

НОВЫЙ ПОДХОД К ПРИМЕНЕНИЮ МЕТОДА ИЗМЕРЕНИЙ НАПРЯЖЕННОСТИ ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ПОЛЯ ПО СРЕДНЕМУ ЗНАЧЕНИЮ

В работе рассматривается новая возможность использования метода измерений напряженности электрического поля по среднему значению с целью уменьшения погрешности от неоднородности поля и расширения пространственного диапазона измерений. Проведенные в работе исследования позволили установить, что при использовании метода измерений по среднему значению на каждом шаге измерений всегда имеются три значения, два из которых соответствуют двум предыдущим значениям напряженности ЭП, определенным с противоположными по знаку погрешностями, а третья соответствует среднему значению из них. Поэтому в работе было предложено измерение напряженности электрического поля в одной точке пространства двумя датчиками с противоположными по знаку погрешностями. При этом поочередно определяя на каждом шаге усреднения среднее значение напряженности ЭП из ранее полученных и последующих средних значений, приближающего результат измерения к истинному значению. По результатам теоретических исследований предложен новый метод — «Метод измерений с пошаговым усреднением», который без усложнения процесса измерений позволяет уменьшить в два-три раза погрешность измерения напряженности неоднородных электрических полей в широком пространственном диапазоне по сравнению с методом измерений по среднему значению.

Ключевые слова: неоднородное электрическое поле, напряженность электрического поля, сдвоенный датчик, метод измерения по среднему значению, пошаговое усреднение.

Введение. Измерение — это многогранный процесс, целью которого является получение достоверного результата измерений, подтвержденного оценкой его погрешности. Погрешность результата измерений определяется не только погрешностью средства измерений, но и метода измерений. При этом одни методы измерений используются с ранее разработанными средствами измерений, другие методы специально разрабатываются применительно к данному средству измерений и закладываются в его алгоритм работы. Необходимость разработки новых методов измерения возникает в случаях, если известные методы не дают желаемых результатов. Это же касается и методов измерения напряженности электрического поля [1–10].

В данной статье будет рассмотрен новый подход к применению метода измерений по среднему значению с использованием сдвоенных датчиков напряженности электрического поля, позволивший

сформулировать новый метод измерения с пошаговым усреднением напряженности электрического поля.

Постановка задачи. Провести исследования и рассмотреть возможность нового подхода к применению метода измерения по среднему значению с целью снижения погрешности измерения напряженности неоднородных электрических полей. Для достижения цели необходимо решить следующие задачи:

1) провести теоретический анализ всех возможных случаев и выявить случаи, которые позволят уменьшить погрешность результата измерения напряженности электрического поля при различных сочетаниях погрешностей измерения двух значений напряженности ЭП;

2) рассмотреть новый подход к применению метода измерения напряженности ЭП по среднему значению к значениям различных сочетаний напря-

женности поля, полученных с противоположными по знаку погрешностями;

3) привести оценку погрешности нового подхода к измерениям неоднородных электрических полей и подтвердить её уменьшение;

4) предложить идею создания нового метода измерения напряженности ЭП с пошаговым усреднением, позволяющего значительно уменьшить погрешность измерения неоднородных электрических полей.

Теория. Измерение напряженности электрического поля основывается на постулате, согласно которому два измеренных значения E_1 и E_2 одной и той же физической величины E_0 , полученные с разными и противоположными по знаку значениями погрешностей δ_1 и δ_2 будут иметь среднее значение $E = 1/2(E_1 + E_2)$, отличающееся от физической величины E_0 на величину относительной погрешности $\delta = 1/2(|\delta_1| - |\delta_2|)$ меньшей половины разности модулей погрешностей δ_1 и δ_2 .

Приведем обоснование высказанному постулату.

Пусть при измерении одной и той же физической величины E_0 разными средствами измерений получены два значения E_1 и E_2 . Будем считать, что E_1 измерена с погрешностью $\pm\delta_1$, а E_2 измерена с погрешностью $\pm\delta_2$. С учетом сказанного запишем

$$E_1 = E_0(1 \pm \delta_1) \quad \text{и} \quad E_2 = E_0(1 \pm \delta_2). \quad (1)$$

Найдем среднее значение напряженностей E_1 и E_2 и его погрешность по отношению к E_0

$$E = \frac{E_1 + E_2}{2} = \frac{E_0(1 \pm \delta_1) + E_0(1 \pm \delta_2)}{2}. \quad (2)$$

Из выражения (2) устанавливаются четыре возможных случая, в зависимости от сочетаний знаков погрешностей:

1) погрешности δ_1 и δ_2 положительные, тогда

$$\begin{aligned} E &= \frac{E_1 + E_2}{2} = \frac{E_0(1 + |\delta_1|) + E_0(1 + |\delta_2|)}{2} = \\ &= E_0 \left(1 + \frac{|\delta_1| + |\delta_2|}{2} \right) = E_0(1 + \delta), \end{aligned} \quad (3)$$

где $\delta = 1/2(|\delta_1| + |\delta_2|)$ — погрешность среднего значения напряженности E .

Погрешность $\delta = 1/2(|\delta_1| + |\delta_2|)$ составляет половину суммы модулей погрешностей δ_1 и δ_2 , что больше и не соответствует погрешности $\delta = 1/2(|\delta_1| - |\delta_2|)$ постулата. Поэтому данный случай для дальнейшего рассмотрения не принимается;

2) погрешности δ_1 и δ_2 отрицательные, тогда

$$\begin{aligned} E &= \frac{E_1 + E_2}{2} = \frac{E_0(1 - |\delta_1|) + E_0(1 - |\delta_2|)}{2} = \\ &= E_0 \left(1 - \frac{|\delta_1| + |\delta_2|}{2} \right) = E_0(1 - \delta), \end{aligned} \quad (4)$$

где $\delta = -1/2(|\delta_1| + |\delta_2|)$ — погрешность среднего значения напряженности E .

Погрешность $\delta = -1/2(|\delta_1| + |\delta_2|)$ составляет половину суммы модулей погрешностей δ_1 и δ_2 , что больше и не соответствует погрешности $\delta = 1/2(|\delta_1| - |\delta_2|)$ постулата. Поэтому этот второй случай тоже не подходит;

3) погрешность δ_1 положительная, а погрешность δ_2 отрицательная, тогда

$$\begin{aligned} E &= \frac{E_1 + E_2}{2} = \frac{E_0(1 + |\delta_1|) + E_0(1 - |\delta_2|)}{2} = \\ &= E_0 \left(1 + \frac{|\delta_1| - |\delta_2|}{2} \right) = E_0(1 + \delta), \end{aligned} \quad (5)$$

где $\delta = 1/2(|\delta_1| - |\delta_2|)$ — погрешность среднего значения напряженности E .

Поскольку погрешность $\delta = 1/2(|\delta_1| - |\delta_2|)$ составляет половину разности модулей погрешностей δ_1 и δ_2 , что соответствует погрешности δ постулата, поэтому третий случай подходит и принимается для дальнейшего рассмотрения;

4) погрешность δ_1 отрицательная, а погрешность δ_2 положительная, тогда

$$\begin{aligned} E &= \frac{E_1 + E_2}{2} = \frac{E_0(1 - |\delta_1|) + E_0(1 + |\delta_2|)}{2} = \\ &= E_0 \left(1 - \frac{|\delta_1| - |\delta_2|}{2} \right) = E_0(1 - \delta), \end{aligned} \quad (6)$$

где $\delta = 1/2(|\delta_1| - |\delta_2|)$ — погрешность среднего значения напряженности E .

Поскольку модуль погрешности $\delta = 1/2(|\delta_1| - |\delta_2|)$ составляет половину разности модулей погрешностей δ_1 и δ_2 , что соответствует погрешности δ постулата, поэтому четвертый случай также может быть принят для дальнейшего рассмотрения. Следовательно, третий и четвертый случаи подтверждают выдвинутый постулат.

Таким образом, приведенные исследования показывают, что если погрешности датчиков взаимно противоположны по знаку, то среднее значение E будет определено с погрешностью меньше наименьшего модуля погрешности одного из измерений. Результаты этих исследований положены в основу разработанного метода измерения напряженности ЭП по среднему значению [11, 12]. Для дальнейших исследований необходимо привести формулировку этого метода. Метод измерения по среднему значению формулируется следующим образом: в исследуемую точку ЭП одновременно **помещают** двоярный датчик, состоящий из двух двойных датчиков, имеющих противоположные по знаку погрешности, вызванные неоднородностью поля, и каждым датчиком **измеряют** модули вектора напряженности электрического поля в одной и той же точке пространства, соответственно равные E_1 и E_2 , по которым вычисляют среднее значение $E = (E_1 + E_2)/2$, принимаемое за результат измерения [13].

Новый подход. Рассмотрим новый подход к применению метода измерений по среднему значению применительно к измерению напряженности ЭП на примере двух электроиндукционных сферических датчиков, имеющих чувствительные элементы в форме сферического сегмента с угловым размером $\theta_0 = 45^\circ$ (рис. 1а) и полусферы с угловым размером $\theta_0 \approx 90^\circ$ (рис. 1б).

Согласно методу измерений по среднему значению, измеряются два значения E_1 и E_2 одной и той же напряженности электрического поля E_0 . Напряженность поля E_1 измеряется с положительной погрешностью δ_1 , а напряженность поля E_2 измеряется с отрицательной погрешностью δ_2 . Метод измерения регламентирует нахождение между измеренными значениями E_1 и E_2 среднего значения

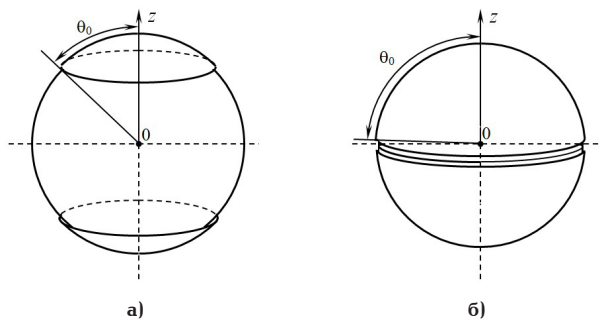


Рис. 1. Датчики: а) с положительной погрешностью при $\theta_0 = 45^\circ$; б) с отрицательной погрешностью при $\theta_0 = 90^\circ$

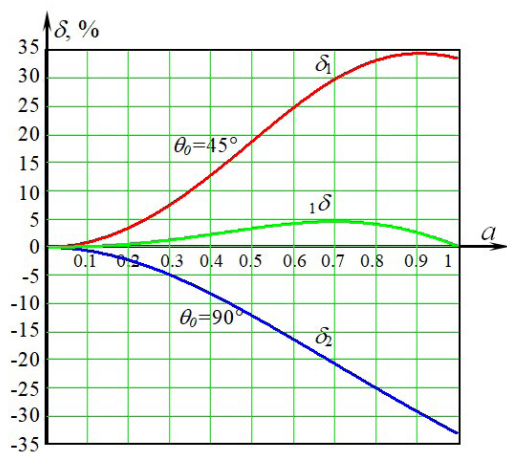


Рис. 2. Графики погрешностей ${}_1\delta$, δ_1 и δ_2

$${}_1E = \frac{E_1 + E_2}{2} = \frac{E_0(1 + \delta_1) + E_0(1 - \delta_2)}{2} = E_0(1 + \delta),$$

при этом погрешность среднего значения напряженности E будет определяться как

$${}_1\delta = \frac{\delta_1 - \delta_2}{2}, \tag{7}$$

где $\delta_{1n2} = \left[\frac{1}{3a^2 \sin^2 \theta_0} \times \left(2 - \frac{1 - a^2}{\sqrt{1 - 2a \cos \theta_0 + a^2}} - \frac{1 - a^2}{\sqrt{1 + 2a \cos \theta_0 + a^2}} \right) - 1 \right] \cdot 100$ [1] (δ_1 для $\theta_0 = 45^\circ$

и δ_2 для $\theta_0 = 90^\circ$), а число n перед значениями ${}_nE$ и ${}_n\delta$ означает номер шага действий, например, $n=1$ первый шаг, $n=2$ второй шаг и т.д.

Построенные в математическом редакторе MathCAD 15 графики погрешностей δ_1 и δ_2 и ${}_1\delta$ представлены на рис. 2. Из рис. 2 следует, что погрешность δ положительна и меньше по модулю погрешностей δ_1 и δ_2 . В результате нахождения среднего значения значительно уменьшается погрешность ${}_1\delta$ среднего значения (результата измерения), практически до +4,6 % в пространственном диапазоне $0 < a < 1$. В этом и заключается суть метода измерений по среднему значению. Будем считать

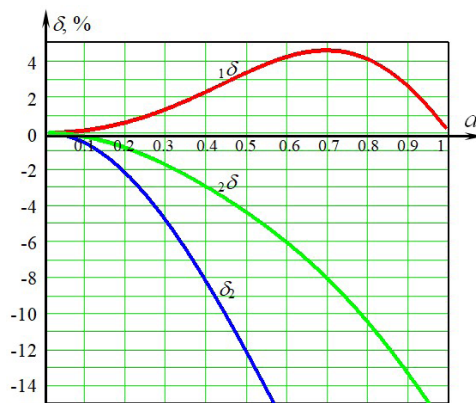


Рис. 3. Графики погрешностей ${}_1\delta$, δ_2 и $\delta_2 \delta_1$

метод измерений по среднему значению первым шагом в достижении цели уменьшения погрешности измерения.

Сформулированная суть метода измерений по среднему значению наталкивает на идею дальнейшего последовательного использования этого метода применительно к двум любым значениям, например, к найденному среднему значению и ранее измеренному значению напряженности с учетом того, что погрешности этих значений должны быть противоположны по знаку.

Из графиков погрешностей, представленных на рис. 2, видно, что только два графика соответствуют условию противоположности по знаку погрешностей, а именно графики δ и δ_2 , соответствующие средней напряженности ${}_1E$ и измеренной напряженности E_2 . Применительно к этим значениям на втором шаге находим среднее значение напряженности ${}_2E$ между определенным на первом шаге средним значением ${}_1E$ и измеренным значением E_2

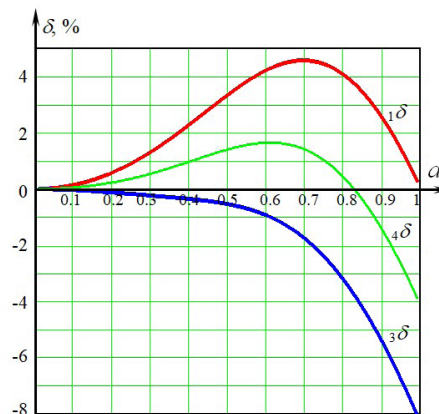
$${}_2E = \frac{{}_1E + E_2}{2} = \frac{\frac{E_1 + E_2}{2} + E_2}{2} = \frac{E_1 + 3E_2}{4} \tag{8}$$

и определяем его погрешность

$${}_2\delta = \frac{|{}_1\delta| - |\delta_2|}{2} = \frac{\frac{|\delta_1| - |\delta_2|}{2} - |\delta_2|}{2} = \frac{|\delta_1| - 3|\delta_2|}{4}. \tag{9}$$

Построенные в математическом редакторе MathCAD 15 графики погрешностей ${}_2\delta$, ${}_1\delta$ и δ_2 представлены на рис. 3. Из рис. 3 следует, что погрешность ${}_2\delta$ отрицательная и меньше по модулю погрешности δ_2 , но больше погрешности ${}_1\delta$ в пространственном диапазоне $0 < a < 1$. Убеждаемся, что полученный на втором шаге результат измерения не представляет интереса. В связи с этим следует продолжать установленные пошаговые действия. Поэтому для третьего шага, исходя из рис. 3, выбираем напряженности ЭП ${}_1E$ и ${}_2E$ (на рис. 3 не показаны). Выбранные напряженности имеют противоположные по знаку погрешности ${}_1\delta$ и ${}_2\delta$, необходимые для применения метода измерений по среднему значению. Тогда среднее значение напряженности третьего шага ${}_3E$ определится как

$${}_3E = \frac{{}_1E + {}_2E}{2} = \frac{\frac{E_1 + E_2}{2} + \frac{E_1 + 3E_2}{4}}{2} = \frac{3E_1 + 5E_2}{8}, \tag{10}$$

Рис. 4. Графики погрешностей ${}_1\delta$, ${}_2\delta$ и ${}_3\delta$ Рис. 5. Графики погрешностей ${}_1\delta$, ${}_3\delta$ и ${}_4\delta$

а его погрешность будет

$$\begin{aligned}
 {}_3\delta &= \frac{|\delta_1| - |\delta_2|}{2} = \\
 &= \frac{|\delta_1| - |\delta_2|}{2} - \frac{||\delta_1| - 3|\delta_2||}{4} = \frac{3|\delta_1| - 5|\delta_2|}{8}. \quad (11)
 \end{aligned}$$

Построенные в математическом редакторе MathCAD 15 графики погрешностей ${}_1\delta$, ${}_2\delta$ и ${}_3\delta$ представлены на рис. 4.

По графикам устанавливаем, что погрешность ${}_3\delta$ по модулю уменьшается, остается отрицательной и становится меньше погрешности ${}_2\delta$ во всем пространственном диапазоне a и меньше погрешности ${}_1\delta$ в пространственном диапазоне $0 < a < 0,9$. Наибольшее по модулю значение ${}_3\delta$ погрешности в пространственном диапазоне $0 < a < 1$ составляет -8% . Этот результат представляет интерес и его следует принимать во внимание, т.к. в пространственном диапазоне $0 < a < 0,9$ его погрешность не превышает -5% , что, примерно, соответствует результату, полученному на первом шаге. Если же рассматривать применение полученного результата в пространственном диапазоне $0 < a < 0,8$, в котором погрешность не выходит за пределы -3% , то это будет лучший результат. Следует отметить, что для дальнейших рассуждений область пространственного диапазона $0,5 < a < 1$ является «слепой» зоной и вероятность измерения в этой зоне мала.

Далее, проведя аналогичные рассуждая, на четвертом шаге находим среднее значение напряженности ${}_4E$ между значениями напряженности ${}_1E$ и ${}_3E$

$$\begin{aligned}
 {}_4E &= \frac{{}_1E + {}_3E}{2} = \\
 &= \frac{E_1 + E_2}{2} + \frac{3E_1 + 5E_2}{8} = \frac{7E_1 + 9E_2}{16} \quad (12)
 \end{aligned}$$

и его погрешность

$$\begin{aligned}
 {}_4\delta &= \frac{|\delta_1| - |\delta_3|}{2} = \\
 &= \frac{|\delta_1| - |\delta_2|}{2} - \frac{3|\delta_1| - 5|\delta_2|}{8} = \frac{7|\delta_1| - 9|\delta_2|}{16}. \quad (13)
 \end{aligned}$$

Построенные в математическом редакторе MathCAD 15 графики погрешностей ${}_1\delta$, ${}_3\delta$ и ${}_4\delta$, представлены на рис. 5.

Из графиков рис. 5 следует, что погрешность ${}_4\delta$ среднего значения ${}_4E$ напряженностей ${}_1E$ и ${}_3E$ по модулю увеличивается, но остается меньше погрешности ${}_3\delta$ и ${}_1\delta$ во всем пространственном диапазоне a .

Оптимальное значение погрешности ${}_4\delta = \pm 1,64\%$ лежит в пространственном диапазоне $0 < a < 0,91$. Наибольшее значение погрешности ${}_4\delta$ наблюдается в пространственном диапазоне $0 < a < 1$ и составляет -4% . Это, несомненно, лучший результат в сравнении с результатом, полученный методом измерений по среднему значению.

Так, последовательно, шаг за шагом, применяя метод измерений по среднему значению к каждой паре полученных напряженностей, определенных с противоположными по знаку погрешностями, и каждый раз анализируя графики погрешностей, можно добиться желаемых результатов.

Результаты дальнейших пошаговых исследований сведены в табл. 1.

В табл. 1 погрешность $\delta_{\text{опп}}$ соответствует погрешностям, имеющим равные по модулю максимумы и минимумы в положительных и отрицательных областях. Погрешность $\delta_{\text{макс}}$ — максимальная по модулю погрешность во всем пространственном диапазоне измерений $0 < a < 1$.

Таким образом, на примере двух сферических датчиков, имеющих чувствительные элементы в форме сферических сегментов с угловыми размерами $\theta_0 = 45^\circ$ и $\theta_0 = 90^\circ$ (см. рис. 1), показан подход к снижению погрешности измерения напряженности ЭП.

Такой подход применим к сферическим датчикам с другой формой и другими угловыми размерами чувствительных элементов, но противоположными по знаку погрешностями, изменяющимися по известным законам.

При этом число шагов при измерении напряженности ЭП может быть иным.

Результаты рассмотренных теоретических предположений легли в основу нового метода измерения напряженности ЭП с пошаговым усреднением.

Новый метод измерения. Идея метода заключается в двойном измерении одной и той же величины датчиками с противоположными по знаку погрешностями с поочередным определением на каждом шаге усреднения среднего значения напряженности ЭП из ранее полученных и последующих средних значений, приближающего результат

Основные результаты пошаговых исследований

	Шаги	Среднее между	Результат измерения	Погрешность измерения	$\delta_{\text{отн}}/\delta_{\text{max}}$	Пространственный диапазон измерения
Метод измерений по среднему значению	1	E_1 и E_2	$E = (E_1 + E_2)/2$	$\delta = (\delta_1 - \delta_2)/2$	+ 4,6 % / + 4,6 %	$0 < a < 1/0 < a < 1$
Метод измерений с пошаговым усреднением	2	${}_1E$ и E_2	$E = (E_1 + 3E_2)/4$	$\delta = (\delta_1 - 3 \delta_2)/4$	нет / - 16 %	нет / $0 < a < 1$
	3	${}_1E$ и ${}_2E$	$E = (3E_1 + 5E_2)/8$	$\delta = (3 \delta_1 - 5 \delta_2)/8$	нет / - 8 %	нет / $0 < a < 1$
	4	${}_1E$ и ${}_3E$	$E = (7E_1 + 9E_2)/16$	$\delta = (7 \delta_1 - 9 \delta_2)/16$	$\pm 1,64\%$ / - 3,9 %	$0 < a < 0,91/0 < a < 1$
	5	${}_4E$ и ${}_3E$	$E = (13E_1 + 19E_2)/32$	$\delta = (13 \delta_1 - 19 \delta_2)/32$	$\pm 0,44\%$ / - 5,9 %	$0 < a < 0,72/0 < a < 1$
	6	${}_5E$ и ${}_3E$	$E = (25E_1 + 39E_2)/64$	$\delta = (25 \delta_1 - 39 \delta_2)/64$	- 0,05 % / - 7 %	$0 < a < 0,50/0 < a < 1$
	7	${}_3E$ и ${}_6E$	$E = (51E_1 + 77E_2)/128$	$\delta = (51 \delta_1 - 77 \delta_2)/128$	$\pm 0,194\%$ / - 6,5 %	$0 < a < 0,65/0 < a < 1$
	8	${}_1E$ и ${}_6E$	$E = (57E_1 + 71E_2)/128$	$\delta = (57 \delta_1 - 71 \delta_2)/128$	$\pm 2\%$ / - 3,5 %	$0 < a < 0,94/0 < a < 1$
	9	${}_8E$ и ${}_6E$	$E = (107E_1 + 149E_2)/256$	$\delta = (107 \delta_1 - 149 \delta_2)/256$	$\pm 0,86\%$ / - 5,2 %	$0 < a < 0,8/0 < a < 1$
	10	${}_6E$ и ${}_7E$	$E = (101E_1 + 155E_2)/256$	$\delta = (101 \delta_1 - 155 \delta_2)/256$	$\pm 0,08\%$ / - 6,7 %	$0 < a < 0,58/0 < a < 1$

измерения к истинному значению. Исходя из этого, можно предложить новый метод измерения напряженности неоднородных электрических полей, связанный только лишь с оригинальным пошаговым подходом к измерению напряженности ЭП. Метод измерения с пошаговым усреднением формулируется следующим образом:

1) в исследуемую точку поля поочередно или одновременно помещают первый и второй датчики (см. рис. 1), имеющие противоположные по знаку погрешности, вызванные неоднородностью ЭП;

2) каждым датчиком измеряют напряженности ЭП в одной и той же точке пространства, соответственно равные E_1 и E_2 ;

3) по ранее составленным таблицам для конкретных датчиков, аналогичным табл. 1, выбирают шаг усреднения, который удовлетворяет по погрешности и пространственному диапазону измерений;

4) по измеренным значениям E_1 и E_2 и формуле для напряженности, соответствующей выбранному шагу усреднения, вычисляют среднее значение напряженности ЭП, принимаемое за результат измерения.

Таким образом, суть метода заключается в двойном измерении одной и той же величины датчиками с разными по знаку погрешностями с поочередным определением на каждом шаге усреднения среднего значения напряженности ЭП из ранее полученных и последующих средних значений, приближающего результат измерения к истинному значению.

Результаты исследований. Проведенные исследования позволили:

выявить

— случаи сочетаний погрешностей двух измеренных значений, при нахождении результата измерения как среднее значение из них, погрешность результата измерений значительно уменьшается. К таким случаям можно отнести следующие сочетания погрешностей: первый случай δ_1 — положи-

тельная, а погрешность δ_2 — отрицательная; второй случай δ_1 — отрицательная, а погрешность δ_2 — положительная;

установить

— всегда присутствие на графиках трех значений погрешностей, два из которых соответствуют двум предыдущим значениям напряженности ЭП, определенным с противоположными по знаку погрешностями, а третья соответствует среднему значению из них;

— возможность выбора из трех представленных графиков погрешностей двух, с противоположными по знаку значениями погрешностей и нахождения среднего значения напряженностей, соответствующих этим погрешностям;

— возможность пошагового проведения описанных действий для получения результата измерений напряженности ЭП с требуемой погрешностью и пространственного диапазона измерений;

предложить

— идею измерения напряженности электрического поля в одной точке пространства двумя датчиками с противоположными по знаку погрешностями с поочередным определением на каждом шаге усреднения среднего значения напряженности ЭП из ранее полученных и последующих средних значений, приближающего результат измерения к истинному значению.

создать

— новый метод измерения неоднородных электрических полей, получивший название «Метод измерений с пошаговым усреднением».

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

Библиографический список

1. Щигловский К. Б., Аксельрод В. С. Приборы для измерения параметров электростатического поля и их калибровка // Измерительная техника. 1978. № 5. С. 63–65.
2. Фридман Д. Е., Курзон Ф. Л., Фили М. [и др.]. Газоразрядный измеритель электрического поля // Приборы для научных исследований. 1982. № 8. С. 167–172.
3. А. с. 1818599 СССР, МКИ G 01 R 29/12. Способ измерения напряженности электрического поля / Сычик В. П., Воробьев В. А., Бреднев А. В. № 4862204/21; заявл. 29.08.90; опубл. 30.05.93, Бюл. № 20.
4. 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.
5. Пат. № 2539130 Российская Федерация, МПК G 01 R 31/00, G 01 R 29/12. Волоконно-оптическое устройство для измерения напряженности электрического поля / Мешковский И. К., Стригалева В. Е., Аксарин С. М. № 2013136095/28; заявл. 31.07.13; опубл. 10.01.15, Бюл. 1.
6. 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.
7. 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.
8. Щапова Л. В., Королева М. А. Современные методы измерения напряженности электрического поля // Актуальные проблемы современной науки: материалы VI Регион. науч.-практ. конф. с междунар. участием. Омск: Изд-во ОмГТУ, 2017. С. 176–179. 1 эл. опт. диск (CD-ROM).
9. Глухова Е. Г., Бирюков С. В. Датчики напряженности электрического поля на новых физических эффектах и явлениях // Актуальные проблемы современной науки: материалы IX Регионал. науч.-практ. конф. с междунар. участием. Омск, 2020. С. 47–50.
10. Леун Е. В. Основы построения струйно-капельных оптических систем измерений напряженности электрического поля. Часть 1 // Омский научный вестник. 2021. № 4 (178). С. 83–90. DOI: 10.25206/1813-8225-2021-178-83-90.
11. 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.

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

13. Пат. № 2733100 С1 Российская Федерация, МПК G 01 R 29/12. Способ измерения напряженности электрического поля повышенной точности / Бирюков С. В., Глухова Е. Г. № 2020108479; заявл. 27.02.20; опубл. 29.09.20, Бюл. 28.

ТЮКИНА Людмила Владимировна, соискатель кафедры физики Омского государственного технического университета (ОмГТУ), Омск.

БИРЮКОВ Сергей Владимирович, доктор технических наук, профессор (Россия), профессор кафедры физики ОмГТУ, Омск.

SPIN-код: 9384-0078

ORCID: 0000-0002-1362-9911

AuthorID (SCOPUS): 7006438919

Адрес для переписки: sbiryukov154@mail.ru

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

Для цитирования

Тюкина Л. В., Бирюков С. В., Тюкин А. В. Новый подход к применению метода измерений напряженности электрического поля по среднему значению // Омский научный вестник. 2022. № 3 (183). С. 122–127. DOI: 10.25206/1813-8225-2022-183-122-127.

Статья поступила в редакцию 22.04.2022 г.

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