



# ЭЛЕКТРОНИКА, ФОТОНИКА, ПРИБОРОСТРОЕНИЕ И СВЯЗЬ

УДК 621.317.328  
DOI: 10.25206/1813-8225-2024-189-110-118  
EDN: PGYOVY

**С. В. БИРЮКОВ**

Омский государственный  
технический университет,  
г. Омск

## КОНЦЕПЦИЯ СОЗДАНИЯ ИЗМЕРИТЕЛЯ НАПРЯЖЕННОСТИ ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ПОЛЯ С ОПРЕДЕЛЕНИЕМ ПОГРЕШНОСТИ РЕЗУЛЬТАТА ИЗМЕРЕНИЙ И РАССТОЯНИЯ ДО ИСТОЧНИКА ПОЛЯ

Рассмотрена новая концепция построения измерителя напряженности электрического поля. Концепция заключается в том, что наряду с измерением модуля вектора напряженности электрического поля одновременно инструментальному определению подлежит погрешность результата измерения и расстояние до источника поля. В основу измерителя поля положен новый сдвоенный датчик и метод измерения напряженности электрического поля. Возможности метода измерения определять погрешность и расстояние до источника поля обеспечивает сдвоенный электроиндукционный сферический датчик. Особенностью сдвоенного датчика является способность одновременно выдавать два измеренных в одной точке поля значения напряженности, полученных с разными по знаку погрешностями. Эта особенность позволила получать результат измерения как среднее значение и двух измеренных и тем самым уменьшить погрешность его измерения. Наличие двух одновременно измеренных значений напряженности поля также позволило получить эмпирическую формулу для определения относительного расстояния до источника в каждой точке измерений. Полученные значения относительных расстояний сделали возможным по известным формулам определить погрешность результата измерения и расстояние от центра датчика до источника поля. Возможность измерителя поля одновременно инструментально определять погрешность результата измерения и расстояние до источника поля рассматривается впервые.

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

**Введение.** Измерители напряженности электрического поля (ЭП) промышленной частоты позволяют обеспечить контроль над интенсивностью ЭП техногенной природы. Техногенные поля создаются вокруг мощных энергетических систем промышленной частоты напряжением 500, 750 и 1150 кВ и выше. К таким энергетическим системам можно отнести электрические подстанции (ПС), линии электропередач (ЛЭП) и др. Электрические поля указанных источников оказывают негативное воздействие как на технические объекты, так и на растительный и животный мир [1, 2]. В связи с этим были разработаны санитарные нормы и правила [3], регламентирующие время нахождения в зонах электрических полей ЛЭП и ПС высокого и сверхвысокого напряжения. Для проведения контроля и измерения напряженности ЭП в России используется большой перечень приборов [4–12]. Однако они имеют большую погрешность ~20 %, и ни один из них не позволяет инструментально определять как погрешность результата измерения, так и расстояние от датчика до источника поля. Последнее важно для исключения контакта с источником поля. Поэтому целью данной работы будет рассмотрение концепции создания измерителя напряженности ЭП с определением погрешности результата измерений и расстояния от датчика до источника поля.

**Постановка задачи.** Для достижения поставленной цели сформулируем следующие задачи:

- 1) выбрать метод измерения напряженности ЭП, позволяющий определять погрешность результата измерений и расстояние до источника поля;
- 2) разработать структурную схему измерителя напряженности ЭП, реализующего выбранный метод измерений;
- 3) выбрать датчик напряженности ЭП, пригодный для реализации метода измерений в измерителе напряженности ЭП;
- 4) проверить численным экспериментом работоспособность измерителя напряженности, используя выбранный метод измерения.

**Выбор и теоретическое обоснование метода измерений.** Существует большое многообразие методов измерений напряженности ЭП [13–23]. В основном они направлены на повышение чувствительности и точности измерений, упрощения процесса измерений и многое другое. Среди них можно выделить три новых метода: метод измерения по среднему значению [20, 21], метод измерения датчиком сдвоенного типа [22] и метод измерения с использованием датчика сдвоенного типа [23]. Все новые методы используют электроиндукционный сферический датчик сдвоенного типа. Такой датчик позволяет получать в одной точке поля

с напряженностью  $E_0$  два измеренных значения напряженностей  $E_1$  и  $E_2$ , отличающихся от напряженности  $E_0$  на значение погрешностей  $\delta_1$  и  $\delta_2$ . При этом неотъемлемым условием измерения является противоположность по знаку погрешностей  $\delta_1$  и  $\delta_2$ . Эти методы определяют среднее между измеренными значениями  $E_1$  и  $E_2$  и тем самым уменьшают погрешность измерения исходного ЭП  $E_0$ . Однако метод измерения по среднему значению [20, 21] реализует не все возможности сдвоенного датчика, позволяющего в одной точке поля получать два значения напряженностей  $E_1$  и  $E_2$ . Развитием метода измерений по среднему значению являются два других метода [22, 23]. Метод измерения датчиком сдвоенного типа [22] наряду с определением среднего значения позволяет определять также погрешность среднего значения, принимаемого за результат измерения, но не позволяет определять расстояние от датчика до источника поля. Описанный в работе [23] метод измерения с использованием датчика сдвоенного типа позволяет определять среднее значение результата измерений, его погрешность, а также расстояние от датчика до источника поля. В связи с этим для построения измерителя напряженности ЭП воспользуемся методом измерений, приведенным в работе [23].

В основе метода измерений лежит сдвоенный датчик напряженности ЭП [24]. Поскольку сдвоенный датчик совмещает два двойных датчика в одном, то он вырабатывает два выходных сигнала, пропорциональных значениям напряженностям  $E_1$  и  $E_2$ , измеренных в одной точке поля с противоположными по знаку погрешностями  $\delta_1$  и  $\delta_2$ . С учетом этих погрешностей можно записать

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

Тогда среднее значение из них, принимаемое за результат измерения, определится как

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

где

$$\delta = \frac{\delta_1 + \delta_2}{2} \quad (3)$$

погрешность результата измерения  $E$ .

Для первого и второго датчиков, входящих в состав сдвоенного датчика, значения погрешностей  $\delta_1$  и  $\delta_2$  в зависимости от пространственного диапазона измерений  $a$  и углового размера  $\theta_0$  чувствительных элементов датчиков определяются по формуле, приведенной в работе [2],

$$\delta(a, \theta_0) = \left[ \frac{1}{3a^2 \sin^2 \theta_0} \left( 2 - \frac{1 - a^2}{\sqrt{1 - 2a \cos \theta_0 + a^2}} - \frac{1 - a^2}{\sqrt{1 + 2a \cos \theta_0 + a^2}} \right) - 1 \right] \cdot 100, \quad (4)$$

где  $a = R/d$  — пространственный диапазон измерений (относительное расстояние до источника поля);  $R$  — радиус сферического корпуса датчика;  $d$  — расстояние от центра сферического корпуса датчика до источника поля. Для первого и второго датчиков угловые размеры чувствительных элемен-

тов соответственно равны  $\theta_0 = 45^\circ$  и  $\theta_0 = 90^\circ$  [25, 26].

С учетом угловых размеров чувствительных элементов первого и второго датчиков упростим выражение (4) и запишем для каждого из них выражения погрешностей  $\delta_1(a)$  и  $\delta_2(a)$

$$\delta_1(a) = \left[ \frac{4}{3a^2} \left( 1 - \frac{(1 - a^2)(\sqrt{1 + \sqrt{2}a + a^2} + \sqrt{1 - \sqrt{2}a + a^2})}{2\sqrt{1 + a^4}} \right) - 1 \right] \cdot 100, \quad (5)$$

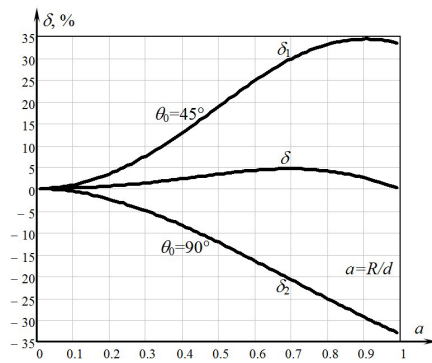


Рис. 1. Графики погрешностей  $\delta_1(a)$  и  $\delta_2(a)$  первого и второго датчиков и результирующей погрешности сдвоенного датчика  $\delta(a)$

$$\delta_2(a) = \left[ \frac{2}{3a^2} \left( 1 - \frac{1-a^2}{\sqrt{1+a^2}} \right) - 1 \right] \cdot 100. \quad (6)$$

Построим по выражениям (5), (6) и (3) графики погрешностей  $\delta_1(a)$  и  $\delta_2(a)$  для первого и второго датчиков и график результирующей погрешности  $\delta(a)$  и представим их на рис. 1.

Из графиков рис. 1 следует, что погрешность  $\delta_1(a)$  первого датчика положительная. Её максимальное значение  $\delta_{1\max}(0,9) = 34,37\%$  во всем пространственном диапазоне измерений  $0 \leq a \leq 1$ . Погрешность  $\delta_2(a)$  второго датчика отрицательная и во всем пространственном диапазоне измерения  $0 \leq a \leq 1$  её максимальное значение  $\delta_{2\max}(0,99) = -32,94\%$ . Противоположность по знаку погрешностей  $\delta_1(a)$  и  $\delta_2(a)$  требуется для реализации метода измерений и позволяет получить среднее значение напряженности  $E$  с погрешностью  $\delta(a)$  меньше наименьшей погрешности одного из измеренных значений напряженностей  $E_1$  и  $E_2$ . При этом во всем пространственном диапазоне максимальное значение  $\delta_{\max}(0,7) = 4,57\%$ .

Через погрешности  $\delta_1(a)$  и  $\delta_2(a)$  по выражениям (1) вычисляются значения напряженностей  $E_1(a)$  и  $E_2(a)$  в каждой точке измерения. Эти значения можно использовать не только для определения среднего значения, но и для определения расстояния до источника поля и погрешности результата измерений. Покажем это. Введем в рассмотрение коэффициент  $k_0(a)$  и рассчитаем его для каждой точки шага измерений по формуле

$$k_0(a) = \frac{E_1(a)}{E_2(a)}. \quad (7)$$

Для расчетов значения  $a$  будем выбирать из пространственного диапазона  $0 \leq a \leq 1$ . Начальное зна-

чение и шаг выборки возьмем равным 0,05. Результаты расчетов запишем в табл. 1.

По данным табл. 1 установлена эмпирическая формула функциональной зависимости  $a^*$  от  $k_0$

$$a^* = R/d = 1,123 \sqrt{k_0 - 0,94} - 0,21, \quad (8)$$

где  $a^*$  — параметр  $a$ , определенный по эмпирической формуле (8).

По значениям коэффициентов  $k_0$  (см. табл. 1) и эмпирическому выражению (8) можно определить для каждой точки измерения относительное расстояние  $a^*$  до источника поля. Это позволит через относительное расстояние  $a^*$  определить:

1) расстояние  $d$  от центра датчика до источника поля

$$d = R/a^*; \quad (9)$$

2) по выражениям (5) и (6) погрешности  $\delta_1(a)$  и  $\delta_2(a)$  двух измеренных значений  $E_1$  и  $E_2$  в каждой точке измерений.

Таким образом, рассмотренный метод измерений может быть использован для построения измерителя напряженности ЭП с возможностью определения:

1) результата измерения  $E$  по выражению (2) как среднее значение из  $E_1$  и  $E_2$ ;

2) погрешности результата измерения  $\delta$  по выражению (3) с использованием выражений (5) и (6);

3) расстояния от центра датчика до источника поля по выражению (9) с использованием выражения (8).

**Структурная схема измерителя напряженности ЭП.** Выбранный метод измерения положен в основу разработки измерителя напряженности ЭП, структурная схема которого представлена на рис. 2.

Структурная схема измерителя состоит из сдвоенного датчика 1, измерительного устройства 2, вычислительного устройства 3 и устройства отображения информации 4.

Измерительное устройство 2 измеряет и преобразует выходные сигналы со сдвоенного датчика 1 (сдвоенный датчик будет рассмотрен ниже) в измерительные сигналы, пропорциональные напряженностям  $E_1$  и  $E_2$ , одновременно измеренных в одной точке поля.

Далее эти измерительные сигналы поступают на вычислительное устройство 3, в котором они последовательно обрабатываются в модуле 5 по выражениям (2) и (7), в модуле 6 по выражениям (8) и (9) и в модуле 7 по выражениям (3), (5) и (6). Результаты вычисленных значений напряженности поля  $E$ , погрешности измерения  $\delta$  и расстояния до источника поля  $d$  выводятся на устройство отображения информации.

Таким образом, выбранный метод измерения реализован в измерителе напряженности ЭП с воз-

Таблица 1

Значения коэффициента  $k_0$  в зависимости от пространственного диапазона измерения  $a$

$a$	0,05	0,1	0,15	0,20	0,25	0,30	0,35	0,40	0,45	0,50
$k_0$	1,004	1,015	1,033	1,058	1,091	1,131	1,178	1,231	1,29	1,355
$a$	0,55	0,60	0,65	0,70	0,75	0,80	0,85	0,90	0,95	
$k_0$	1,423	1,495	1,568	1,64	1,711	1,779	1,843	1,901	1,954	

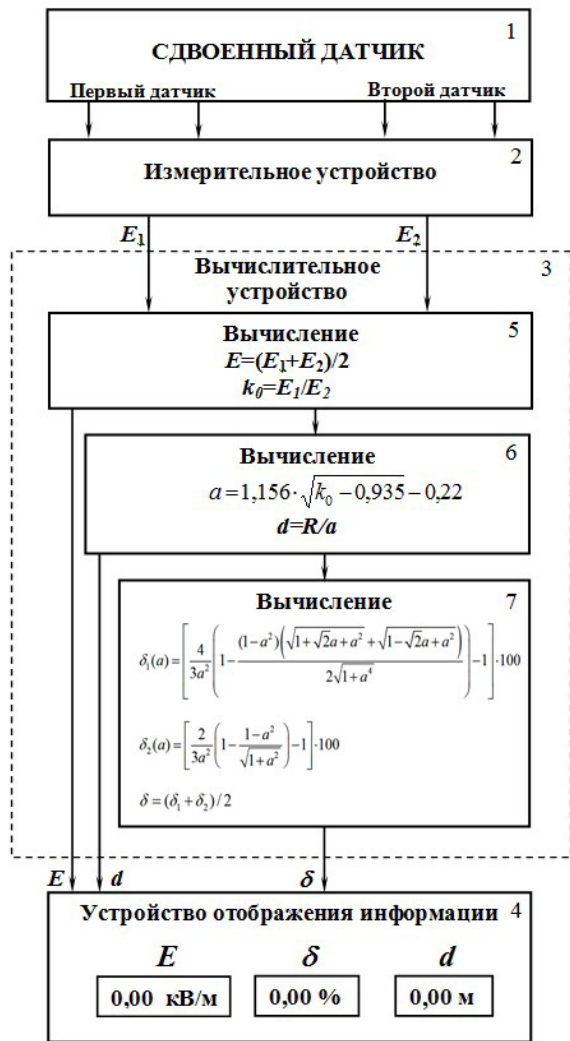


Рис. 2. Структурная схема измерителя напряженности ЭП

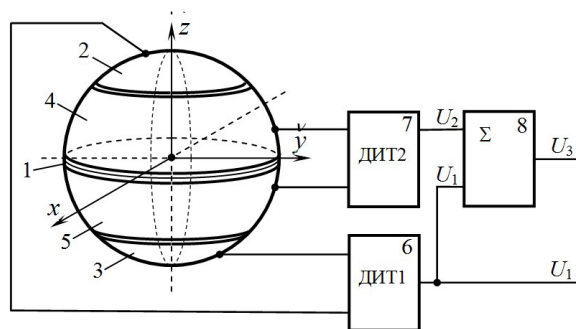


Рис. 3. Схема сдвоенного датчика напряженности ЭП

можно определить погрешности измерения и расстояния до источника поля.

**Сдвоенный датчик напряженности электрического поля.** В структурной схеме измерителя напряженности ЭП предусматривается сдвоенный датчик. Его конструктивной особенностью является совмещение двух двойных датчиков в одном. Такой датчик позволяет одновременно измерять два значения напряженностей  $E_1$  и  $E_2$  в данной точке поля, получаемых с противоположными по знаку погрешностями. Техническое решение такого датчика приведено в работе [23] и представлено на рис. 3.

Сдвоенный датчик включает в себя механическую конструкцию и измерительное устройство 2, представленное на рис. 2.

В основе механической конструкция датчика лежат проводящий сферический корпус 1, два чувствительных элемента 2 и 3 в форме сферических сегментов и два чувствительных элемента 4 и 5 в форме сферических слоёв.

Измерительное устройство 2 (см. рис. 3) включает два дифференциальных интегратора тока (ДИТ1) 6, (ДИТ2) 7 и сумматор 8. Сферические сегменты 2 и 3 выполнены с угловыми размерами  $\theta_0 = 45^\circ$  и входят в состав механической конструкции первого датчика. Сферические слои 4 и 5 являются частями чувствительных элементов (2+4) и (3+5), в сумме образующие полусферы с угловым размером  $\theta_0 = 90^\circ$ , входящими в состав механической конструкции второго датчика. Проводящие чувствительные элементы 2–5 датчика изолированы между собой и сферическим корпусом 1. Под действием ЭП на проводящих чувствительных элементах 2–5 датчика индуцируются электрические заряды, пропорциональные напряженности ЭП  $E_0$ . Для снятия электрических зарядов с чувствительных элементов датчика используются дифференциальные интеграторы тока 6 и 7. С их помощью снимаются разность зарядов с диаметрально противоположных чувствительных элементов датчика и преобразуются в напряжения  $U_1(t)$  и  $U_2(t)$ , пропорциональные напряженности ЭП  $E_0$ . Напряжение  $U_1(t) = kE_1$  является выходным напряжением первого датчика. Выходное напряжение  $U_3(t) = kE_2$  второго датчика получается суммированием напряжений  $U_1(t)$  и  $U_2(t)$  сумматором 8, объединяющим электрические заряды с чувствительных элементов датчика (2+4) и (3+5).

Таким образом, измеряя напряжения  $U_1(t)$  и  $U_3(t)$ , можно одновременно измерить напряженности поля  $E_1$  и  $E_2$ , необходимые для реализации метода измерений в измерителе напряженности ЭП.

**Проверка работы измерителя напряженности ЭП.** Проведем численный эксперимент. Для этого по формулам (5) и (6) рассчитаем погрешности измерений  $\delta_1(a)$  и  $\delta_2(a)$ . Для расчетов значения  $a$  будем выбирать из пространственного диапазона  $0 \leq a \leq 1$ . Начальное значение возьмем  $a = 0,1$ , а шаг выборки выбираем равным 0,2. Результаты расчета запишем в табл. 2. В неё же запишем погрешность  $\delta(a)$  результата измерений, рассчитанную по выражению (3).

Воспользовавшись выражением (1), представим напряженности  $E_1$ ,  $E_2$  и  $E$  для каждой точки пространственного диапазона измерений в виде относительных величин  $E_1^* = E_1/E_0$ ,  $E_2^* = E_2/E_0$  и  $E^* = E/E_0$ . Результаты представлений запишем в табл. 3.

Рассчитаем по выражению (7) коэффициент  $k_0$  для каждой точки пространственного диапазона измерений и запишем его в табл. 4.

Подставляя в эмпирическую формулу (8) коэффициенты  $k_0$  определим приближенные значения параметра  $a$  и обозначим их как  $a^*$ . Результаты расчетов запишем в табл. 5.

По значениям параметра  $a^*$  (см. табл. 5) и выражениям (5) и (6) рассчитаем погрешности  $\delta_1^*$  и  $\delta_2^*$  значений напряженностей  $E_1^*$  и  $E_2^*$  первым и вторым датчиками, а также по выражению (3) погрешность  $\delta^*$  результата измерений  $E^*$ . Результаты расчетов запишем в табл. 6.

Сравнение численных значений погрешностей, рассчитанных по теоретическим и эмпирическим

Таблица 2

Теоретические значения погрешностей  $\delta_1(a)$ ,  $\delta_2(a)$  и  $\delta(a)$ 

$a$	0,1	0,3	0,5	0,7	0,9	0,99
$\delta_1, \%$	0,87	7,56	18,93	29,92	34,37	33,52
$-\delta_2, \%$	0,58	4,91	12,22	20,79	29,32	32,94
$\delta, \%$	0,16	1,33	3,34	4,57	2,53	0,29

Таблица 3

## Значения напряженностей

$a$	0,1	0,3	0,5	0,7	0,9	0,99
$E_1$	1,008	1,076	1,190	1,3	1,344	1,336
$E_2$	0,994	0,95	0,878	0,792	0,706	0,67
$E$	1	1,014	1,034	1,046	1,026	1,004

Таблица 4

## Расчетные значения коэффициентов

$a$	0,1	0,3	0,5	0,7	0,9	0,99
$k_0$	1,014	1,133	1,355	1,64	1,904	1,994

Таблица 5

Значения параметра  $a$ , рассчитанные по эмпирической формуле (8)

$a$	0,1	0,3	0,5	0,7	0,9	0,99
$a^*$	0,095	0,283	0,513	0,73	0,893	0,943
$\gamma, \%$	-0,5	-5,7	2,6	4,3	-0,8	4,8

Таблица 6

Эмпирические значения погрешностей  $\delta_1^*$ ,  $\delta_2^*$  и  $\delta^*$ , рассчитанные через  $a^*$ 

$a$	0,1	0,3	0,5	0,7	0,9	0,99
$a^*$	0,095	0,283	0,513	0,73	0,893	0,943
$\delta_1^*, \%$	0,787	6,758	18,931	29,923	34,367	33,527
$-\delta_2^*, \%$	0,523	4,397	12,219	20,79	29,319	32,942
$\delta^*, \%$	0,132	1,181	3,356	4,566	2,524	0,293

значениям параметров  $a$  и  $a^*$  и приведенных в табл. 2 и табл. 6, показывает хорошее их согласование.

Таким образом, выбранный метод измерения может быть положен в основу построения измерителя напряженности ЭП, позволяющего измерять не только напряженности ЭП  $E$  с малой погрешностью  $\delta$ , но и инструментально определять как погрешности измерения  $E$ , так и расстояния до источника поля  $d$ , как  $d = R/a^*$ .

**Обсуждение результатов.** В большинстве своем выпускаемые отечественной промышленностью приборы для измерения напряженности ЭП [4–12]

направлены на измерение вектора напряженности поля и его составляющих. В них в основном используются методы направленного [4–7] и не направленного приёма [7–12], заключающиеся либо в помещении датчика прибора в точку измерений и его ориентации по направлению поля, либо просто в помещении датчика прибора в точку измерений.

Представленный в работе метод измерений расширяет возможности измерителей ЭП и позволяет создавать приборы, измеряющие не только основной параметр — напряженность поля, но

и определяющие погрешность измерения основного параметра и расстояние до источника поля. Эти возможности метода сильно отличают его от известных методов измерений. Созданию нового метода измерений предшествовало появление в номенклатуре датчиков — датчиков нового типа, а именно сдвоенных датчиков. Сдвоенные датчики расширяют возможности одинарных и двойных датчиков. Они позволяют одновременно измерять в одной точке поля два значения напряженностей с противоположными по знаку погрешностями. Эта способность сдвоенного датчика позволила создать новый метод измерений и на его основе построить измеритель напряженности ЭП, позволяющий не только измерять модуль вектора напряженности с повышенной точностью, но и инструментально определять его погрешность в данной точке измерений и расстояние до источника поля.

**Выводы и заключение.** В работе рассмотрена концепция создания измерителя напряженности электрического поля с определением погрешности результата измерений и расстояния до источника поля. Для реализации этой концепции:

1) выбран метод измерения напряженности ЭП, обеспечивающий инструментальное определение погрешности результата измерений и расстояния до источника поля;

2) разработана структурная схема измерителя напряженности ЭП, реализующая выбранный метод измерений;

3) выбран сдвоенный датчик напряженности ЭП, позволяющий реализовать метод измерений в измерителе напряженности;

4) проведен численный эксперимент, подтвердивший работоспособность измерителя напряженности ЭП.

В заключение отметим, что дальнейшие исследования должны быть направлены на совершенствование сдвоенных датчиков напряженности ЭП с целью снижения погрешности измерения измерителем поля.

#### Библиографический список

- Коробкова В. П., Морозов Ю. А., Столяров М. Д. [и др.]. Воздействие электрического поля распределительных устройств 500 и 750 кВ на обслуживающий персонал и средства для его защиты // Подстанции переменного тока: междунар. конф. по большим электрическим системам (СИГРЭ-72). Москва: Энергоатомиздат, 1974. С. 33–43.
- Шкарина Ю. П. Влияние электроустановок высокого напряжения на окружающую среду: пер. док. междунар. конф. по большим электрическим системам (СИГРЭ-86). Москва: Энергоатомиздат, 1988. 104 с. ISBN 5-283-02447-4.
- СанПиН 2.2.4.1191-03. «Электромагнитные поля в производственных условиях». URL: <https://musorniy.ru/wp-content/uploads/2019/01/sanpin-2.2.4.1191-03.pdf> (дата обращения: 20.06.2023).
- Измеритель ближнего электромагнитного поля ЭЛОН. URL: [https://ppxr.ru/rub/html/pribori/pkosiot/5\\_09/](https://ppxr.ru/rub/html/pribori/pkosiot/5_09/) (дата обращения: 15.06.2023).
- Измеритель напряженности электрического и магнитного полей промышленной частоты ПЗ-50. URL: <https://all-pribors.ru/opisanie/17638-19-p3-50/> (дата обращения: 15.06.2023).
- Прибор для измерения электрического поля ИНЭП-50. URL: [http://www.tecnoshans2006.ru/Documents/ACS/pass\\_INAP.DOC](http://www.tecnoshans2006.ru/Documents/ACS/pass_INAP.DOC) (дата обращения: 10.04.2023).
- Измеритель напряженности ЭП промышленной частоты ГРАДАН. URL: [https://www.korabel.ru/news/comments/izmeritel\\_napryazhennosti\\_elektricheskogo\\_polya\\_promishlennoy\\_chastoti\\_gradan\\_ot\\_kompanii\\_elektroenergetika.html](https://www.korabel.ru/news/comments/izmeritel_napryazhennosti_elektricheskogo_polya_promishlennoy_chastoti_gradan_ot_kompanii_elektroenergetika.html) (дата обращения: 04.06.2023).
- Изотропный измеритель электромагнитного поля ПЗ-60. URL: <https://ciklon-pribor.ru/pdf/p3-60%20pasp.pdf#28> (дата обращения: 07.07.2023).
- Изотропный анализатор поля EFA-3. URL: [https://elektrotanya.com/files/e\\_efa3.pdf](https://elektrotanya.com/files/e_efa3.pdf) (дата обращения: 08.07.2023).
- Портативный анализатор электромагнитного поля EFA-300. URL: [http://alfa-test.ru/public/catalog/files/1291\\_efa-300\\_at\\_ru.pdf](http://alfa-test.ru/public/catalog/files/1291_efa-300_at_ru.pdf) (дата обращения: 08.06.2023).
- Измеритель электрического поля промышленной частоты BE-50. URL: <https://ntm.ru/products/44/7261> (дата обращения: 08.06.2023).
- Измеритель параметров электрического и магнитного полей BE-метр. URL: [https://priborysgk.ru/upload/shop\\_3/2/0/9/item\\_209/shop\\_property\\_file\\_209\\_189.pdf](https://priborysgk.ru/upload/shop_3/2/0/9/item_209/shop_property_file_209_189.pdf) (дата обращения: 10.07.2023).
- Юркевич В. М., Кондратьев Б. Л. О методике измерения напряженности и других характеристик электрического поля // Измерительная техника. 1980. № 5. С. 57–59.
- Чугунов С. А., Юркевич В. М. Расширение зоны измерения параметров электрического поля при применении зондового метода // Измерительная техника. 1981. № 1. С. 33–35.
- Кондратьев Б. Л., Юркевич В. М. Измерения в электрическом поле с выравниванием потенциалов // Труды Московского энергетического института. 1979. Т. 432. С. 20–22.
- 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.
- 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.
- Бирюков С. В. Метод измерения напряженности электрического поля путем выравнивания составляющих // Датчики и преобразователи информации систем измерения, контроля и управления (Датчик-2002): сб. материалов XIV науч.-техн. конф. с участием зарубеж. специалистов. Москва: Изд-во МИЭМ, 2002. С. 25–26.
- Бирюков С. В. Методы измерения напряженности неоднородных электрических полей вблизи источников поля трехкоординатными датчиками // Известия высших учебных заведений. Электромеханика. 2003. № 4. С. 22–25. EDN: HTUFYJ.
- Пат. 2773868 Российская Федерация, МПК G 01 R 29/08, G 01 R 29/12. Способ измерения напряженности электрического поля сдвоенным датчиком / Бирюков С. В., Тюкина Л. В., Тюкин А. В. № 2021120230; заявл. 09.07.2021; опубл. 14.06.2022, Бюл. № 17.
- 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. EDN: VISFYM.
- Пат. 2774654 С1 Российская Федерация, МПК G 01 R 29/12. Способ измерения напряженности электрического поля датчиком сдвоенного типа / Бирюков С. В., Тюкина Л. В., Тюкин А. В. № 2021120704; заявл. 14.07.2021; опубл. 21.06.2022. Бюл. № 18.
- Пат. 2776097 С1 Российская Федерация, МПК G 01 R 29/12. Способ измерения напряженности электрического поля с использованием датчика сдвоенного типа / Бирюков С. В., Тюкина Л. В., Тюкин А. В. № 2021120706; заявл. 14.07.2021; опубл. 13.07.2022. Бюл. № 20.
- Пат. 210806 U1 Российская Федерация, МПК G 01 R 29/12. Сдвоенный датчик для измерения напряженности электрического поля с составными чувствительными элементами / Бирюков С. В., Тюкина Л. В. № 2022101437; заявл. 24.01.2022; опубл. 05.05.2022. Бюл. № 13.

25. Щигловский К. Б., Аксельрод В. С. Приборы для измерения параметров электростатического поля и их калибровка // Измерительная техника. 1978. № 5. С. 63–65.

26. 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.

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

SPIN-код: 9384-0078

ORCID: 0000-0002-1362-9911

AuthorID (SCOPUS): 7006438919

Адрес для переписки: sbiryukov154@mail.ru

#### Для цитирования

Бирюков С. В. Концепция создания измерителя напряженности электрического поля с определением погрешности результата измерений и расстояния до источника поля // Омский научный вестник. 2024. № 1 (189). С. 110–118. DOI: 10.25206/1813-8225-2024-189-110-118.

Статья поступила в редакцию 17.07.2023 г.

© С. В. Бирюков

# THE CONCEPT OF CREATING AN ELECTRIC FIELD STRENGTH METER WITH THE DETERMINATION OF THE ERROR OF THE MEASUREMENT RESULT AND THE DISTANCE TO THE FIELD SOURCE

A new concept of constructing an electric field strength meter is considered. The concept lies in the fact that along with the measurement of the modulus of the electric field strength vector, the error of the measurement result and the distance to the field source are subject to simultaneous instrumental determination. The field meter is based on a new dual sensor and a method for measuring the electric field strength. The ability of the measurement method to determine the error and the distance to the field source is provided by a dual electroinduction spherical sensor. A feature of a dual sensor is the ability to simultaneously output two field strength values measured at one point, obtained with errors of different signs. This feature made it possible to obtain the measurement result as an average value and two measured values, and thereby reduce the measurement error. The presence of two simultaneously measured values of the field strength also made it possible to obtain an empirical formula for determining the relative distance to the source at each measurement point. The obtained values of the relative distances made it possible to determine the error of the measurement result and the distance from the center of the sensor to the field source using known formulas. The possibility of a field meter to simultaneously instrumentally determine the error of the measurement result and the distance to the field source is considered for the first time.

**Keywords:** meter, instrument, measurement method, electric field strength, sensor, dual sensor, measurement error, distance to the field source.

## References

1. Korobkova V. P., Morozov Yu. A., Stolyarov M. D. [et al.]. Vozdeystviye elektricheskogo polya raspredelitel'nykh ustroystv 500 i 750 kV na obsluzhivayushchiy personal i sredstva dlya ego zashchity [Impact of the electric field of 500 and 750 kV switchgears on operating personnel and means for their protection] // Podstantsii Peremennogo Toka. AC Substations. Moscow, 1974. P. 33–43. (In Russ.).
2. Shkarina Yu. P. Vliyaniye elektroustanovok vysokogo napryazheniya na okruzhayushchuyu sredu [Impact of high voltage electrical installations on the environment]. Moscow, 1988. 104 p. (In Russ.).
3. SanPiN 2.2.4.1191-03. «Elektromagnitnyye polya v proizvodstvennykh usloviyakh» [SanPiN 2.2.4.1191-03. «Electromagnetic fields in industrial conditions»]. URL: <https://musormiy.ru/wp-content/uploads/2019/01/sanpin-2.2.4.1191-03.pdf> (accessed: 20.06.2023). (In Russ.).
4. Izmeritel' blizhnego elektromagnitnogo polya ELON. [Near electromagnetic field meter ELON]. URL: [https://ppxp.ru/rub/html/pribori/pkosiot/5\\_09/](https://ppxp.ru/rub/html/pribori/pkosiot/5_09/) (accessed: 15.06.2023). (In Russ.).
5. Izmeritel' napryazhennosti elektricheskogo i magnitnogo polya promyshlennoy chastoty PZ-50 [Industrial frequency electric and magnetic field strength meter PZ-50]. URL: <https://all-pribors.ru/opisanie/17638-19-p3-50/> (accessed: 15.06.2023). (In Russ.).
6. Pribor dlya izmereniya elektricheskogo polya IN•EP-50 [Electric field measuring device INEP-50]. URL: [http://www.tecnoshans2006.ru/Documents/ACS/pass\\_INAP.DOC](http://www.tecnoshans2006.ru/Documents/ACS/pass_INAP.DOC) (accessed: 10.04.2023). (In Russ.).
7. Izmeritel' napryazhennosti EP promyshlennoy chastoty GRADAN [Industrial frequency ED voltage meter GRADAN]. URL: [https://www.korabel.ru/news/comments/izmeritel\\_napryazhennosti\\_elektricheskogo\\_polya\\_promishlennoy\\_chastoti\\_gradan\\_ot\\_kompanii\\_elektroenergetika.html](https://www.korabel.ru/news/comments/izmeritel_napryazhennosti_elektricheskogo_polya_promishlennoy_chastoti_gradan_ot_kompanii_elektroenergetika.html) (accessed: 04.06.2023). (In Russ.).
8. Izotropnyy izmeritel' elektromagnitnogo polya P3-60 [Isotropic electromagnetic field meter P3-60]. URL: <https://ciklon-pribor.ru/pdf/p3-60%20pasp.pdf28> (accessed: 07.07.2023). (In Russ.).
9. Izotropnyy analizator polya EFA-3 [Isotropic field analyzer EFA-3]. URL: [https://elektrotanya.com/files/e\\_efa3.pdf](https://elektrotanya.com/files/e_efa3.pdf) (accessed: 08.07.2023). (In Russ.).
10. Portativnyy analizator elektromagnitnogo polya EFA-300 [Portable electromagnetic field analyzer EFA-300]. URL: [http://alfa-test.ru/public/catalog/files/1291\\_efa-300\\_at\\_ru.pdf](http://alfa-test.ru/public/catalog/files/1291_efa-300_at_ru.pdf) (accessed: 08.06.2023). (In Russ.).
11. Izmeritel' elektricheskogo polya promyshlennoy chastoty BE-50 [Power frequency electric field meter BE-50]. URL: <https://ntm.ru/products/44/7261> (accessed: 08.06.2023). (In Russ.).
12. Izmeritel' parametrov elektricheskogo i magnitnogo polya VE-metr [Meter of parameters of electric and magnetic fields

BE-meter]. URL: [https://priborysgk.ru/upload/shop\\_3/2/0/9/item\\_209/shop\\_property\\_file\\_209\\_189.pdf](https://priborysgk.ru/upload/shop_3/2/0/9/item_209/shop_property_file_209_189.pdf) (accessed: 10.07.2023). (In Russ.).

13. Yurkevich V. M., Kondrat'yev B. L. O metodike izmereniya napryazhennosti i drugikh kharakteristik elektricheskogo polya [About the technique for measuring the intensity and other characteristics of the electric field] // *Izmeritel'naya Tekhnika. Izmeritel'naya Tekhnika*. 1980. No. 5. P. 57–59. (In Russ.).

14. Chugunov S. A., Yurkevich V. M. Rasshireniye zony izmereniya parametrov elektricheskogo polya pri primeneni zondovogo metoda [Expanding the area for measuring electric field parameters when using the probe method] // *Izmeritel'naya Tekhnika. Izmeritel'naya Tekhnika*. 1981. No. 1. P. 33–35. (In Russ.).

15. Kondrat'yev B. L., Yurkevich V. M. Izmereniya v elektricheskom pole s vyravnivaniyem potentsialov [Electric field measurements with potential equalization] // *Trudy Moskovskogo Energeticheskogo Instituta. Trudy Moskovskogo Energeticheskogo Instituta*. 1979. Vol. 432. P. 20–22. (In Russ.).

16. Koldekott P., Devore R. V., Sebo S. A. Izmereniye elektricheskikh poley na podstantsiyakh sverkhvysokogo napryazheniya [Measuring electric fields at ultra-high voltage substations] // *Elektricheskiye Stantsii Seti i Sistemy. Ekspres Informatsiya. Electric Power Stations Networks and Systems. Express Information*. 1977. No. 19. P. 10–26. (In Russ.).

17. Chauzy S., Magnes P. Mise au point d'un mesureur de champ electrique alternatif 50 Hz // *Rev. gen. elec.* 1988. No. 7. P. 27–38. (In Engl.).

18. Biryukov S. V. Metod izmereniya napryazhennosti elektricheskogo polya putem vyravnivaniya sostavlyayushchikh [Method for measuring electric field strength by equalizing components] // *Datchiki i Preobrazovateli Informatsii Sistem Izmereniya, Kontrolya i Upravleniya (Datchik-2002). Sensors and Information Converters for Measurement, Monitoring and Control Systems (Sensor-2002)*. Moscow, 2002. P. 25–26. (In Russ.).

19. Biryukov S. V. Metody izmereniya napryazhennosti neodnorodnykh elektricheskikh poley vblizi istochnikov polya trekhkoordinatnymi datchikami [Methods of measuring non-uniform electric field intensity close to field sources by using three-coordinate sensors] // *Izvestiya Vysshikh Uchebnykh Zavedeniy. Elektromekhanika. Izvestiya Vysshikh Uchebnykh Zavedeniy. Elektromekhanika (Russian Electromechanics)*. 2003. No. 4. P. 22–25. EDN: HTUFYJ. (In Russ.).

20. Patent 2773868 Russian Federation, IPC G 01 R 29/08, G 01 R 29/12. Sposob izmereniya napryazhennosti elektricheskogo polya sdvoennym datchikom [A method for measuring the electric field strength with a dual sensor] // Biryukov S. V., Tyukina L. V., Tyukin A. V. No. 2021120230. (In Russ.).

21. Biryukov S. V., Tyukina L. V., Tyukin A. V. Metod izmereniya napryazhennosti neodnorodnykh elektricheskikh poley

po srednemu znacheniyu [Method for measuring intensity of inhomogeneous electrical fields by average value] // *Omskiy Nauchnyy Vestnik. Omsk Scientific Bulletin*. 2021. No. 4 (178). P. 67–74. DOI: 10.25206/1813-8225-2021-178-67-74. EDN: VISFYM. (In Russ.).

22. Patent 2774654 S1 Russian Federation, IPC G 01 R 29/12. Sposob izmereniya napryazhennosti elektricheskogo polya datchikom sdvoennogo tipa [Method for measuring electric field strength with a dual-type sensor] // Biryukov S. V., Tyukina L. V., Tyukin A. V. No. 2021120704. (In Russ.).

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

24. Patent 210806 U1 Russian Federation, IPC G 01 R 29/12. Sdvoenny datchik dlya izmereniya napryazhennosti elektricheskogo polya s sostavnymi chuvstvitel'nymi elementami [Dual sensor for measuring electric field strength with composite sensing elements] // Biryukov S. V., Tyukina L. V. No. 2022101437. (In Russ.).

25. Shchiglovskiy K. B., Aksel'rod V. S. Pribory dlya izmereniya parametrov elektrostati-cheskogo polya i ikh kalibrovka [Instruments for measuring electrostatic field parameters and their calibration] // *Izmeritel'naya Tekhnika. Izmeritel'naya Tekhnika*. 1978. No. 5. P. 63–65. (In Russ.).

26. 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. (In Engl.).

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

SPIN-code: 9384-0078

ORCID: 0000-0002-1362-9911

AuthorID (SCOPUS): 7006438919

Correspondence address: sbiryukov154@mail.ru

#### For citations

Biryukov S. V. The concept of creating an electric field strength meter with the determination of the error of the measurement result and the distance to the field source // *Omsk Scientific Bulletin*. 2024. No. 1 (189). P. 110–118. DOI: 10.25206/1813-8225-2024-189-110-118.

Received July 17, 2023.

© S. V. Biryukov