСТИ НЕОДНОРОДНЫХ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ПОЛЕЙ ПО СРЕДНЕМУ ЗНАЧЕНИЮ

Измерение и контроль уровней напряженности неоднородных электрических полей с высокой точностью довольно сложная задача. Решение этой задачи связано как с разработкой новых датчиков, так и методов измерения напряженности электрического поля. Создание новых высокоточных электроиндукционных датчиков исчерпало свои возможности на современном уровне техники и технологии. Поэтому нужны новые идеи решения задач высокоточного измерения напряженности электрического поля. Одним из таких путей является разработка новых методов измерения. Существующие методы измерения, характеризующиеся сложностью процессов измерения, пригодностью в одних случаях и непригодностью в других, не обеспечивают желаемых метрологических характеристик. Поэтому работы, связанные с разработкой методов измерения напряженности неоднородных электрических полей, не стоят на месте и являются актуальными. Целью исследования стало создание нового метода измерения напряженности электрических полей с использованием известных датчиков, позволяющего значительно уменьшить погрешность измерения неоднородных электрических полей. Сформирована идея построения нового метода измерений. Идея метода заключается в том, что при наличии двух физических величин, измеренных с разными по знаку значениями погрешности, среднее значение физической величины всегда

будет ближе к истинному значению. Исходя из этого, предложен новый метод измерения напряженности неоднородных электрических полей, связанный только лишь с оригинальным процессом измерения. Метод измерения получил название «Метод среднего значения» (МСЗ). Оценка погрешности этого метода показывает снижение погрешности измерения до  $+5\%$  при полном пространственном диапазоне измерения  $0 \leq a \leq 1$ . Используя «Метод среднего значения» можно добиться значительного повышения точности измерения напряженности неоднородных электрических полей в широком пространственном диапазоне измерений по сравнению с известными методами.

**Ключевые слова:** датчик напряженности электрического поля, одинарный датчик, двойной датчик, метод измерения, напряженность электрического поля, погрешность от неоднородности поля.

**Введение.** Точное измерение уровней напряженности электрического поля представляется довольно сложной задачей. При любых измерениях напряженности электрического поля погрешность результата измерения определяется не только погрешностью используемых датчиков и устройств обработки их сигналов, но и используемых методом измерения. Правильно подобранный метод измерения позволяет значительно уменьшить влияние погрешности датчика на полученный результат измерения.

В связи с этим разработка новых методов измерения напряженности электрического поля, обеспечивающих высокую точность полученных результатов в широком пространственном диапазоне измерения, будет являться целью данной работы.

**Постановка задачи.** Провести исследования и рассмотреть возможность создания нового метода измерения напряженности электрического поля, повышающего точность измерения при использовании известных датчиков за счет математической обработки сигналов датчиков без изменения их конструктивных решений. Для этого необходимо решить следующие задачи:

1) провести теоретический анализ работы группы известных электроиндукционных датчиков напряженности электрического поля в поле точечного источника. Такие поля имеют высокую степень неоднородности, поэтому в них удобнее всего производить оценку предельной погрешности датчиков;

2) предложить идею и разработать новый метод измерения напряженности электрического поля с использованием известных датчиков, позволяющий значительно уменьшить погрешность измерения неоднородных электрических полей;

3) привести оценку погрешности нового метода измерений неоднородных электрических полей и подтвердить её уменьшение.

**Теория.** Для проведения сравнительного анализа датчиков напряженности электрического поля выберем группу сферических электроиндукционных датчиков. Из этой группы рассмотрим два вида 3-D датчиков. К первому виду отнесем датчики с чувствительными элементами в форме сферических сегментов с угловыми размерами  $\theta_0 \leq 45^\circ$  [1, 2]. Ко второму виду отнесем датчики с чувствительными элементами в форме полусфер, т.е. сферических сегментов с угловыми размерами  $\theta_0 = 90^\circ$  [3–12].

Для дальнейшего анализа представим конструктивные модели двух видов датчиков напряженности электрического поля.

**Конструктивная модель датчиков первого вида.** Возможны два конструктивных исполнения датчиков первого вида. К первому исполнению можно отнести одинарные, а ко второму — двойные 3-D

датчики. В работе [1] представлен цифровой прибор с одинарным электроиндукционным сферическим 3-D датчиком напряженности электрического поля, относящийся к первому исполнению.

Датчик (рис. 1) состоит из проводящей сферы 1 и трех проводящих чувствительных элементов 2–4, расположенных по трем координатным осям  $x$ ,  $y$  и  $z$  декартовой системы координат, начало которой совмещено с центром сферы 0. Чувствительные элементы, выполненные в форме сферических сегментов, изолированы между собой и поверхностью сферы и располагаются на одной из её половин. Размеры сферических сегментов, выбранные так, чтобы они не перекрывали друг друга, и, в общем случае, имеют угловой размер  $\theta_0 \leq 45^\circ$ . Толщина изоляционного слоя и самого чувствительного элемента не более 0,1 мм. Это позволяет считать поверхность датчика единой сферической поверхностью, все точки которой в электрическом поле имеют равные потенциалы. В связи с тем, что датчик выполнен в одинарном исполнении, то он не позволяет исключать синфазные составляющие из полезного сигнала, вызванные неоднородностью поля, внешними электрическими помехами. Это будет приводить к значительным погрешностям измерения. Оценка погрешности измерения подобными датчиками будет проведена ниже.

Двойной электроиндукционный сферический 3-D датчик напряженности электрического поля второго исполнения (рис. 2), представлен в работе [2]. Его конструктивное отличие от датчиков первого исполнения заключается только лишь в том, что он имеет шесть чувствительных элементов 2–7, попарно и диаметрально расположенных на поверхности проводящей сферы 1 по трем координатным осям  $x$ ,  $y$  и  $z$ . Использование двойного датчика в дифференциальном включении позволяет исключить синфазные составляющие и значительно снизить погрешности, вызванные неоднородностью поля и внешними электрическими помехами.

Для достижения максимально возможной чувствительности в датчиках обоих исполнений чувствительные элементы должны занимать максимальную поверхность сферы, а их угловой размер  $\theta_0$  с учетом их не перекрытия должен составлять  $45^\circ$ .

Проведем оценку погрешности датчиков первого вида. При работе в однородном электрическом поле погрешности датчиков будут определяться только лишь конструктивными и технологическими погрешностями [3]. В неоднородном электрическом поле у датчиков возникают погрешности, вызванные неоднородностью поля. В настоящее время степень неоднородности поля оценивают по градации: низкая, средняя и высокая. Для оцен-

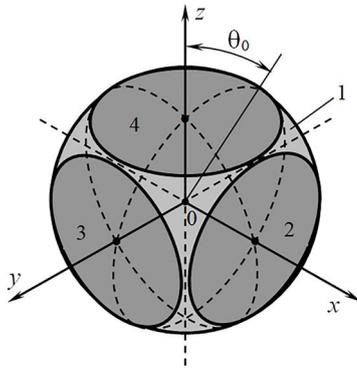


Рис. 1. Одинарный 3-D датчик

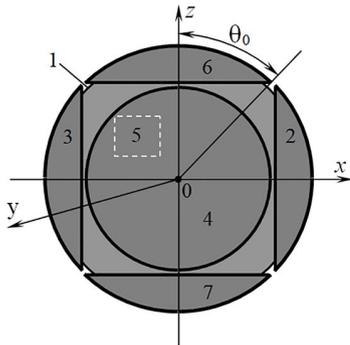


Рис. 2. Двойной 3-D датчик

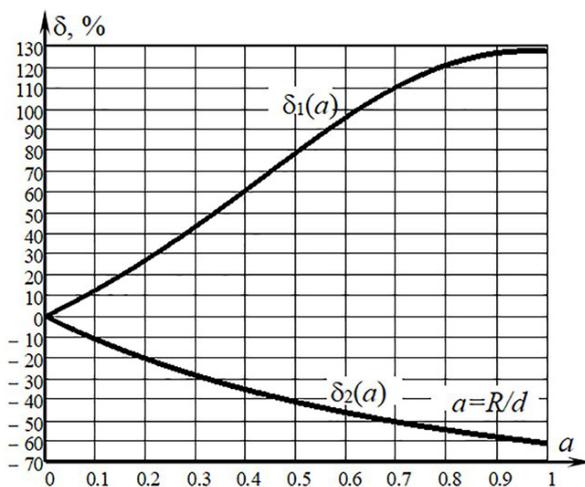


Рис. 3. Графики погрешности от неоднородности электрического поля  $\delta_1(a)$  и  $\delta_2(a)$  для  $\theta_0 = 45^\circ$

ки погрешности датчиков от неоднородности поля, целесообразно выбирать поля с высокой степенью неоднородности. К таким полям можно отнести поля квадруполь, диполь и точечного заряда. В электрических полях квадруполь и диполь напряженность поля быстро убывает с расстоянием, соответственно обратно пропорционально пятой и третьей степени. В связи с этим поля таких источников рассматривать нецелесообразно. Поле точечного заряда убывает обратно пропорционально квадрату расстояния. Поэтому многие авторы [2, 4–14] используют его для моделирования электрических полей с разной степенью неоднородности.

Изменяя расстояние до источника поля можно получать электрические поля — от низкой (однородное поле), до высокой (вблизи точечного источника) степени неоднородности.

Для оценки погрешности датчиков первого исполнения воспользуемся известными выражениями (1) и (2) расчета погрешности от неоднородности поля одинарных датчиков сферической формы, приведенными в работе [13].

$$\delta_1(a) = \left[ \frac{\left( \frac{1+a}{2a^2 \sin^2 \frac{\theta_0}{2}} \right) \cdot \left( 1 - \frac{1-a}{\sqrt{1-2a \cos \theta_0 + a^2}} \right) - \frac{1}{a}}{3 \cos^2 \frac{\theta_0}{2}} - 1 \right] \times 100; \quad (1)$$

$$\delta_2(a) = \left[ \frac{\left( \frac{1-a}{2a^2 \sin^2 \frac{\theta_0}{2}} \right) \cdot \left( 1 - \frac{1+a}{\sqrt{1+2a \cos \theta_0 + a^2}} \right) + \frac{1}{a}}{3 \cos^2 \frac{\theta_0}{2}} - 1 \right] \times 100; \quad (2)$$

где  $\theta_0 \leq 45^\circ$  — угловой размер чувствительного элемента, выполненного в форме сферического сегмента;  $a = R/d$  — пространственный диапазон измерения;  $R$  — радиус сферы;  $d$  — расстояние от центра сферы до источника поля.

Выражение (1) позволяет рассчитать погрешность от неоднородности электрического поля для одинарного датчика, когда поле направлено на чувствительные элементы. При противоположном направлении поля необходимо воспользоваться выражением (2).

Графические зависимости погрешности от неоднородности электрического поля в зависимости от пространственного диапазона измерения, построенные по выражениям (1) и (2) для угловых размерах чувствительных элементов  $\theta_0 \leq 45^\circ$ , представлены на рис. 3. Из графиков рис. 3 следует, что одинарный датчик первого исполнения при направлении поля на чувствительные элементы имеет положительную, а в противоположном направлении отрицательную погрешности во всем пространственном диапазоне измерения. Приемлемым диапазоном измерения для таких датчиков будет являться  $a \leq 0,1$ . Таким образом, на расстояниях  $d \geq 10 \cdot R$  от источника поля погрешность датчика не выйдет за пределы  $\pm 10\%$ .

Проведем оценку погрешности датчиков второго исполнения. Оценку погрешности датчиков будем проводить также в электрическом поле точечного заряда. Для этого воспользуемся известным выражением (3) расчета погрешности от неоднородности поля двойных датчиков сферической формы, приведенным в работе [13]. Погрешность датчиков второго исполнения с чувствительными элементами в форме сферических сегментов с угловыми размерами  $\theta_0 \leq 45^\circ$  будем оценивать, воспользовавшись выражением для погрешности (3)

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

где  $\theta_0 \leq 45^\circ$  — угловой размер чувствительного элемента, выполненного в форме сферического сегмента;  $a=R/d$  — пространственного диапазона измерения;  $R$  — радиус сферы;  $d$  — расстояние от центра сферы до источника поля.

Графические зависимости погрешности от неоднородности электрического поля в зависимости от пространственного диапазона измерения, построенные по выражению (3) для двойного датчика с угловыми размерами чувствительных элементов  $\theta_0=45^\circ$ , представлены на рис. 4. График рис. 4 показывает, что двойной датчик второго исполнения при угловых размерах чувствительных элементов  $\theta_0=45^\circ$  имеет положительную погрешность во всем пространственном диапазоне измерения. Приемлемым диапазоном измерения для таких датчиков будет являться  $a \leq 0,35$ . Таким образом, на расстояниях  $d \approx 3 \cdot R$  от источника поля погрешность датчика не выйдет за пределы  $\pm 10\%$ .

#### Конструктивная модель датчиков второго вида.

Возможны два конструктивных исполнения датчиков второго вида. К первому исполнению можно отнести двухэлементные, а ко второму — многоэлементные датчики. В работе [14] представлен двухэлементный однокоординатный электроиндукционный сферический датчик напряженности электрического поля первого исполнения.

Двухэлементный датчик (рис. 5) состоит из проводящей сферы 1 и двух проводящих чувствительных элементов 2–3, расположенных на одной координатной оси  $z$ , проходящей через центр сферы 0. Чувствительные элементы, выполненные в форме полусфер, изолированы между собой и поверхностью сферы. Полусферы, представляют собой сферические сегменты с угловым размером  $\theta_0 \approx 90^\circ$  и с зазором между собой не более 0,1 мм. Это позволяет считать поверхность датчика единой сферической поверхностью, все точки которой в электрическом поле имеют равные потенциалы.

Многоэлементный электроиндукционный сферический датчик напряженности электрического поля второго исполнения (рис. 6) представлен в работах [15, 16]. Основу многоэлементного датчика составляет проводящая сфера 1, на поверхности которой расположены восемь проводящих элементов (2–9), выполненных в виде конгруэнтных равносторонних сферических треугольников (см. рис. 6). Элементы 6–9 на рис. 6 не просматриваются, сносками на них изображены пунктиром. Проводящие части датчика, такие как сфера 1 и элементы 2–9, изолированы между собой тонким слоем диэлектрика толщиной не более 0,1 мм. В этом случае всю конструкцию многоэлементного датчика можно считать сплошной проводящей сферической поверхностью, а каждая проводящая часть датчика в электрическом поле будет иметь практически одинаковый электрический потенциал.

Формируя из электродов 2–9 противоположные пары групп чувствительных элементов в форме полусфер, состоящих из четырех элементов: по оси  $X$  — 3, 4, 7, 8 и 2, 5, 6, 9; по оси  $Y$  — 2, 3, 4, 5 и 6,

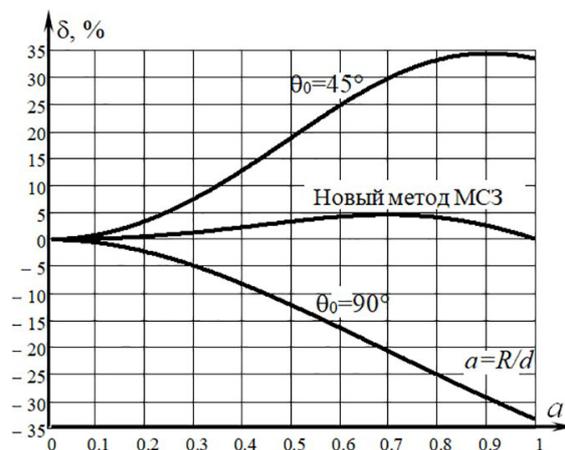


Рис. 4. Графики погрешностей от неоднородности электрического поля нового метода и известных датчиков с угловыми размерами чувствительных элементов  $\theta_0=45^\circ$  и  $\theta_0=90^\circ$

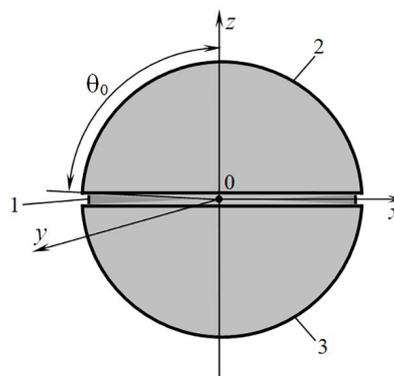


Рис. 5. Двойной однокоординатный датчик с чувствительными элементами в форме полусфер

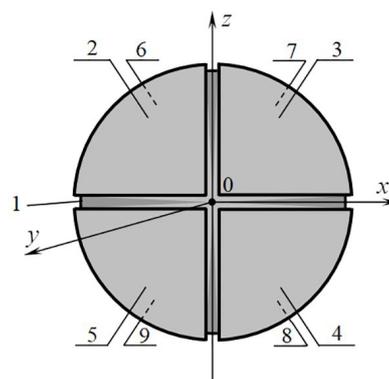


Рис. 6. Многоэлементный датчик с чувствительными элементами в форме сферических равносторонних конгруэнтных треугольников

7, 8, 9; по оси  $Z$  — 2, 3, 6, 7 и 4, 5, 8, 9, разделенных координатными плоскостями  $YOZ$ ,  $XOZ$  и  $XOY$ , можно получить двойной 3-D датчик с чувствительными элементами в форме полусфер. Общим для датчиков первого и второго исполнения является то, что они двойные и их чувствительные элементы выполнены в форме полусфер.

Проведем оценку погрешности датчиков второго вида. Для этого воспользуемся известным выражением (3) расчета погрешности от неоднородности поля двойных датчиков сферической формы [13].

Графические зависимости погрешности от неоднородности электрического поля в зависимости от пространственного диапазона измерения, построенные по выражению (3) для угловых размерах чувствительных элементов  $\theta_0 = 90^\circ$ , представлены на рис. 4.

График рис. 4 показывает, что двойные датчики второго вида при угловых размерах чувствительных элементов  $\theta_0 = 90^\circ$  имеют отрицательную погрешность во всем пространственном диапазоне измерения. Приемлемым диапазоном измерения для таких датчиков будет являться  $a \leq 0,45$ .

Таким образом, на расстояниях  $d \approx 2 \cdot R$  от источника поля погрешность датчика не выйдет за пределы  $\pm 10\%$ .

Обобщая приведенные выше исследования, можно заключить, что известные датчики напряженности электрического поля без использования соответствующих методов измерения обеспечивают погрешность измерения неоднородных электрических полей в пределах  $\pm 10\%$  на расстояниях от источника поля, составляющих несколько единиц радиусов сферического датчика. При этом известные датчики с разными угловыми размерами чувствительных элементов в одном случае ( $\theta_0 \leq 45^\circ$ ) имеют положительную, а в другом ( $\theta_0 = 90^\circ$ ) — отрицательную погрешности. Эту особенность датчиков можно использовать для построения нового метода измерения напряженности неоднородных электрических полей.

Существуют две группы методов измерения напряженности электрического поля, позволяющие с использованием известных датчиков уменьшить погрешность до  $\pm(2 \div 5)\%$  и расширить пространственный диапазон измерения, практически до  $a \approx 1$  ( $d \approx R$ ). Первая группа методов связана с ориентацией датчика в пространстве измеряемого поля и оригинальной обработкой его сигналов [17–21]. Вторая — методы, связанные с оптимизацией размеров чувствительных элементов датчика ( $45^\circ < \theta_0 < 90^\circ$ ) и традиционной обработкой сигналов датчика [20, 21]. Таким образом, существующие методы позволяют с высокой точностью измерять неоднородные электрические поля в широком пространственном диапазоне. Однако они обременены сложностью процесса измерений и обработки сигналов датчика. Поэтому необходимы новые методы, которые без усложнения процесса измерений позволяют повысить точность измерения напряженности электрического поля в широком пространственном диапазоне.

**Новый метод измерения.** Идея метода заключается в том, что при наличии двух физических величин, измеренных с разными по знаку значениями погрешности, среднее значение физической величины всегда будет ближе к истинному значению. Исходя из этого, можно предложить новый метод измерения напряженности неоднородных электрических полей, связанный только лишь с оригинальным процессом измерения [22].

Метод измерения сводится к следующим действиям:

1) в исследуемую точку электрического поля поочередно **помещают** первый и второй датчики, имеющие противоположные по знаку погрешности, вызванные неоднородностью поля;

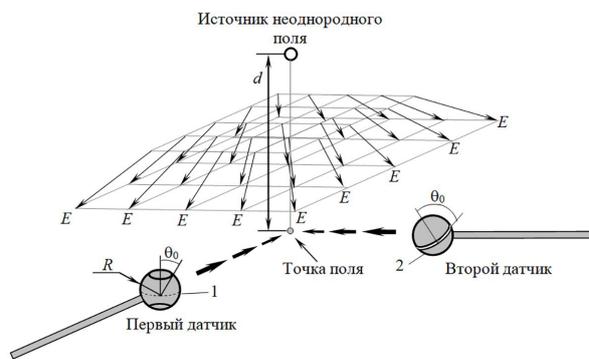


Рис. 7. Пояснения к новому методу измерений

2) каждым датчиком **измеряют** модули вектора напряженности электрического поля в одной и той же точке пространства, соответственно равные  $E_1$  и  $E_2$ ;

3) по измеренным значениям  $E_1$  и  $E_2$  **вычисляют** среднее арифметическое значение  $\bar{E} = (E_1 + E_2)/2$ , которое принимают за результат измерения.

Метод измерения представлен на рис. 7.

**Теоретическое обоснование метода.** Воспользовавшись особенностью одних датчиков иметь положительную  $\delta_1$ , а других отрицательную  $-\delta_2$  погрешности, запишем для измеренных значений каждым датчиком модули вектора напряженности электрического поля  $E_1$  и  $E_2$ :

$$E_1 = E_0(1 + \delta_1) \text{ и } E_2 = E_0(1 - \delta_2),$$

где  $E_0$  — напряженность исходного электрического поля в исследуемой точке пространства.

Найдем среднее значение модуля вектора напряженности электрического поля

$$\begin{aligned} E &= \frac{E_1 + E_2}{2} = \frac{E_0(1 + \delta_1) + E_0(1 - \delta_2)}{2} = \\ &= E_0 \left( 1 + \frac{\delta_1 - \delta_2}{2} \right) = E_0(1 + \delta), \end{aligned}$$

где  $\delta = \frac{\delta_1 - \delta_2}{2}$  — погрешность реализующего предлагаемый метод измерения.

Из анализа погрешности  $\delta$  следует, что погрешность среднего значения напряженности поля равна половине разности погрешностей измерений первым и вторым датчиками.

Рассмотрим два возможных варианта:

1) если  $|\delta_1| < |\delta_2|$ , то погрешность  $\delta$  отрицательная и должна удовлетворять условию

$$\delta = \frac{\delta_1 - \delta_2}{2} \geq -|\delta_1|,$$

откуда

$$|\delta_1| \leq |\delta_2| \leq 3|\delta_1|,$$

где  $\delta_2$  может принимать значения  $k\delta_1$ , а коэффициент  $k$  удовлетворять условию

$$1 \leq k \leq 3; \quad (4)$$

С учетом  $k$

$$\delta = \frac{\delta_1 - \delta_2}{2} = \frac{\delta_1 - k\delta_1}{2} = -\frac{k-1}{2} \delta_1;$$

Сравнительная оценка двух вариантов погрешностей

Варианты	Коэффициент $k$					
	1	1,5	1,56	2	2,5	3
	Погрешность $\delta$					
$ \delta_1  <  \delta_2 $	0	$-0,25\delta_1$	$-0,28\delta_1$	$-0,5\delta_1$	$-0,75\delta_1$	$-\delta_1$
$ \delta_2  <  \delta_1 $	0	$0,25\delta_2$	$0,28\delta_2$	$0,5\delta_2$	$0,75\delta_2$	$\delta_2$

2) если  $|\delta_2| < |\delta_1|$ , то погрешность  $\delta$  положительная и должна удовлетворять условию

$$\delta = \frac{\delta_1 - \delta_2}{2} \leq |\delta_2|,$$

откуда

$$|\delta_2| \leq |\delta_1| \leq 3|\delta_2|,$$

где  $\delta_1$  может принимать значения  $k\delta_2$ , а коэффициент  $k$  удовлетворять условию

$$1 \leq k \leq 3; \quad (5)$$

с учетом  $k$

$$\delta = \frac{\delta_1 - \delta_2}{2} = \frac{k\delta_2 - \delta_2}{2} = \frac{k-1}{2} |\delta_2|.$$

Из неравенств (4) и (5) следует ограничение по применению метода. Метод применим, если погрешности измерения между датчиками отличаются не более чем в три раза.

Результаты оценки погрешности  $\delta$  двух вариантов представлены в табл. 1.

Из табл. 1 следует, что в двух представленных вариантах погрешность  $\delta$  метода измерения меньше наименьшей погрешности одного из измеренных значений напряженности электрического поля.

Таким образом, приведенные рассуждения показывают, что если погрешности датчиков взаимно противоположны по знаку и по модулю отличаются не более, чем в три раза, то среднее значение измеряемой напряженности электрического поля будет определено с погрешностью меньше наименьшей погрешности одного из датчиков. Следовательно, в результате приведенных действий, включаемых в предлагаемый метод измерения, можно повысить точность измерения модуля вектора напряженности электрического поля.

Проверим коэффициент  $k(a)$  на выполнение условий (4) и (5). Для этого проведем его оценку для реальных датчиков (см. рис. 2, рис. 5 и рис. 6 [2, 13–15]).

Подставим в выражение (3) для погрешности датчиков угловые размеры чувствительных элементов  $\theta_0=45^\circ$  и  $\theta_0=90^\circ$  и после преобразования получим выражение для коэффициента  $k$

$$k = \frac{\delta_1(a)}{\delta_2(a)} = \frac{2 \cdot \left( 2 - \frac{1-a^2}{\sqrt{1-a\sqrt{2}+a^2}} - \frac{1-a^2}{\sqrt{1+a\sqrt{2}+a^2}} \right) - 3a^2}{2 \cdot \left( 1 - \frac{1-a^2}{\sqrt{1+a^2}} \right) - 3a^2}. \quad (6)$$

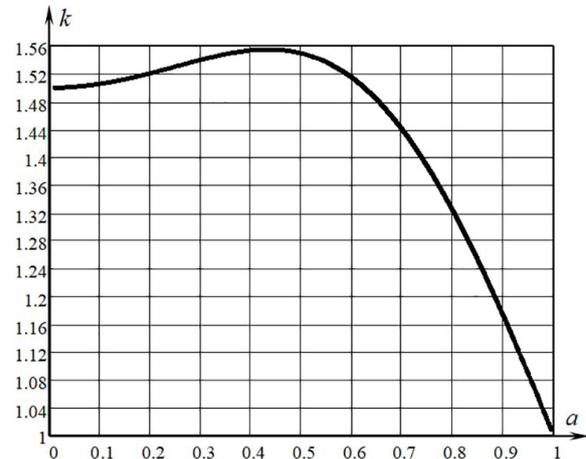


Рис. 8. График изменения коэффициента  $k$  в зависимости от пространственного диапазона  $a$

Воспользуемся математическим редактором MathCAD-14 и построим график коэффициента  $k$  в зависимости от параметра  $a$ . График коэффициента  $k$  представлен на рис. 8.

Из выражения (6) и рис. 8 следует, что коэффициент лежит в диапазоне  $1 \leq k(a) \leq 1,56$ , т.е. соответствует условиям (4) и (5) и не превышает трех единиц.

Следовательно, предложенный метод измерения напряженности неоднородных электрических полей будет работать с известными датчиками. Метод получил название «Метод среднего значения» (МСЗ). Определение среднего значения напряженности электрического поля приводит либо к полной, либо к частичной компенсации погрешности измерения, что повышает точность метода измерения.

Расширение пространственного диапазона измерения покажем на примере сравнения различных известных методов. В первом методе использовался сферический датчик с чувствительными элементами в форме сферических сегментов с угловыми размерами  $\theta_0 \leq 45^\circ$ , имеющий положительную погрешность от неоднородности электрического поля. Во втором методе использовался сферический датчик с чувствительными элементами в форме полусфер с угловыми размерами  $\theta_0=90^\circ$ , имеющий отрицательную погрешность от неоднородности электрического поля.

Графики погрешностей измерения напряженности электрического поля, полученные с использованием известных датчиков [14–16] и с использованием этих же датчиков и «Метода среднего значения», представлены на рис. 4. В основе построения графиков лежит выражение (3) для погрешности от неоднородности поля датчиков сферической формы.

Из графиков рис. 4 следует, что «Метод среднего значения» позволяет не только значительно снизить погрешность измерения неоднородных электрических полей (см. график для нового метода), но и расширить пространственный диапазон измерения. График погрешности измерения с применением «Метода среднего значения» показывает, что погрешность метода измерения снизилась до +5 % при полном пространственном диапазоне измерения  $0 \leq a \leq 1$  ( $d=R$ ). Для известных датчиков [14–16] при той же погрешности пространственные диапазоны измерения соответственно равны  $0 \leq a \leq 0,24$  ( $d \approx 4R$ ) и  $0 \leq a \leq 0,3$  ( $d \approx 3R$ ).

Таким образом, используя «Метод среднего значения» можно добиться значительного повышения точности измерения напряженности неоднородных электрических полей в широком пространственном диапазоне измерений по сравнению с известными методами. Работы по измерению напряженности электрических полей представлены также в [23, 24].

**Результаты исследований.** Проведенные исследования позволили:

**сопоставить**

— известные одинарные и двойные электроиндукционные сферические датчики напряженности электрического поля;

**установить**

— связь знака погрешности датчиков от неоднородности электрического поля с угловыми размерами его чувствительных элементов;

— особенность датчиков с угловыми размерами чувствительных элементов  $\theta_0 \leq 45^\circ$  иметь отрицательную погрешность;

— особенность датчиков с угловыми размерами чувствительных элементов  $\theta_0 \leq 90^\circ$  иметь положительную погрешность;

**предложить**

— идею измерения напряженности электрического поля в одной точке пространства двумя датчиками с противоположными по знаку погрешностями с последующим нахождением среднего значения между ними;

**создать**

— новый метод измерения неоднородных электрических полей, получивший название «Метод средних значений».

**Выводы и заключения.** По результатам теоретических исследований предложен новый метод — «Метод средних значений», который без усложнения процесса измерений позволяет повысить точность измерения напряженности неоднородных электрических полей в широком пространственном диапазоне.

**Библиографический список**

1. Бирюков С. В., Ложников В. Я. Цифровой измеритель напряженности электрического поля промышленной частоты // Приборы и техника эксперимента. 1981. № 1. С. 275.
2. Horvath T., Clement G. Measurement of the distortion less electric field intensity of high voltage installations // Third International Symposium on High voltage Engineering. Milan, 28–31 Aug. 1979. P. 44.05/1–44.05/4.
3. Бирюков С. В., Тюкин А. В. Конструктивные погрешности трехкоординатных датчиков напряженности электрического поля // Омский научный вестник. 2017. № 3 (153). С. 82–86.
4. Chauzy S., Magnes P. Mise au point d'un mesureur de champ électrique alternatif 50 Hz // Rev. gen. elec. 1988. No. 7. P. 27–38.

5. Charles J., Miller J. The Measurement of Electric Fields in Live Line Working // IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems. 1967. Vol. PAS-86, Issue 4. P. 493–498. DOI: 10.1109/TPAS.1967.291859.
6. Pop E., Crişans S., Stoica V. Măsurarea intensităţii cîmpului electric alternativ // Metrologia aplicată. 1975. Vol. 22, No. 2. P. 73–81.
7. Böcker H., Hagenmeyer E. Ein Paitrag zur Messung der elektrischen Feldstärke bei hoher Gleichspannung // Elektrotechnische zeitschrift. 1966. A87, № 23. S. 829–831.
8. Feser K., Pfaff W. A potential free spherical sensor for the measurement of transient electric fields // IEEE Transaction on Power Apparatus and Systems. 1984. Vol. PAS-103, Issue 10. P. 2904–2911. DOI: 10.1109/TPAS.1984.318292.
9. Thomson E. M., Medelius P. J., Uman M. A. A remote sensor for the three components of transient electric field // IEEE Trans. Ind. Electron. 1988. Vol. 35 (3). P. 426–433. DOI: 10.1109/41.3117.
10. Bassen H. I., Smith G. S. Electric field probes — a review // IEEE Transactions on Antennas and Propagation. 1983. Vol. 31, Issue. 5. P. 710–718. DOI: 10.1109/TAP.1983.1143126.
11. Dongping Xiao, Qichao Ma, Yutong Xie [et al.]. A Power-Frequency Electric Field Sensor for Portable Measurement // Sensors (Basel). 2018. Vol. 18 (4). 1053. DOI: 10.3390/s18041053.
12. Rummyantseva E. V., Biryukov S. V., Lyutarevich A. G., Dolinger S. Y. Development of spherical sensor electric field strength measuring method // 2016 International Siberian Conference on Control and Communications (SIBCON). 2016. P. 1–4. DOI: 10.1109/SIBCON.2016.7491735.
13. 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.
14. Misakian M., Kotter F. R., Kahler R. L. Miniature ELF Electric Field Probe // Instruments for scientific research. 1978. Vol. 49 (7). P. 933–935. DOI: 10.1063/1.1135497.
15. Пат. 920569 СССР, МПК G 01 R 29/08. Устройство для измерения составляющих электрического поля / Хахамов И. В. № 2954934/18-21; заявл. 10.07.80; опубл. 15.04.82, Бюл. № 14.
16. Пат. 1689884 СССР, МПК G 01 R 29/12. Устройство для измерения напряженности электрического поля / Пучков Г. Г., Соколов А. Г. № 4724939/21; заявл. 26.07.89; опубл. 07.11.91, Бюл. № 41.
17. А. с. 1355946 СССР, МКИ G 01 R 29/08. Способ определения напряженности электромагнитного поля / Маслов О. Н., Шеретько Е. Ю. № 3864661/24-09; заявл. 11.03.85; опубл. 30.11.87. Бюл. № 44.
18. Пат. № 2200330 Российская Федерация, МКИ G 01 R 29/12, G 01 R 29/08. Способ измерения напряженности электрического поля / Бирюков С. В. № 2001104744/09; заявл. 14.02.01; опубл. 10.03.03. Бюл. № 7.
19. Пат. № 2214611 Российская Федерация, МКИ G 01 R 29/12, G 01 R 29/08. Способ измерения напряженности электрического поля / Бирюков С. В. № 2001101656/09; заявл. 17.01.01; опубл. 20.10.03 Бюл. № 23.
20. Пат. № 2231802 Российская Федерация, МКИ G 01 R 29/08, G 01 R 29/14. Способ измерения напряженности электрического поля / Бирюков С. В. № 2002117402/09; заявл. 28.06.02; опубл. 27.06.04. Бюл. № 18.
21. А. с. 1149189 СССР, МКИ G 01R 29/08. Датчик для измерения напряженности электрического поля / Бирюков С. В., Ложников В. Я., Столяров М. Д. № 3561237/24-09; заявл. 10.03.83; опубл. 07.04.85. Бюл. № 13.
22. Пат. № 2733100 Российская Федерация, МКИ G 01 R 29/12, G 01 R 29/14. Способ измерения напряженности электрического поля повышенной точности / Бирюков С. В., Глуховеря Е. Г. № 2020108479; заявл. 27.02.20; опубл. 29.09.20. Бюл. № 28.

23. Baicry M., Le Prado M. Device for measuring an electric field in a conducting medium and method of calibrating such a device. US patent 0238646A1; filed February 17th, 2016; published August 18th, 2016.

24. Tong Z. R., Wang X., Wang Y. [et al.]. Dual-parameter optical fiber sensor based on few-mode fiber and spherical structure // Optics Communications. 2017. Vol. 405 (16). P. 60–65. DOI: 10.1016/j.optcom.2017.07.070.

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

SPIN-код: 9384-0078

ORCID: 0000-0002-1362-9911

AuthorID (SCOPUS): 7006438919

**ТЮКИНА Людмила Владимировна**, соискатель по кафедре «Физика» ОмГТУ.

**ТЮКИН Александр Владимирович**, кандидат технических наук, доцент кафедры «Физика и математика» Сибирского государственного автомобильно-дорожного университета, г. Омск.

SPIN-код: 4516-7742

AuthorID (РИНЦ): 775886

ORCID: 0000-0002-7316-3797

AuthorID (SCOPUS): 57203100232

Адрес для переписки: sbiryukov154@mail.ru

#### Для цитирования

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

Статья поступила в редакцию 18.05.2021 г.

© С. В. Бирюков, Л. В. Тюкина, А. В. Тюкин