

УДК 621.317.328

© С. В. Бирюков, 2023

## МЕТОД ИЗМЕРЕНИЯ НАПРЯЖЕННОСТИ ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ПОЛЯ С ОПРЕДЕЛЕНИЕМ ПОГРЕШНОСТИ РЕЗУЛЬТАТА ИЗМЕРЕНИЙ И РАССТОЯНИЯ ДО ИСТОЧНИКА ПОЛЯ

Электрические поля техногенной природы, окружающие технические и биологические объекты, оказывают на них неблагоприятные воздействия. Это приводит к необходимости осуществлять контроль и измерения параметров электрических полей. В связи с этим создание новых методов и средств измерений напряженности электрического поля техногенной природы является актуальной задачей. В работе рассмотрен метод измерения напряженности электрического поля, позволяющий не только измерить значение напряженности поля, но и определить по измеренным значениям его погрешность и оценить расстояние до источника поля. В основе метода лежит сдвоенный электроиндукционный сферический датчик напряженности электрического поля. Датчик позволяет одновременно измерять в одной точке поля два значения напряженности с противоположными по знаку погрешностями. Использование в методе двух значений напряженности в процессе одного измерения позволило определять погрешность в каждой точке измерений и расстояние до источника поля. Возможность метода измерения напряженности электрического поля определять в каждой точке поля погрешность результата измерений и расстояние до источника поля рассматривается впервые.

*Кл. сл.:* метод измерения, напряженность электрического поля, сдвоенный датчик, оценка погрешности в каждой точке измерений, расстояние до источника поля

### ВВЕДЕНИЕ

Среди большого многообразия методов измерений напряженности электрического поля (ЭП) [1–7], направленных на повышение точности измерений, чувствительности, упрощения процесса измерений и др., выделяется новый метод — метод измерения по среднему значению [8, 9]. Для реализации метода измерений требуется иметь два измеренных значения напряженности  $E_1$  и  $E_2$  в одной точке поля, в которой напряженность до внесения датчика была  $E_0$ . Значения напряженностей  $E_1$  и  $E_2$  отличаются от напряженности  $E_0$  на значение погрешности. Неотъемлемым условием метода измерений по среднему значению является противоположность по знаку этих погрешностей.

Использование метода измерения по среднему значению потребовало создания датчиков напряженности ЭП (НЭП) нового типа — сдвоенных датчиков, основанных на явлении электрической индукции [10, 11]. Введение их расширило номенклатуру датчиков НЭП.

До настоящего времени были известны электроиндукционные датчики НЭП двух типов: одинарные и двойные [12]. Одинарные датчики имеют один чувствительный элемент по каждой координатной оси относительно основания датчика. Такие датчики чувствительны к синфазным навод-

кам и помехам. Двойные датчики состоят из двух одинарных датчиков и имеют два диаметрально противоположных чувствительных элемента относительно основания датчика по каждой координатной оси. Датчики такого типа в дифференциальном включении нивелируют влияние синфазных наводок и помех. К одинарным и двойным датчикам присоединились сдвоенные датчики. Особенностью сдвоенных датчиков является совмещение двух двойных датчиков в одном. В этих датчиках по каждой координатной оси располагаются два двойных датчика. Такое техническое решение позволило сдвоенному датчику создавать два выходных сигнала, пропорциональных напряженностям  $E_1$  и  $E_2$ , измеренным в одной точке поля с противоположными по знаку погрешностями. Наличие избыточной информации о напряженности поля, а именно двух значений  $E_1$  и  $E_2$ , можно попытаться использовать для определения расстояния до источника поля и определения погрешности измерения  $E_0$  результата измерения модуля вектора  $E$ .

Дальнейшая работа будет построена на использовании сдвоенного однокоординатного датчика НЭП при его ориентации по направлению ЭП.

В связи с этим целью данной работы является создание нового метода измерений напряженности ЭП на основе сдвоенного однокоординатного дат-

чика, позволяющего определять погрешность результата измерений и расстояние до источника поля.

### ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

Для достижения поставленной цели необходимо решить следующие задачи:

1) дать характеристику сдвоенного датчика напряженности ЭП и подтвердить его пригодность для одновременного измерения двух значений напряженности  $E_1$  и  $E_2$  в одной точке поля и возможность применения в новом методе измерений;

2) установить эмпирическую зависимость параметра  $a = R / d$ , характеризующего пространственный диапазон измерения ( $R$  — радиус сферического основания датчика,  $d$  — расстояние от центра датчика до источника поля) от отношения измеренных напряженностей  $k_0 = E_1 / E_2$ ;

3) разработать теоретические основы построения нового метода измерений, позволяющего определять модуль вектора напряженности электрического поля, а также его погрешность и расстояние до источника поля;

4) предложить новый метод измерения напряженности электрического поля с определением погрешности измерения и расстояния до источника поля;

5) доказать численным экспериментом адекватность нового метода измерений.

### СДВОЕННЫЙ ДАТЧИК НАПРЯЖЕННОСТИ ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ПОЛЯ

Необходимый для реализации метода измерений сдвоенный датчик, позволяющий в данной точке поля одновременно измерять два значения напряженностей  $E_1$  и  $E_2$ , описан в работах [8, 9] и представлен на рис. 1.

Электроиндукционный сдвоенный датчик состоит из механической и измерительной частей. Механическая часть объединяет два датчика и представлена проводящим сферическим основанием 1, двумя чувствительными элементами 2 и 3 в форме сферических сегментов, двумя чувствительными элементами 4 и 5 в форме сферических слоев, двумя чувствительными элементами 4 и 5 в форме сферических слоев, двумя дифференциальными интеграторами тока (ДИТ1) 6, (ДИТ2) 7 и сумматором 8.

Чувствительные элементы 2 и 3 первого датчика выполнены с угловыми размерами  $\theta_0 = 45^\circ$ . Датчик с такими угловыми размерами чувствительных элементов представлен в [12]. Сферические слои 4 и 5 являются частями чувствительных элементов (2+4) и (3+5), входящими в состав второго датчика. Они в сумме образуют чувствительные элементы в форме полусферы, имеющей угловой размер  $\theta_0 = 90^\circ$ . Датчик с такими угловыми размерами чувствительных элементов представлен в [13]. Все чувствительные элементы изолированы между собой и сферическим основанием.

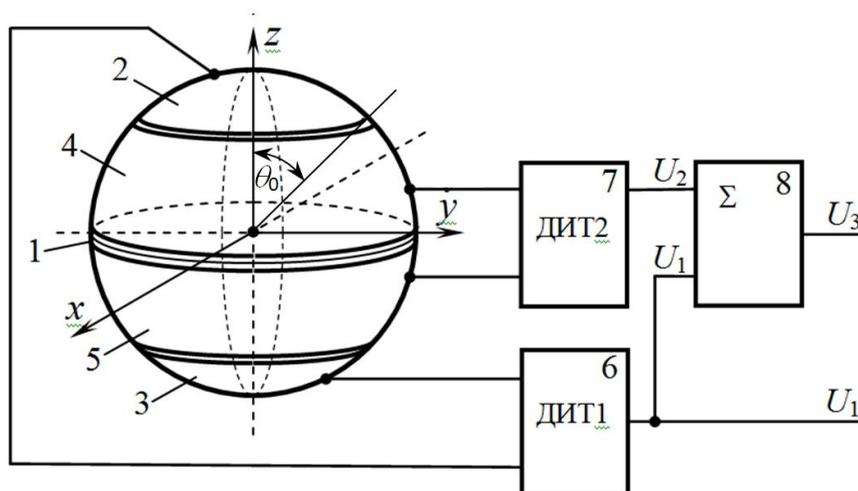


Рис. 1. Сдвоенный датчик напряженности электрического поля.

1 — проводящее сферическое основание; 2, 3 — чувствительные элементы в форме сферических сегментов; 4, 5 — чувствительные элементы в форме сферических слоев; ДИТ1 (6), ДИТ2 (7) — дифференциальные интеграторы тока;  $\Sigma$  (8) — сумматор

Дифференциальные интеграторы тока 6 и 7 снимают разности зарядов с диаметрально противоположных электродов датчика 2, 3 и 4, 5 и преобразуют их в напряжения  $U_1(t)$  и  $U_2(t)$ , пропорциональные напряженности ЭП  $E$ . Напряжение  $U_1(t) = kE_1$  является выходным напряжением первого датчика. Выходное напряжение  $U_3(t) = kE$  второго датчика получается суммированием напряжений  $U_1(t)$  и  $U_2(t)$  сумматором 8, объединяющим электрические заряды с элементов 2+4 и 3+5. Таким образом, сдвоенным датчиком формируются напряжения  $U_1(t)$  и  $U_3(t)$ , пропорциональные напряженностям  $E_1$  и  $E_2$ , которые необходимы для реализации метода измерений.

### ТЕОРИЯ

В основе теоретического обоснования нового метода измерений положены следующие априорно известные факты:

1)  $E_1$  и  $E_2$  — два одновременно измеренных в одной точке ЭП с напряженностью  $E_0$  значения напряженностей;

2) значения напряженностей  $E_1$  и  $E_2$  определены с противоположными по знаку погрешностями, соответственно равными  $+\delta_1$  и  $-\delta_2$ ;

3) значения погрешностей  $+\delta_1$  и  $-\delta_2$  определяются по известной формуле [14]

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

полученной в результате исследования взаимодействия сферического датчика с полем точечного заряда. В выражении (1):  $a = R/d$  — пространственный диапазон измерений (относительное расстояние до источника поля);  $R$  — радиус сферического основания датчика;  $d$  — расстояние от центра сферического основания датчика до источника поля;  $\theta_0$  — угловой размер чувствительного элемента.

Выражение (1) позволяет рассчитать погрешности  $\delta_1$  и  $\delta_2$  для первого и второго датчиков, входящих в состав сдвоенного датчика. Для первого датчика с угловым размером  $\theta_0 = 45^\circ$  и второго датчика с угловым размером  $\theta_0 = 90^\circ$  чувствительных элементов погрешности  $\delta_1(a)$  и  $\delta_2(a)$  будут соответственно равны

$$\delta_1(a) = 100 \times \left[ \frac{4}{3a^2} \times \left( 1 - \frac{(1-a^2)(\sqrt{1+\sqrt{2}a+a^2} + \sqrt{1-\sqrt{2}a+a^2})}{2\sqrt{1+a^4}} \right) - 1 \right], \quad (2)$$

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

С учетом погрешностей  $\delta_1(a)$  и  $\delta_2(a)$  можно записать

$$E_1(a) = E_0 [1 + \delta_1(a)] \text{ и } E_2(a) = E_0 [1 + \delta_2(a)], \quad (4)$$

где  $E_0$  — напряженность ЭП в точке измерения до внесения датчика.

Используя рассчитанные по выражениям (2)–(4) значения  $E_1(a)$  и  $E_2(a)$ , введем в рассмотрение коэффициент  $k_0(a)$  и рассчитаем его значения по формуле

$$k_0(a) = \frac{E_1(a)}{E_2(a)}. \quad (5)$$

Результаты расчетов запишем в табл. 1.

По данным табл. 1 составлена эмпирическая формула функциональной зависимости  $a(k_0)$

$$a = R/d = 1.123\sqrt{k_0 - 0.94} - 0.21. \quad (6)$$

**Табл. 1.** Значения коэффициента  $k_0$  в зависимости от пространственного диапазона измерения  $a$

$a$	$k_0$	$a$	$k_0$
0.05	1.004	0.55	1.423
0.1	1.015	0.60	1.495
0.15	1.033	0.65	1.568
0.20	1.058	0.70	1.64
0.25	1.091	0.75	1.711
0.30	1.131	0.80	1.779
0.35	1.178	0.85	1.843
0.40	1.231	0.90	1.901
0.45	1.29	0.95	1.954
0.50	1.355	—	—

Выражение (6) позволяет по коэффициенту  $k_0$  определять относительное расстояние  $a$  до источника поля в каждой точке измерений. Зная относительное расстояние  $a$ , по выражениям (2) и (3) можно найти погрешности  $\delta_1$  и  $\delta_2$  полученных в каждой точке измерений двух измеренных значений  $E_1$  и  $E_2$ .

Метод измерений, предложенный авторами в работе [9], рекомендует нахождение результата измерений как среднее из двух измеренных значений  $E_1$  и  $E_2$ . Это позволяет уменьшить погрешность измерения напряженности  $E$  исходного ЭП  $E_0$ .

Действительно, если учесть при нахождении среднего значения выражения (4), то получим

$$E = \frac{E_1 + E_2}{2} = E_0 \left( 1 + \frac{\delta_1 + \delta_2}{2} \right) = E_0(1 + \delta), \quad (7)$$

где

$$\delta = \frac{\delta_1 + \delta_2}{2} \quad (8)$$

погрешность среднего значения напряженности  $E$ . В выражении (8) погрешность  $\delta_1$  положительная, а погрешность  $\delta_2$  отрицательная.

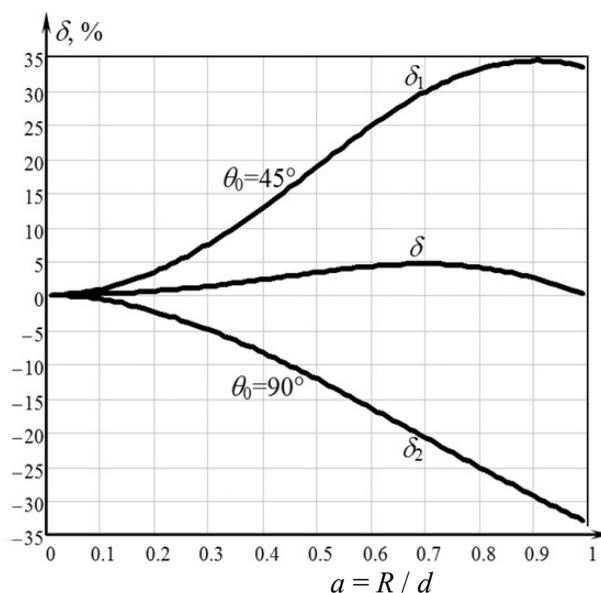
Таким образом, вычисляя в каждой точке измерения  $k_0$  по выражению (5) и относительное расстояние  $a$  по выражению (6), можно по выражениям (2), (3) и (8) определить расстояние  $d = R/a$  до источника поля, погрешности  $\delta_1$ ,  $\delta_2$ ,  $\delta$  измеренных значений  $E_1$  и  $E_2$  и результата измерения  $E$  в данной точке измерения.

Определяя результат измерения  $E$  как среднее значение двух одновременно измеренных в одной точке ЭП напряженностей  $E_1$  и  $E_2$ , достигаем уменьшения результирующей погрешности  $\delta$  измерения  $E$ . График, подтверждающий уменьшение погрешности  $\delta$ , построенной в зависимости от пространственного диапазона  $a$ , представлен на рис. 2.

Согласно графику погрешность измерения положительна и не превышает 4.6% во всем пространственном диапазоне  $a$  от нуля до единицы.

На основании полученных результатов можно сформулировать новый метод измерения напряженности ЭП. Последовательность действий, реализующих предлагаемый метод измерений, сводится к следующему:

- 1) помещению сдвоенного датчика в исследуемую точку ЭП;
- 2) ориентации сдвоенного датчика в ЭП по направлению поля;
- 3) измерению одновременно двух модулей вектора напряженности ЭП  $E_1$  и  $E_2$  в данной точке пространства;



**Рис. 2.** Графики погрешностей  $\delta_1(a)$  и  $\delta_2(a)$  датчиков с угловыми размерами чувствительных элементов  $\theta_0 = 45^\circ$  и  $\theta_0 = 90^\circ$  и погрешности  $\delta(a)$

4) вычислению по измеренным значениям  $E_1$  и  $E_2$  коэффициента  $k_0 = E_1/E_2$ ;

5) вычислению по формуле  $a = R/d = 1.123\sqrt{k_0 - 0.94} - 0.21$  относительного расстояния до источника поля;

6) нахождению среднего значения модуля вектора напряженности электрического поля  $E = (E_1 + E_2)/2$ , принимаемого за результат измерения;

7) определению по найденным значениям  $k_0$  и  $a$  погрешностей  $\delta_1$ ,  $\delta_2$  и  $\delta$  измеренных  $E_1$ ,  $E_2$  и вычисленного  $E$  значений. Погрешности определяются по выражениям (2), (3) и (8).

Поскольку погрешности  $\delta_1$ ,  $\delta_2$  сдвоенного датчика получены при его нахождении в поле точечного заряда, то важно отметить, что датчик в реальных полях будет измерять эквивалент напряженности поля точечного заряда.

### ПОДТВЕРЖДЕНИЕ АДЕКВАТНОСТИ МЕТОДА

Подтверждение будем проводить численным экспериментом. Для этого по формулам (2) и (3) для выбранных значений пространственного диапазона  $a$  рассчитаем погрешности измерений  $\delta_1(a)$  и  $\delta_2(a)$  датчиков с угловыми размерами  $\theta_0 = 45^\circ$  и  $\theta_0 = 90^\circ$  их чувствительных элементов. Результаты расчета запишем в табл. 2. В нее же запишем погрешность  $\delta$  результата измерений.

**Табл. 2.** Рассчитанные по (2), (3) значения погрешностей  $\delta_1(a)$ ,  $\delta_2(a)$  и результирующей погрешности  $\delta(a)$

$a$	$\delta_1, \%$	$-\delta_2, \%$	$\delta, \%$
0.1	0.87	0.58	0.16
0.3	7.56	4.91	1.33
0.5	18.93	12.22	3.34
0.7	29.92	20.79	4.57
0.9	34.37	29.32	2.53
0.99	33.52	32.94	0.29

По выражению (4) рассчитаем относительные значения  $E_1^* = E_1/E_0$  и  $E_2^* = E_2/E_0$ . Запишем их в табл. 3 и там же укажем среднее относительное значение  $E^* = E/E_0$ , рассчитанное по выражению (7).

Воспользовавшись выражением (5), рассчитаем в каждой точке измерений коэффициент  $k_0$  и запишем его в табл. 4.

**Табл. 3.** Рассчитанные по (4) относительные значения напряженностей

$a$	$E_1^*$	$E_2^*$	$E^*$
0.1	1.008	0.994	1
0.3	1.076	0.95	1.014
0.5	1.190	0.878	1.034
0.7	1.3	0.792	1.046
0.9	1.344	0.706	1.026
0.99	1.336	0.67	1.004

**Табл. 4.** Рассчитанные значения коэффициента  $k_0$ , параметра  $a^*$  по эмпирической формуле (6) и расхождения  $\gamma$

$a$	$k_0$	$a^*$	$\gamma, \%$
0.1	1.014	0.095	-5.0
0.3	1.133	0.283	-5.7
0.5	1.355	0.513	2.6
0.7	1.64	0.73	4.3
0.9	1.904	0.893	-0.8
0.99	1.994	0.943	4.8

Подставим коэффициенты  $k_0$  в эмпирическую формулу (6); определим предполагаемые значения  $a^*$  параметра  $a$ , соответствующего данной точке измерений, и оценим погрешность расхождения  $\gamma$  между ними. По проведенным расчетам погрешность расхождения  $\gamma$  между эмпирически определенными параметрами  $a^*$  и заданными параметрами  $a$  по модулю не превышает 5.7%. Результаты расчетов запишем также в табл. 4.

Вычисленные значения параметра  $a^*$  из табл. 4 подставим в выражения (2) и (3) и рассчитаем погрешности  $\delta_1^*$  и  $\delta_2^*$  измеренных относительных значений напряженностей  $E_1^*$  и  $E_2^*$  первым и вторым датчиками и погрешность  $\delta^*$  результата измерений  $E^*$ . Результаты расчетов запишем в табл. 5.

При сравнении данных табл. 2 и табл. 5 устанавливаем хорошее согласование погрешностей, рассчитанных по теоретическим значениям  $a$  и эмпирическим значениям  $a^*$  пространственного диапазона измерений.

Таким образом, рассмотренный метод позволяет не только определить результат измерения  $E$  с малой погрешностью  $\delta$ , но и инструментально определять как эту погрешность, так и расстояние до источника поля как  $d = R/a$ .

## ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Технический прогресс не стоит на месте. Он требует как можно больше возможностей применяемых как методов, так и средств измерений. Рассмотренный в работе метод сильно отличается от известных методов измерений, направленных в большинстве своем на измерение вектора напряженности ЭП, его модуля и составляющих. В пределах этих направлений известные методы обеспечивают: повышение чувствительности и точности измерений, упрощение процесса измерений и расширение пространственного диапазона измерений. В основе известных методов измерения

**Табл. 5.** Рассчитанные значения погрешностей  $\delta_1^*$ ,  $\delta_2^*$  и  $\delta^*$  через параметр  $a^*$

$a$	$a^*$	$\delta_1^*, \%$	$-\delta_2^*, \%$	$\delta^*, \%$
0.1	0.095	0.787	0.523	0.132
0.3	0.283	6.758	4.397	1.181
0.5	0.513	18.931	12.219	3.356
0.7	0.73	29.923	20.79	4.566
0.9	0.893	34.367	29.319	2.524
0.99	0.943	33.527	32.942	0.293

напряженности ЭП лежат одинарные и в большей части двойные электроиндукционные датчики. Создание датчика нового типа [10, 11] — сдвоенного датчика — позволило расширить его возможности, а именно одновременного измерения в одной точке поля двух значений напряженностей с противоположными по знаку погрешностями. Эта особенность сдвоенного датчика сделала возможным создание метода измерений, позволяющего не только измерять модуль вектора напряженности ЭП с повышенной точностью, но и инструментально определять его погрешность в данной точке измерений и расстояние от источника поля. Метод с такими возможностями является новым и рассматривается впервые [15].

### ВЫВОДЫ

В результате проведенной работы дана характеристика сдвоенного датчика и обоснована его пригодность для построения нового метода измерений. Установлена эмпирическая зависимость относительного расстояния  $a$  от отношения напряженностей  $k_0 = E_1 / E_2$ . На основании этого разработаны теоретические основы и предложение нового метода измерений, позволяющего определять модуль вектора напряженности электрического поля, а также его погрешность и расстояние до источника поля. Метод подтвержден численным экспериментом.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Юркевич В.М., Кондратьев Б.Л. О методике измерения напряженности и других характеристик электрического поля // Измерительная техника. 1980. № 5. С. 57–59.
2. Чугунов С.А., Юркевич В.М. Расширение зоны измерения параметров электрического поля при применении зондового метода // Измерительная техника. 1981. № 1. С. 33–35.
3. Кондратьев Б.Л., Юркевич В.М. Измерения в электрическом поле с выравниванием потенциалов // Тр. Моск. энерг. ин-та. М., 1979. Вып. 432. С. 20–22.
4. Колдекотт Р, Деворе Р.В., Себо С.А. Измерение электрических полей на подстанциях сверхвысокого напряжения // Электрические станции сети и системы. Экспресс информация. 1977. № 19. С. 10–26.
5. Chauzy S., Magnes P. Mise au point d'un mesureur de champ électrique alternatif 50 Hz // Rev. gen. elec. 1988. No. 7. С. 27–38.
6. Бирюков С.В. Метод измерения напряженности электрического поля путем выравнивания составляющих // Датчики и преобразователи информации систем измерения, контроля и управления (Датчик-2002). Сб. ма-

- тер. XIV науч.-техн. конф. / Под ред. В.Н. Азарова. М.: МГИЭМ, 2002. С. 25–26.
7. Бирюков С.В. Методы измерения напряженности неоднородных электрических полей вблизи источников поля трехкоординатными датчиками // Изв. вузов. Электромеханика. 2003. № 4. С. 22–25. URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=9220771>
  8. Бирюков С.В., Тюкина Л.В., Тюкин А.В. Способ измерения напряженности электрического поля сдвоенным датчиком. Патент № 2773868 RU. Оpubл. 14.06.2022. Бюл № 17. URL: [https://yandex.ru/patents/doc/RU2773868C1\\_20220614](https://yandex.ru/patents/doc/RU2773868C1_20220614)
  9. 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
  10. Бирюков С.В., Тюкина Л.В. . Сдвоенный датчик для измерения напряженности электрического поля с составными чувствительными элементами. Патент № 210806 RU U1 РФ. Оpubл. 05.05.2022. Бюл. № 13. URL: [https://yandex.ru/patents/doc/RU210806U1\\_20220505](https://yandex.ru/patents/doc/RU210806U1_20220505)
  11. Бирюков С.В., Тюкина Л.В., Тюкин А.В. Сдвоенные сферические датчики напряженности низкочастотных электрических полей нового поколения // Омский научный вестник. 2021. № 5 (179). С. 62–67. DOI: 10.25206/1813-8225-2021-179-62-67
  12. Щигловский К.Б., Аксельрод В.С. Приборы для измерения параметров электростатического поля и их калибровка // Измерительная техника. 1978. № 5. С. 63–65.
  13. Мисакян М., Коттер Ф.Р., Калер Р.Л. Миниатюрный датчик электрического поля // Приборы для научных исследований. 1978. № 7. С. 52–55.
  14. Влияние электроустановок высокого напряжения на окружающую среду: Переводы докладов Международной конференции по большим электрическим системам (СИГРЭ-86) / Под ред. Ю.П. Шкарина. М.: Энергоатомиздат, 1988. 104 с.
  15. Бирюков С.В., Тюкина Л.В., Тюкин А.В. Способ измерения напряженности электрического поля датчиком сдвоенного типа. Патент № 2774654 RU, МКИ G 01 R 29/12 (Россия). Оpubл. 21.06.2022. Бюл № 18. URL: [https://yandex.ru/patents/doc/RU2774654C1\\_20220621](https://yandex.ru/patents/doc/RU2774654C1_20220621)

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

Контакты: Бирюков Сергей Владимирович,  
sbiryukov154@mail.ru

Материал поступил в редакцию 10.07.2023

## METHOD FOR MEASURING THE ELECTRIC FIELD STRENGTH WITH DETERMINING THE ERROR OF THE MEASUREMENT RESULT AND THE DISTANCE TO THE FIELD SOURCE

S. V. Biryukov

Omsk State Technical University, Omsk, Russia

Electric fields of a technogenic nature, surrounding technical and biological objects have adverse effects on them. This leads to the need to control and measure the parameters of electric fields. In this regard, the creation of new methods and means for measuring the electric field strength of a technogenic nature is an urgent task. The paper considers a method for measuring the electric field strength, that allows not only measuring the value of the field strength, but also determining its error from the measured values and estimating the distance to the field source. The method is based on a dual electric induction spherical electric field strength sensor. The sensor allows you to simultaneously measure two strength values at the same point of the field, with errors of opposite signs. The use of two intensity values in the method during one measurement session made it possible to determine the error at each measurement point and the distance to the field source. The possibility of using the method of measuring the electric field strength to determine the error of the measurement result and the distance to the field source at each point of the field is considered for the first time.

*Keywords:* measurement method, electric field strength, dual sensor, error estimate at each measurement point, distance to the field source

### REFERENCES

1. Yurkevich V.M., Kondrat'ev B.L. [On the method of measuring the intensity and other characteristics of the electric field]. *Izmeritel'naya tekhnika* [Measuring technique], 1980, no. 5, pp. 57–59. (In Russ.).
2. Chugunov S.A., Yurkevich V.M. [Expansion of the electric field measurement area when using the probe method]. *Izmeritel'naya tekhnika* [Measuring technique], 1981, no. 1, pp. 33–35. (In Russ.).
3. Kondrat'ev B.L., Yurkevich V.M. [Measurements in the electric field with potential equalization]. *Trudy Moskovskogo ehnergeticheskogo instituta* [Proceedings of the Moscow Energy Institute], 1979, no. 432, pp. 20–22. (In Russ.).
4. Koldekott P., Devore R.V., Sebo S.A. [Measurement of electric fields at ultra-high voltage substations]. *Ehlektricheskie stantsii seti i sistemy. Ehkspress informatsiya* [Network and system electrical stations. Express information], 1977, no. 19, pp. 10–26.
5. Chauzy S., Magnes P. Mise au point d'un mesureur de champ électrique alternatif 50 Hz. *Rev. gen. elec.*, 1988, no. 7, pp. 27–38. (In French).
6. Biryukov S.V. [Method of measuring electric field strength by aligning components]. *Sbornik materialov XIV nauchno-tekhnicheskoi konferentsii: "Datchiki i preobrazovatel'i informatsii sistem izmereniya, kontrolya i upravleniya (Datchik-2002)"* [Proc. XIV sci. pract. conf.: "Sensors and data converters of measuring, monitoring and control systems (Sensor-2002)"]. Ed. by V.N. Azarov. Moscow, MGIEM, 2002. P. 25–26. (In Russ.).
7. Biryukov S.V. [Methods of measuring non-uniform electric field intensity close to field sources by using three-coordinate sensors]. *Izvestiya vuzov. Ehlektromekhanika* [Bulletin of higher educational institutions. Electromechanics], 2003, no. 4, pp. 22–25. (In Russ.) URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=9220771>
8. Biryukov S.V., Tyukina L.V., Tyukin A.V. Sposob izmereniya napryazhennosti ehlektricheskogo polya sdvoennym datchikom. Patent RF no. 2773868. [Method of measuring electric field strength by dual sensor]. Prioritet 14.06.2022. Byul. No. 17. (In Russ.). URL: [https://yandex.ru/patents/doc/RU2773868C1\\_20220614](https://yandex.ru/patents/doc/RU2773868C1_20220614)
9. Biryukov S.V., Tyukina L.V., Tyukin A.V. [Method of measuring intensity of heterogeneous electric fields by average value]. *Omskii nauchnyi vestnik* [Scientific journals of OMSTU], 2021, no. 4 (178), pp. 67–74. DOI: 10.25206/1813-8225-2021-178-67-74 (In Russ.).
10. Biryukov S.V., Tyukina L.V. Sdvoennyi datchik dlya izmereniya napryazhennosti ehlektricheskogo polya s sostavnymi chuvstvitel'nymi ehlementami [Dual sensor for measuring electric field strength with composite sensing elements]. Patent RF no. 210806 RU U1. Prioritet 05.05.2022. Byul. No. 13. (In Russ.) URL: [https://yandex.ru/patents/doc/RU210806U1\\_20220505](https://yandex.ru/patents/doc/RU210806U1_20220505)
11. Biryukov S.V., Tyukina L.V., Tyukin A.V. [Next generation dual spherical low frequency electric field intensity sensors]. *Omskii nauchnyi vestnik* [Scientific journals of OMSTU], 2021, no. 5 (179), pp. 62–67. (In Russ.). DOI: 10.25206/1813-8225-2021-179-62-67
12. Shchiglovskii K.B., Aksef'rod V.S. [Instruments for measuring electrostatic field parameters and their calibration].

- Izmeritel'naya tekhnika* [Measuring technique], 1978, no. 5, pp. 63–65. (In Russ.)
13. Misakyan M., Kotter F.R., Kaler R.L. [Miniature electric field sensor]. *Pribory dlya nauchnykh issledovaniy* [Scientific instruments], 1978, no. 7, pp. 52–55. (In Russ.)
  14. Shkarin Yu.P. [Impact of high voltage electrical installations on the environment]. *Perevody dokladov Mezhdunarodnoi konferentsii po bol'shim ehlektricheskim sistemam (SIGREH-86)* [Transl. proc. int. conf.: "Large electrical systems (SIGRE-86)"]. Moscow, Ehnergoatomizdat Publ., 1988. 104 p. (In Russ.)
  15. Biryukov S.V., Tyukina L.V., Tyukin A.V. Sposob izmereniya napryazhennosti ehlektricheskogo polya datchikom sdvoennogo tipa [Method of measuring electric field strength by a dual-type sensor]. *Patent RF no. 2774654 RU, MKI G 01 R 29/12*. Prioritet 21.06.2022. Byul. No. 18. (In Russ.). URL: [https://yandex.ru/patents/doc/RU2774654C1\\_20220621](https://yandex.ru/patents/doc/RU2774654C1_20220621)

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

Article received by the editorial office on 10.07.2023

## INTRODUCTION

Among the wide variety of methods for measuring the electric field (EF) strength [1–7], aimed at improving the accuracy of measurements, sensitivity, simplifying the measurement process, etc., a new method stands out — the method of measuring by the average value [8, 9]. To implement the measurement method, it is required to have two measured values of the intensity  $E_1$  and  $E_2$  at the same field point, where the strength before the introduction of the sensor was  $E_0$ . The values of the strengths  $E_1$  and  $E_2$  differ from the strength  $E_0$  by the value of the error. An integral condition of the method of measurement by the average value is the opposite sign of these errors.

The use of the mean value measurement method required the creation of a new type of EF strength (EFS) sensors — dual sensors based on the phenomenon of electrical induction [10, 11]. The introduction of a new type of sensor has expanded their range.

Until now, two types of EFS electrical induction sensors have been known: single and double [12]. Single sensors have one sensitive element for each coordinate axis relative to the base of the sensor. Such sensors are sensitive to common mode and other interferences. Double sensors consist of two single sensors and have two diametrically opposed sensing elements relative to the base of the sensor along each coordinate axis. Sensors of this type in differential connection neutralize the influence of common mode and other interferences. So, dual sensors joined the single and double sensors. A special feature of dual sensors is the combination of two double sensors in one. In these sensors, two double sensors are located along each coordinate axis. This technical solution allowed the dual sensor to create two output signals proportional to the intensities  $E_1$  and  $E_2$ , measured with er-

rors of opposite signs at the same point in the field. The presence of redundant information about the field strength, namely two values  $E_1$  and  $E_2$ , can be used to determine the distance to the field source and the measurement error of  $E_0$ , the result of measuring the modulus of the vector  $E$ .

Further work will be based on the use of a dual single-axis EFS sensor oriented toward the EF.

In this regard, the purpose of this work is to create a new method for measuring the electric field strength based on a dual single-axis sensor, which makes it possible to determine the error of the measurement result and the distance to the source of the field.

## FORMULATION OF THE PROBLEM

To achieve this goal, it is necessary to solve the following tasks:

1) to characterize the dual sensor of EF strength and confirm its suitability for simultaneous measurement of two strength values  $E_1$  and  $E_2$  at the same point of the field and the possibility of using it in a new measurement method;

2) to establish the empirical dependence of the parameter  $a = R / d$ , characterizing the spatial measurement range ( $R$  is the radius of the spherical base of the sensor,  $d$  is the distance from the center of the sensor to the field source), on the ratio of the measured strengths  $k_0 = E_1 / E_2$ ;

3) to develop the theoretical foundations for constructing a new measurement method that makes it possible to determine the modulus of the EF strength vector, as well as its error and the distance to the field source;

4) to propose a new method for measuring the EF strength with the determination of the measurement error and the distance to the field source;

5) to verify the adequacy of the new measurement method with a numerical experiment.

### DUAL ELECTRIC FIELD SENSOR

The dual sensor required for the implementation of the measurement method, which allows simultaneously measuring two values of the field strengths  $E_1$  and  $E_2$  at a given point of the field, is described in [8, 9] and shown in Fig. 1.

**Fig. 1.** Dual sensor of electric field strength.

1 — conductive spherical base; 2, 3 — sensitive elements in the form of spherical segments; 4, 5 — sensitive elements in the form of spherical layers; DIT1 (6), DIT2 (7) — differential current integrators;  $\Sigma$  (8) — adder

The electroinductive double sensor consists of mechanical and measuring parts. The mechanical part combines two sensors and includes a conductive spherical base 1, two sensitive elements 2 and 3 in the form of spherical segments, and two sensitive elements 4 and 5 in the form of spherical layers 4 and 5. The measuring part includes two differential current integrators (DIT1) 6, (DIT2) 7 and an adder 8.

Sensitive elements 2 and 3 of the first sensor are made with angular dimensions  $\theta_0 = 45^\circ$ . A sensor with such angular dimensions of sensitive elements is presented in [12]. Spherical layers 4 and 5 are parts of the sensitive elements (2+4) and (3+5), which are parts of the second sensor. Together, they form sensitive elements in the form of a hemisphere with an angular size of  $\theta_0 = 90^\circ$ . A sensor with such angular sizes of sensitive elements is presented in [13]. All sensitive elements are isolated between themselves and the spherical base.

Differential current integrators 6 and 7 remove charge differences from diametrically opposite sensor electrodes 2, 3 and 4, 5 and convert them into voltages  $U_1(t)$  и  $U_2(t)$  proportional to the electric field strength  $E$ . The voltage  $U_1(t) = kE_1$  is the output voltage of the first sensor. The output voltage  $U_3(t) = kE$  of the second sensor is obtained by summing the voltages  $U_1(t)$  and  $U_2(t)$  by adder 8, which combines electric charges from elements 2+4 and 3+5. Thus, voltages  $U_1(t)$  and  $U_3(t)$  are formed by the dual sensor and proportional to the intensities  $E_1$  and  $E_2$ , which are necessary for the implementation of the measurement method.

### THEORY

The theoretical substantiation of the new measurement method is based on the following a priori known facts:

1)  $E_1$  and  $E_2$  are two simultaneously measured strength values at the same EF point with the strength  $E_0$ ;

2) the values of the  $E_1$  and  $E_2$  strengths are determined with errors opposite in sign, respectively equal to  $+\delta_1$  and  $-\delta_2$ ;

3) the error values  $+\delta_1$  and  $-\delta_2$  are determined using the well-known formula [14]

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

obtained as a result of studying the interaction of a spherical sensor with the field of a point charge. In expression (1):  $a = R / d$  is the spatial range of measurements (relative distance to the field source);  $R$  is the radius of the spherical base of the sensor;  $d$  is the distance from the center of the spherical base of the sensor to the field source;  $\theta_0$  is the angular size of the sensitive element.

Expression (1) allows calculating the errors  $+\delta_1$  and  $-\delta_2$  for the first and second sensors included in the dual sensor. For the first sensor with an angular size  $\theta_0 = 45^\circ$  and the second sensor with an angular size  $\theta_0 = 90^\circ$  of sensitive elements, the errors  $\delta_1(a)$  and  $\delta_2(a)$  will be respectively equal to

$$\delta_1(a) = 100 \times \left[ \frac{4}{3a^2} \times \left( 1 - \frac{(1-a^2)(\sqrt{1+\sqrt{2}a+a^2} + \sqrt{1-\sqrt{2}a+a^2})}{2\sqrt{1+a^4}} \right) - 1 \right], \quad (2)$$

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

Taking into account the errors  $\delta_1(a)$  and  $\delta_2(a)$ , we can write

$$E_1(a) = E_0 [1 + \delta_1(a)] \text{ and } E_2(a) = E_0 [1 + \delta_2(a)], \quad (4)$$

where  $E_0$  is the electric field strength at the measurement point before inserting the sensor.

Using the values of  $E_1(a)$  and  $E_2(a)$  calculated using expressions (2)–(4), we introduce the coefficient

$k_0(a)$  into consideration and calculate its values using the formula

$$k_0(a) = \frac{E_1(a)}{E_2(a)}. \quad (5)$$

The results of the calculations are presented in Tab. 1.

**Tab. 1.** The values of the coefficient  $k_0$  depending on the spatial measurement range  $a$

According to Tab. 1, an empirical formula for the functional dependence  $a(k_0)$  is

$$a = R/d = 1.123\sqrt{k_0 - 0.94} - 0.21. \quad (6)$$

Expression (6) allows, using the coefficient  $k_0$ , to determine the relative distance  $a$  to the field source at each measurement point. Knowing the relative distance  $a$ , using expressions (2) and (3) one can find the errors  $\delta_1$  and  $\delta_2$  obtained at each point of measurement of two values  $E_1$  and  $E_2$ .

The measurement method proposed by the authors in [9] recommends obtaining the measurement result as the average of two measured values  $E_1$  and  $E_2$ . This makes it possible to reduce the measurement error of the strength  $E$  of the initial EF  $E_0$ .

Indeed, if we take this into account when obtaining the average value of expression (4), then we get the error of the average value of strength  $E$

$$E = \frac{E_1 + E_2}{2} = E_0 \left( 1 + \frac{\delta_1 + \delta_2}{2} \right) = E_0(1 + \delta), \quad (7)$$

where

$$\delta = \frac{\delta_1 + \delta_2}{2}. \quad (8)$$

In expression (8), the error  $\delta_1$  is positive, and the error  $\delta_2$  is negative.

Thus, calculating  $k_0$  by expression (5) and the relative distance  $a$  by expression (6) at each measurement point, it is possible, using expressions (2), (3) and (8) determine the distance  $d = R/a$  to the field source, the errors  $\delta_1$ ,  $\delta_2$ ,  $\delta$  of measured values  $E_1$  and  $E_2$  and the measurement result  $E$  at a given measurement point.

Defining the measurement result  $E$  as the average value of two strengths  $E_1$  and  $E_2$  measured simultaneously at the same point of the EF, we achieve a decrease in the resulting error  $\delta$  of measurement of  $E$ . A graph confirming the decrease in the error  $\delta$ , built depending on the spatial range  $a$ , is shown in Fig. 2.

**Fig. 2.** Graphs of errors  $\delta_1(a)$  and  $\delta_2(a)$  of sensors with angular dimensions of sensitive elements  $\theta_0 = 45^\circ$  and  $\theta_0 = 90^\circ$  and error  $\delta(a)$

According to the graph, the measurement error is positive and does not exceed 4.6% in the entire spatial range of  $a$  from 0 to 1.

Based on the results obtained, a new method for measuring EF strength can be formulated. The sequence of actions that implements the proposed measurement method is as follows:

1) placing a dual sensor at the investigated point of the electric field;

2) orientation of the dual sensor in the electric field in the direction of the field;

3) measuring simultaneously two modules of the electric field strength vector  $E_1$  and  $E_2$  at the investigated point in space;

4) calculation of the coefficient  $k_0 = E_1 / E_2$  using the measured values of  $E_1$  and  $E_2$ ;

5) calculation of the relative distance to the source of the field using the formula  $a = R/d = 1.123\sqrt{k_0 - 0.94} - 0.21$ ;

6) obtaining the average value of the module of the electric field strength vector  $E = (E_1 + E_2) / 2$ , taken as the measurement result;

7) determination of the errors  $\delta_1$ ,  $\delta_2$  and  $\delta$  of the measured  $E_1$ ,  $E_2$  and calculated  $E$  values using the obtained values of  $k_0$  and  $a$ . The errors are determined by expressions (2), (3) and (8).

Since the errors  $\delta_1$ ,  $\delta_2$  of the dual sensor are obtained when it is in the field of a point charge, it is important to note that the sensor in real fields will measure the equivalent of the field strength of a point charge.

#### VALIDATION OF METHOD RELEVANCE

Confirmation will be carried out with a numerical experiment. To do this, using formulas (2) and (3) for the selected values of the spatial range  $a$ , we calculate the measurement errors  $\delta_1(a)$  and  $\delta_2(a)$  of sensors with angular dimensions  $\theta_0 = 45^\circ$  and  $\theta_0 = 90^\circ$  of their sensitive elements. We list the calculation results in Tab. 2. In it, we also write the error  $\delta$  of the measurement result.

**Tab. 2.** Calculated values of errors  $\delta_1(a)$ ,  $\delta_2(a)$  and resulting error  $\delta(a)$  using (2), (3)

Using expression (4), we calculate the relative values  $E_1^* = E_1 / E_0$  and  $E_2^* = E_2 / E_0$ . We write them down in Tab. 3 and in the same table we indicate the average relative value  $E^* = E / E_0$ , calculated by expression (7).

**Tab. 3.** The relative strength values calculated using (4)

Using expression (5), we calculate the coefficient  $k_0$  at each measurement point and write it down in Tab. 4.

**Tab. 4.** The calculated values of the coefficient  $k_0$ , the parameter  $a^*$  according to the empirical formula (6), and discrepancy  $\gamma$

Let us substitute the coefficients  $k_0$  into the empirical formula (6) and determine the expected values  $a^*$  of the parameter  $a$  corresponding to this measurement point and estimate the error of the discrepancy  $\gamma$  between them. According to the calculations carried out, the error in the discrepancy  $\gamma$  between the empirically determined parameters  $a^*$  and the given parameters  $a$  does not exceed 5.7% in absolute value. We also write down the calculation results in the Tab. 4.

The calculated values of the parameter  $a^*$  from Tab. 4 we substitute into expressions (2) and (3) and calculate the errors  $\delta_1^*$  and  $\delta_2^*$  of the measured relative values of the strengths  $E_1^*$  and  $E_2^*$  using the first and second sensors and the error  $\delta$  of the measurement result  $E^*$ . The results of the calculations are recorded in Tab. 5.

**Tab. 5.** Values of errors  $\delta_1^*$ ,  $\delta_2^*$  and  $\delta^*$  calculated using parameter  $a^*$

When comparing the data in Tab. 2 and 5 we see a good agreement between the errors calculated from the theoretical values of  $a$  and the empirical values of  $a^*$  of the spatial measurement range.

Thus, the considered method allows not only to de-

termine the measurement result  $E$  with a small error  $\delta$ , but also instrumentally to determine both this error and the distance to the field source as  $d = R / a$ .

### THE DISCUSSION OF THE RESULTS

Technological progress does not stand still. It requires as many the applied methods and measuring instruments as possible. The method considered in the work is very different from the known measurement methods aimed mostly at measuring the EF strength vector, its module, and components. Within these areas, known methods provide: increasing the sensitivity and accuracy of measurements, simplifying the measurement process, and expanding the spatial range of measurements. The known methods for measuring the electric field strength are based on single and, for the most part, double electroinductive sensors. The creation of a new type of sensor [10, 11] — a dual sensor — made it possible to expand its capabilities, namely, the simultaneous measurement of two values of strengths with errors opposite in sign at the same point of the field. This feature of the dual sensor made it possible to create a measurement method that allows not only to measure the magnitude of the electric field strength vector with increased accuracy, but also to instrumentally determine its error at a given measurement point and the distance from the field source. A method with such capabilities is new and is being considered for the first time [15].

### CONCLUSIONS

As a result of the work carried out, a characteristic of a dual sensor is given, and its suitability for constructing a new measurement method is substantiated. The empirical dependence of the relative distance  $a$  on the ratio of strengths  $k_0 = E_1 / E_2$ . Based on this, the theoretical foundations and the proposal of a new measurement method have been developed that allow determining the absolute value of the electric field strength vector, as well as its error and the distance to the field source. The method is confirmed with a numerical experiment.