



ЭЛЕКТРОНИКА, ФОТОНИКА, ПРИБОРОСТРОЕНИЕ И СВЯЗЬ

УДК 621.317.328
DOI: 10.25206/1813-8225-2022-183-90-97

С. В. БИРЮКОВ¹
Л. В. ТЮКИНА¹
А. В. ТЮКИН²

¹Омский государственный
технический университет,
г. Омск

²Сибирский государственный
автомобильно-дорожный университет,
г. Омск

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ СДВОЕННОГО ЭЛЕКТРОИНДУКЦИОННОГО СФЕРИЧЕСКОГО ДАТЧИКА НАПРЯЖЕННОСТИ ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ПОЛЯ В НЕОДНОРОДНОМ ПОЛЕ ТОЧЕЧНОГО ИСТОЧНИКА

В работе рассматриваются экспериментальные исследования в неоднородном электрическом поле сдвоенного электроиндукционного сферического датчика, представляющего собой конструктивное объединение двух двойных датчиков в одно целое. Сдвоенные датчики являются неотъемлемой частью нового метода измерений неоднородных электрических полей по среднему значению. Экспериментальные исследования направлены на подтверждение возможности использования в неоднородных электрических полях сдвоенных датчиков и метода измерений напряженности ЭП по среднему значению. Для проведения экспериментов в неоднородном электрическом поле создана высоковольтная измерительная установка. Измерительная установка дала возможность получить статические характеристики сдвоенного датчика в неоднородном ЭП. Сопоставление статических характеристик, полученных в однородном и неоднородном поле, позволило оценить их погрешности и сравнить с теоретически рассчитанными погрешностями. Результаты сопо-

ставления показали, что статические характеристики расходятся между собой не более чем на 1,5 %, а расхождение погрешностей сдвоенного датчика, оцененных по экспериментальным данным в неоднородном поле и полученных теоретически, не превышает $\pm 2\%$ в абсолютных единицах.

Полученные результаты исследований позволяют подтвердить адекватность теории, положенной в основу теоретических положений, заложенных в расчеты сдвоенных электроиндукционных сферических датчиков напряженности ЭП.

Ключевые слова: эксперимент, однородное поле, неоднородное поле, напряженность электрического поля, сдвоенный датчик, метод измерения.

Введение. Данная статья продолжает экспериментальные исследования электроиндукционного сдвоенного сферического датчика напряженности электрического поля (ЭП) и метода его измерения по среднему значению, начатые в работах авторов [1–3].

В работе [3] экспериментальные исследования датчика проводились в отсутствие поля, с помощью имитатора токовых сигналов датчика и в присутствии однородного поля, создаваемого высоковольтной измерительной установкой. Полученные результаты легли в основу продолжений экспериментальных исследований датчиков и методов измерений в условиях реальных неоднородных ЭП. Для этого была создана высоковольтная измерительная установка, генерирующая неоднородное ЭП.

Постановка задачи. В связи с вышесказанным, необходимо было решить следующие задачи:

1) экспериментально получить статические характеристики выходных сигналов сдвоенного датчика в неоднородном ЭП, создаваемом точечным источником;

2) сопоставить статические характеристики сдвоенного датчика, полученные в неоднородном ЭП со статическими характеристиками датчика, полученными вне поля и в однородном поле, а также с ранее полученными авторами в работе [3];

3) провести сравнительный анализ полученных результатов, на основании которого сделать выводы об адекватности теоретических положений, изложенных в работе [2] и положенных в основу построения сдвоенных датчиков и методов измерения с их использованием.

Организация и подготовка эксперимента. Организация и подготовка эксперимента в неоднородном ЭП включает:

1) подготовку сдвоенного датчика к эксперименту;

2) подготовку высоковольтной измерительной установки, генерирующей неоднородное ЭП заданных напряженностей к проведению эксперимента.

Организация и подготовка эксперимента осуществлялась в соответствии с основными положениями и рекомендациями теории планирования эксперимента, математической статистики [4–8] с использованием ПЭВМ.

Объекты исследования. В качестве объектов экспериментальных исследований рассматриваются:

— сдвоенный электроиндукционный сферический датчик напряженности ЭП [1];

— метод измерения напряженности ЭП по среднему значению [2], в основе которого лежит сдвоенный датчик.

Сдвоенный датчик состоит из механической и электрической частей, конструктивно объединенных в единое устройство (рис. 1).

Механическая часть сдвоенного датчика представляет собой проводящее сферическое основание 1, на поверхности которого на одной координатной оси изолированно от основания и друг от друга располагаются две пары 2, 3 и 4, 5 проводящих чувствительных элементов, образующих два двойных датчика, объединенных в одно целое [1]. Сферическое основание датчика выполнено с радиусом $R=30$ мм. Чувствительные элементы 2, 3 и 4, 5 первого и второго двойных датчиков имеют форму сферических сегментов и угловыми размерами $\theta_0=45^\circ$ и $\theta_1=90^\circ$ (полусфера) соответственно. Внутри сферического основания датчика размещается его электрическая часть.

Электрическая часть сдвоенного датчика включает два дифференциальных интегратора тока ДИТ 1 и ДИТ 2, два масштабных преобразователя МП 1 и МП 2 и полусумматор $\frac{1}{2}\Sigma$. Дифференциальные интеграторы тока ДИТ 1 и ДИТ 2 формируют выходные сигналы двойных датчиков U_1 и U_2 . Масштабные преобразователи МП 1 и МП 2 обеспечивают регулировку уровней выходных сигналов двойных датчиков. Полусумматор $\frac{1}{2}\Sigma$ формирует на своем выходе полусумму выходных сигналов двойных датчиков $U=(U_1+U_2)/2$ в соответствии с методом измерений по среднему значению. Сдвоенный датчик может воспринимать напряженность ЭП от 1 до 100 кВ/м частотой 50 Гц.

Метод измерения по среднему значению [2] строится на том, что в данной точке пространства одновременно измеряются два значения напряженности ЭП с помощью двух двойных датчиков, входящих в состав сдвоенного датчика и имеющих противоположные по знаку погрешности δ_1 и δ_2 . С учетом этих погрешностей выходные напряжения двойных датчиков соответственно равны $U_1=k \cdot E(1+|\delta_1|)$ и $U_2=k \cdot E(1-|\delta_2|)$ и пропорциональны напряженности ЭП E в диапазоне этих погрешностей. При этом выходное напряжение сдвоенного датчика, определяемое как среднее значение напряжений U_1 и U_2 , равное $U=(U_1+U_2)/2$ или $U=k \cdot (E_1+E_2)/2=k \cdot E(1+\delta)$, будет пропорционально измеряемой напряженности ЭП E с погрешностью $\delta=(|\delta_1|-|\delta_2|)/2$. Таким образом, метод измерения сдвоенным датчиком позволяет уменьшить погрешность измерения напряженности неоднородных ЭП и свести её к полуразности модулей погрешностей двойных датчиков.

Подготовка сдвоенного датчика к эксперименту. Подготовка к эксперименту сводится к градуировке сдвоенного датчика и его измерительных цепей, входящих в электрическую часть сначала вне поля, а затем в однородном поле.

Градуировка измерительных цепей сдвоенного датчика вне поля осуществлялась с помощью имитатора токовых сигналов [3]. На выходах имитатора токовых сигналов формировались предварительно

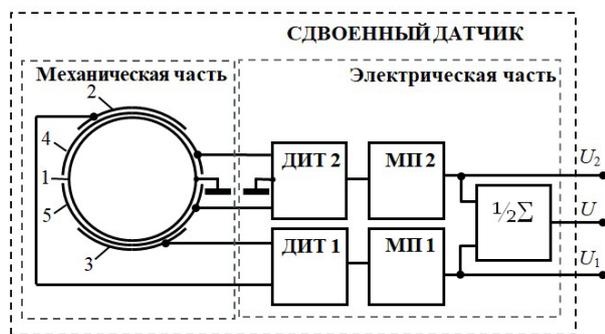


Рис. 1. Сдвоенный датчик напряженности ЭП с накладными чувствительными элементами. Механическая и электрическая части

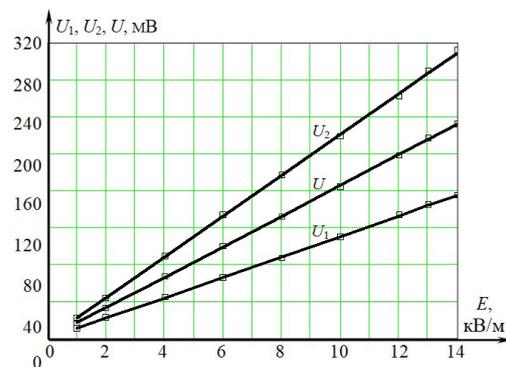


Рис. 2. Графики выходных напряжений сдвоенного датчика при настройке с помощью имитатора токовых сигналов

рассчитанные парафазные токи $i_2(t)$, $-i_3(t)$ и $i_4(t)$, $-i_5(t)$, эквивалентные выходным токам механической части сдвоенного датчика, находящегося в однородном ЭП и, соответственно, равные

— для чувствительных элементов 2 и 3 с угловым размером $\theta_0 = 45^\circ$

$$i_{2,3}(t) = \pm 3\pi\epsilon_0\omega R^2\sin^2\theta_0 \cdot E(t); \quad (1)$$

— для чувствительных элементов 4 и 5 с угловым размером $\theta_1 = 90^\circ$

$$i_{4,5}(t) = \pm 3\pi\epsilon_0\omega R^2\sin^2\theta_1 \cdot E(t), \quad (2)$$

где знак «+» соответствует выходным токам чувствительных элементов 2 и 4, а знак «-» соответствует выходным токам чувствительных элементов 3 и 5.

Сформированные токи (1) и (2) подавались на входы измерительной цепи сдвоенного датчика и путем их изменения снимались статические характеристики $U_1(i_{2,3})$ и $U_2(i_{4,5})$ с первого и второго двойных датчиков и со сдвоенного датчика $U(t)$. Результаты записывались в табл. 1.

Напряжения $U_1(t)$ и $U_2(t)$ могут быть рассчитаны теоретически по выражениям

$$U_1(t) = [(6\pi\epsilon_0 R^2 \sin^2\theta_0) / C_{\text{инт}}] \cdot E(t)$$

$$\text{и } U_2(t) = [(6\pi\epsilon_0 R^2 \sin^2\theta_1) / C_{\text{инт}}] \cdot E(t), \quad (3)$$

где $C_{\text{инт}} = 6,8$ нФ — интегрирующая емкость в интеграторах токов. Значения напряжений $U_1(t)$ и $U_2(t)$, рассчитанные по выражениям (3), отличаются от измеренных не более чем на $\pm 1\%$.

Графики статических характеристик $U_1(E)$, $U_2(E)$ и $U(E)$ первого и второго двойных и сдвоенного

датчиков, построенные по табл. 1, представлены на рис. 2 [3].

На рис. 2 значком «□» изображены экспериментальные точки статических характеристик, а сплошными линиями — аппроксимированные методом наименьших квадратов их линейные зависимости. Графики, изображенные на рис. 2, показывают расхождение статических характеристик двойных датчиков $U_1(E)$ и $U_2(E)$. Это расхождение приводит к неравенству $U_1 \neq U_2$ выходных напряжений двойных датчиков при одинаковых значениях напряженности ЭП. Условие использования метода измерений по среднему значению требует обязательного равенства $U_1 = U_2$ выходных сигналов двойных датчиков при одинаковой напряженности ЭП. Поэтому при подготовке сдвоенного датчика к эксперименту была произведена подстройка в сторону увеличения чувствительности в измерительной цепи первого двойного датчика с помощью масштабного преобразователя МП 1 (см. рис. 1). После такой подстройки оба двойных датчика, входящих в состав сдвоенного датчика, и сам сдвоенный датчик в однородном поле будут иметь одинаковые чувствительности и статические характеристики, соответствующие статической характеристике второго двойного датчика, при этом выполнится условие $U_1(E) = U_2(E) = U(E)$.

Таким образом, после настройки и выполнения равенства статических характеристик двойных датчиков $U_1(E) = U_2(E)$ сдвоенный датчик готов к измерениям в реальных электрических полях.

Теоретические положения эксперимента. Настройка и градуировка сдвоенного датчика напряженности в отсутствие внешнего ЭП позволила получить статические характеристики датчика в реальном однородном ЭП [3]. Проведенное сравнение полученных статических характеристик сдвоенно-

Таблица 1

Расчетные значения токов имитатора сигналов датчика и выходные напряжения двойных и сдвоенного датчиков, полученные при этих токах

$E(t)$, кВ/м	1	2	4	6	8	10	12	13	14
$\pm i_{2,3}(t)$, нА	11,79	23,58	47,17	70,75	94,33	117,92	141,50	153,29	165,08
$\pm i_{4,5}(t)$, нА	10,97	21,94	43,88	65,82	87,75	109,69	131,63	142,59	153,57
$U_1(i_{2,3})$	11,15	22,30	44,60	66,24	87,43	110,4	133,79	144,95	154,55
$U_2(i_{4,5})$	21,86	44,16	89,20	133,79	176,63	218,58	262,3	289,9	312,20
$U(t)$	16,68	33,23	66,9	100	132,03	164,49	198,05	217,43	233,38

го датчика вне поля и в поле показало их адекватность. Их расхождение не превышало $\pm 2,5\%$. Экспериментальное исследование сдвоенного датчика в неоднородном ЭП точечного источника является следующим этапом подтверждения теоретических положений, выдвинутых авторами в работах [2, 9].

Теоретически неоднородное поле можно моделировать с помощью точечного заряда, в качестве которого может служить проводящий шар радиуса R_w , находящийся под потенциалом V . В этом случае напряженность ЭП, создаваемое в окружающем шар свободном пространстве, будет определяться выражением

$$E_p(x) = \frac{q}{4\pi\epsilon_0 x^2} = \frac{C_w V}{4\pi\epsilon_0 x^2} = \frac{4\pi\epsilon_0 R_w V}{4\pi\epsilon_0 x^2} = \frac{R_w V}{x^2}, \quad (4)$$

где R_w — радиус полеформирующего шара; C_w — емкость полеформирующего шара; V — потенциал полеформирующего шара; x — расстояние от полеформирующего шара до точки наблюдения.

Создание неоднородного ЭП в свободном пространстве — задача достаточно сложная и трудоемкая, поэтому целесообразней генерировать неоднородное ЭП в ограниченном пространстве.

Практически неоднородное поле в ограниченном пространстве можно создать в системе «шар — плоскость», в которой один полеформирующий проводящий электрод выполнен в форме шара радиуса R_w , а другой — в форме прямоугольной пластины, размеры которой много больше расстояния между полеформирующими электродами [5, 10–12]. При подключении полеформирующих электродов к высокому напряжению V в межэлектродном пространстве будет генерироваться неоднородное ЭП с расчетной напряженностью, определяемой методом изображения [13],

$$E_p(x) = \frac{R_w \cdot V}{x^2} \cdot \frac{1 - \frac{x}{H}}{\left(1 - \frac{x}{2H}\right)^2}, \quad (5)$$

где V — высоковольтное напряжение на полеформирующем шаре; H — расстояние между полеформирующими электродами; x — текущая координата, отсчитываемая от центра полеформирующего шара.

Построим для сравнения и оценки расхождений графиков изменения напряженности неоднородного поля, получаемые в свободном и ограниченном пространстве по выражениям (4) и (5) соответственно. Графики представлены на рис. 3, где сплошной линией выполнен график по выражению (4), а знаками в форме квадрата выделен график, построенный по выражению (5).

На рис. 4. представлен график погрешности отклонения графиков напряженности поля, полученных для свободного и ограниченного пространства, в зависимости от расстояния до центра полеформирующего шара. Сопоставляя математические модели (4) и (5) неоднородного поля, можно говорить об их адекватности. Расхождение графиков составляет от 0 до 12% в зависимости от расстояния от полеформирующего шара. Чем больше расстояние, тем больше погрешность. Это вполне приемлемо для эксперимента.

Следует отметить, что эксперимент в поле точечного источника целесообразно начинать со средней

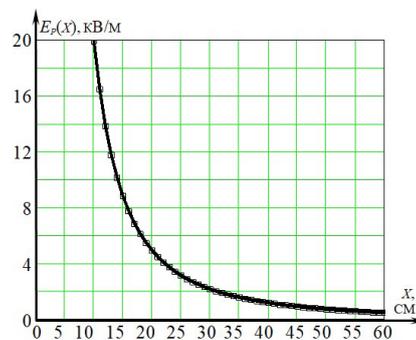


Рис. 3. Графические зависимости расчетной напряженности поля в системе «шар — плоскость». В свободном (сплошная линия) и ограниченном (квадраты) пространстве



Рис. 4. График погрешности отклонения теоретической и практической напряженности ЭП в зависимости от расстояния до центра полеформирующего шара

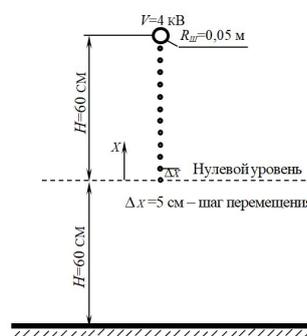


Рис. 5. Межэлектродное пространство в системе «шар — плоскость», размещенное для эксперимента

части межэлектродного пространства. Межэлектродное пространство в системе «шар — плоскость» представлено на рис. 5.

В связи со сказанным выше, выбрав направление перемещения датчика от середины межэлектродного пространства, как показано на рис. 5, выражение (5) следует привести к виду

$$E_p(x) = \frac{4R_w \cdot V}{(H - 2x)^2} \cdot \frac{1 - \frac{H - 2x}{2H}}{\left(1 - \frac{H - 2x}{4H}\right)^2} = \frac{32R_w V}{H^2} \cdot \frac{1 + 2\frac{x}{H}}{\left(1 - 2\frac{x}{H}\right)^2 \cdot \left(3 + 2\frac{x}{H}\right)^2}, \quad (6)$$

где x — расстояние, изменяющееся от нулевого уровня межэлектродного пространства в сторону источника поля (см. рис. 5).

Для наглядности и возможности сравнения результатов изменения электрического поля, полученных [3, 9], целесообразно выражение (6) представить в зависимости от параметра $a = R_g/x$ (R_g — радиус сферического основания сдвоенного датчика; x — расстояние, отсчитываемое от нулевого уровня межэлектродного пространства в сторону источника поля (см. рис. 5)).

Для этого в выражении (6) заменим x на $x = H/2 - R_g/a$ и проведем его преобразование. Тогда получим выражение для расчетной напряженности ЭП ограниченного пространства

$$E_p(a) = \frac{R_w \cdot V \cdot a^2}{R_A^2} \cdot \frac{4 \left(1 - \frac{R_g}{a \cdot H}\right)}{\left(2 - \frac{R_A}{aH}\right)^2}. \quad (7)$$

В свободном пространстве эта зависимость будет иметь вид

$$E_p(a) = \frac{R_w \cdot V \cdot a^2}{R_g^2}. \quad (8)$$

Построим для наглядности в соответствии с выражениями (6)–(8) графики изменения электрического поля между полеформирующими электродами и представим их на рис. 6 (выражение (6)) и рис. 7 (выражения (7) и (8)) соответственно.

На графиках, представленных на рис. 6, сплошной линией выполнен график по выражению (8), а знаками в форме квадрата выделен график, построенный по выражению (7). Расхождение графиков так же не превышает 12 %. Имея графики, изображенные на рис. 2, рис. 5 и рис. 6, можно наглядно представлять изменение напряженности ЭП в межэлектродном пространстве.

Если пошагово изменять положение исследуемого датчика в межэлектродном пространстве, как показано на рис. 5, то можно изменять степень неоднородности ЭП a , по мере приближения датчика к источнику поля.

Эти теоретические положения легли в основу построения высоковольтной измерительной установки для исследования сдвоенных датчиков в неоднородных ЭП.

Высоковольтная измерительная установка. Для экспериментальных исследований создана высоковольтная измерительная установка, генерирующая неоднородное электрическое поле точечного источника. Высоковольтная измерительная установка схематично представлена на рис. 8.

Высоковольтная измерительная установка состоит из двух полеформирующих электродов, одним из которых является проводящий шар 1, а другим — проводящая пластина 2, высоковольтного трансформатора 3 типа ВТО-53, лабораторного автотрансформатора 4 типа ЛАТР-1 и электростатического киловольтметра 5 типа С-197, кл. 1,0. Полеформирующие электроды 1 и 2 выполнены из дюралюминия с размерами: шар радиуса $R_w = 0,05$ м, пластина имеет толщину 5 мм и размеры 1,2×1,2 м (рис. 7). Расстояние между полеформирующими электродами устанавливалось равным 1,2 м, однако рабочий объем поля находился в области $H = 60$ см

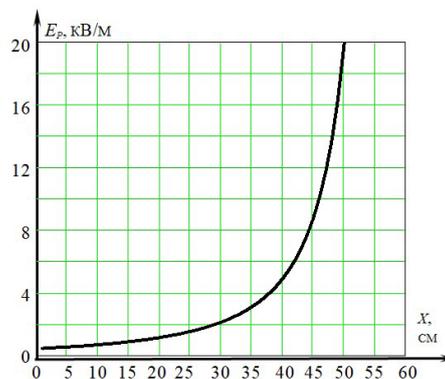


Рис. 6. График изменения электрического поля от нулевого уровня межэлектродного пространства в сторону источника поля

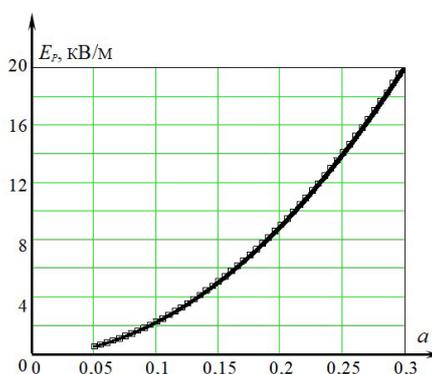


Рис. 7. Графические зависимости расчетной напряженности поля в системе «шар–плоскость». Теоретическая (сплошная линия) и практическая (квадраты) зависимости от изменения параметра $a = R_g/(H/2 - x)$

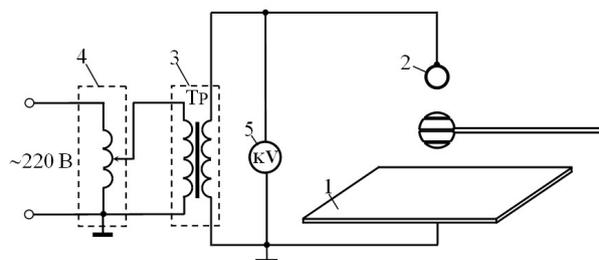


Рис. 8. Высоковольтная измерительная установка для создания неоднородного электрического поля

(см. рис. 5). Напряжение питания полеформирующих электродов — несимметричное (полеформирующий электрод 1 заземлен) и равно $V = 4$ кВ. Высоковольтная измерительная установка работает от сети переменного тока 220 В частоты 50 Гц. Высоковольтный трансформатор, посредством включения в его первичную цепь ЛАТРа, позволяет устанавливать на полеформирующих электродах переменное синусоидальное напряжение от 0 до 12 кВ.

В установке предусмотрено устройство позиционирования (на рис. 8 не показано), осуществляющее фиксацию датчика в любой точке эталонного поля.

Эксперимент. Исследованию подвергается предварительно отградуированный с помощью имитато-

Результаты экспериментов для первого двойного датчика в составе сдвоенного в измерительной установке «шар–плоскость»

x , см	0	5	10	15	20	25	30	35	40	45	48	50
a	0,05	0,055	0,06	0,067	0,075	0,086	0,1	0,12	0,15	0,2	0,25	0,3
E_p , кВ/м	0,494	0,603	0,745	0,935	1,2	1,585	2,177	3,157	4,959	8,849	13,85	19,962
U_1 , мВ	10,93	13,35	16,5	20,72	26,63	35,12	48,49	70,61	111,63	202,12	321,99	473,8
U_p , мВ	10,91	13,31	16,45	20,64	26,50	35,00	48,07	69,70	109,49	195,38	305,79	440,74
δ_1 , %	0,29	0,35	0,41	0,49	0,8	0,72	0,97	1,35	2,05	3,5	5,5	7,8

Таблица 3

Результаты экспериментов для второго двойного датчика в составе сдвоенного в измерительной установке «шар–плоскость»

x , см	0	5	10	15	20	25	30	35	40	45	48	50
a	0,05	0,055	0,06	0,067	0,075	0,086	0,1	0,12	0,15	0,2	0,25	0,3
E_p , кВ/м	0,494	0,603	0,745	0,935	1,2	1,585	2,177	3,157	4,959	8,849	13,85	19,962
U_2 , мВ	10,89	13,28	16,42	20,59	26,41	34,85	47,79	69,12	108,08	193,92	295,09	419,14
U_p , мВ	10,91	13,31	16,45	20,64	26,50	35,00	48,07	69,70	109,49	195,38	305,79	440,74
δ_2 , %	-0,17	-0,2	-0,24	-0,27	-0,33	-0,4	-0,52	-0,77	-1,2	-2,08	-3,3	-4,7

Таблица 4

Результаты экспериментов для сдвоенного датчика в измерительной установке «шар–плоскость»

x , см	0	5	10	15	20	25	30	35	40	45	48	50
a	0,05	0,055	0,06	0,067	0,075	0,086	0,1	0,12	0,15	0,2	0,25	0,3
E_p , кВ/м	0,494	0,603	0,745	0,935	1,2	1,585	2,177	3,157	4,959	8,849	13,85	19,962
U , мВ	10,91	13,32	16,46	20,65	26,52	35,04	48,14	69,85	109,85	196,53	308,63	446,60
U_p , мВ	10,91	13,31	16,45	20,64	26,50	35,00	48,07	69,70	109,49	195,38	305,79	440,74
δ , %	0,06	0,075	0,085	0,11	0,14	0,16	0,23	0,29	0,43	0,71	1,1	1,55

ра токовых сигналов и проверенный в однородном поле сдвоенный электроиндукционный сферический датчик напряженности ЭП и метод измерения напряженности ЭП по среднему значению с его участием.

Перед началом проведения эксперимента предварительно по выражению (6) для каждого шага перемещения (см. рис. 5) сдвоенного датчика рассчитывалось значение $E_p(x)$ напряженности неоднородного ЭП. Затем по выражениям (3) рассчитывались выходные напряжения сдвоенного датчика $U_{p1}(x)$, $U_{p2}(x)$ и $U_p(x)$ для каждого шага Δx перемещения датчика. Полученные значения $E_p(x)$ и $U_{p1}(x)$, $U_{p2}(x)$, $U_p(x)$ записывались в табл. 2–табл. 4.

В начале эксперимента сдвоенный датчик помещался в точку нулевого уровня (см. рис. 5) межэлектродного пространства измерительной установки (см. рис. 8). Последовательно перемещая сдвоенный датчик от точки к точке (выделенные точки на рис. 5) с шагом 5 см при постоянном напряжении $V = 4$ кВ на полеформирующем шаре, на трех выходах сдвоенного датчика производились измерения напряжений $U_1(x)$, $U_2(x)$ и $U(x)$ — двух одинарных и сдвоенного датчиков. Выходные напряжения $U_1(x)$, $U_2(x)$ и $U(x)$ снимались с датчика при прямом и обратном его перемещении в поле. Полученные в каждой точке поля два значения усреднялись. Ус-

редненные значения записывались в табл. 2–табл. 4. По измеренным и усредненным значениям выходных напряжений $U_1(x)$, $U_2(x)$ и $U(x)$ сдвоенного датчика и его расчетным значениям напряжений $U_{p1}(x)$, $U_{p2}(x)$ и $U_p(x)$ рассчитывалась относительная погрешность измерения напряженности ЭП вблизи полеформирующего электрода-шара

$$\delta(x) = \frac{U(x) - U_p(x)}{U_p(x)} \cdot 100. \quad (9)$$

Результаты расчетов погрешности для каждого шага измерений заносились в табл. 2–табл. 4. После математической обработки экспериментальных данных, представленных в табл. 2–табл. 4, на ПЭВМ строились графики погрешности от неоднородности поля в зависимости от относительного расстояния $a = R_g / (H/2 - x)$, где R_g — радиус сферического основания датчика; x — расстояние от центральной точки поля до полеформирующего электрода, в сторону которого перемещается датчик; H — расстояние между полеформирующими электродами.

На нулевом уровне межэлектродного пространства (см. рис. 5) измерительной установки напряженность поля задавалась с погрешностью не более $\pm 2\%$. Минимальное расстояние между центрами по-

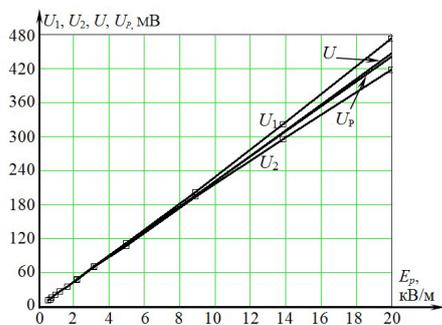


Рис. 9. Графические зависимости выходных напряжений сдвоенного датчика от напряженности неоднородного ЭП

леформирующего шара и сферического основания датчика, которое можно было обеспечить, составило 10 см.

Обработанные результаты экспериментов для трех выходных напряжений $U_1(x)$, $U_2(x)$ и $U(x)$ и теоретически рассчитанного напряжения U_p сдвоенного датчика сведены в табл. 2 – табл. 4.

По данным табл. 2 – табл. 4 построим графические зависимости выходных напряжений сдвоенного датчика от напряженности неоднородного поля $U_1 = f(E_p)$, $U_2 = f(E_p)$, $U = f(E_p)$ и $U_p = f(E_p)$ и представим их на рис. 9.

Из рис. 9 следует, что статические характеристики выходных напряжений первого $U_1(E_p)$ и второго $U_2(E_p)$ двойных датчиков, входящих в состав сдвоенного датчика в неоднородном ЭП, не равны, т.е. $U_1 \neq U_2$. Однако ранее, при настройке датчика в однородном поле, регулировкой его измерительных цепей добивались выполнения условия их равенства. Из рис. 9 также следует, что первый двойной датчик формирует на своем выходе напряжение большее ($U_1 > U_p$, где U_p — теоретически рассчитанное напряжение на выходе датчиков, соответствующее напряжению в однородном поле), чем в однородном поле той же напряженности. В свою очередь, второй двойной датчик формирует на своем выходе напряжение меньше ($U_2 < U_p$), чем в однородном поле той же напряженности. Проведя сравнение расчетной статической характеристики $U_p(E_p)$ и статической характеристики выходного напряжения сдвоенного датчика $U(E_p)$, полученной как среднее значение от $U_1(E_p)$ и $U_2(E_p)$, можно заключить, что их расхождение не превышает 1,5 %.

Это подтверждает работоспособность метода измерения напряженности неоднородных ЭП по среднему значению [2].

На рис. 10а показаны графики теоретически рассчитанных погрешностей сдвоенного датчика от неоднородности ЭП в зависимости от пространственного диапазона измерений a .

По экспериментальным данным табл. 2 – табл. 4 и выражению (9) были рассчитаны и построены графики погрешности первого $\delta_1 = f(a)$, второго $\delta_2 = f(a)$ двойных и сдвоенного $\delta = f(a)$ датчиков (рис. 10б). На графиках рис. 10б, значком «□» указаны точки погрешностей, полученные экспериментально, а сплошной линией — начальные фрагменты теоретически рассчитанных погрешностей, представленных на рис. 10а.

Из рис. 10 и данных табл. 2 – табл. 4 видно, что расхождение экспериментально полученных и теоретически рассчитанных погрешностей не превышает $\pm 2\%$ в абсолютных единицах. Это еще раз подтверждает адекватность теоретических положений, заложенных в расчетную модель сдвоенного датчика и метод измерения напряженности ЭП по среднему значению.

Результаты исследований. Проведенные экспериментальные исследования были направлены на подтверждение возможности использования в неоднородных электрических полях сдвоенных датчиков и метода измерений напряженности ЭП по среднему значению. Предварительно сдвоенные датчики настраивались с помощью имитатора токовых сигналов вне поля, а затем в однородном ЭП. Проведение экспериментов со сдвоенными датчиками в неоднородном поле потребовало создание высоковольтной измерительной установки, генерирующей регулируемое неоднородное ЭП. С помощью этой установки были получены статические характеристики сдвоенного датчика $U_1 = f(E_p)$, $U_2 = f(E_p)$ и $U = f(E_p)$ в неоднородном ЭП. Сопоставление статических характеристик, полученных в однородном и неоднородном поле, позволило оценить их погрешности и сравнить их с теоретически рассчитанными погрешностями. Результаты сопоставления показали:

- расхождение выходной статической характеристики $U = f(E_p)$ сдвоенного датчика, полученной в неоднородном поле, и его статической характеристикой, полученной в однородном поле, не превышает $+1,5\%$;

- расхождение погрешностей сдвоенного датчика, оцененных по экспериментальным данным

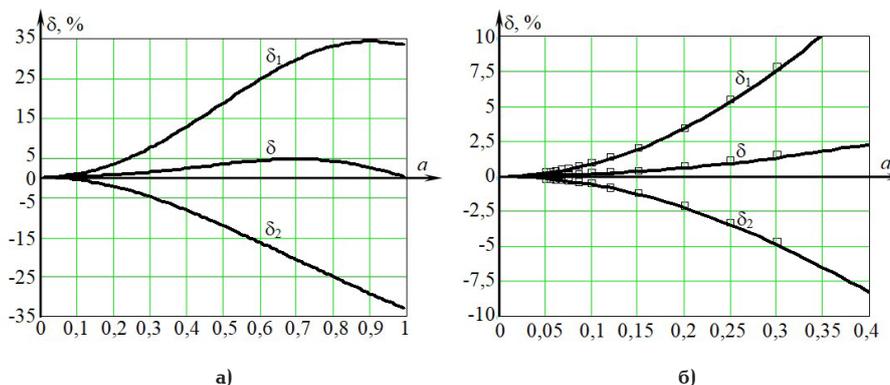


Рис. 10. Графики погрешностей в зависимости от пространственного диапазона измерений а) теоретические; б) экспериментальные

в неоднородном поле, и полученных теоретически, не превышает $\pm 2\%$ в абсолютных единицах.

Поскольку проведенные эксперименты были оценочными, то более тщательная их подготовка позволит снизить погрешность расхождения до $(0,5...1)\%$. Полученные результаты исследований позволяют подтвердить адекватность теории, что легла в основу теоретических доказательств, заложенных в расчеты сдвоенных электроиндукционных сферических датчиков напряженности ЭП.

Выводы и заключения. Из результатов экспериментальных исследований сдвоенного датчика в неоднородном поле можно сделать следующие выводы:

1) эксперимент показывает, что первый двойной датчик дает завышенное значение выходного напряжения, т.е. имеет положительную погрешность, а второй двойной датчик дает заниженные значения выходного напряжения, т.е. имеет отрицательную погрешность;

2) эксперимент показывает, что выходное напряжение сдвоенного датчика линейно зависит от напряженности ЭП и его статическая характеристика отличается от расчетной не более чем на $\pm 2\%$;

3) пункты 1 и 2 выводов подтверждают теоретические положения, заложенные в основу расчета конструктивных параметров сдвоенных датчиков и метода измерений напряженности ЭП по среднему значению.

Представленные выводы позволяют сделать заключение о том, что сдвоенные датчики являются перспективными и открывают новое направление в области измерений электрических полей с использованием новых методов их измерений.

Библиографический список

1. Пат. № 207464 U1 Российская Федерация, МПК G01R 29/12. Устройство для измерения напряженности электрического поля со сдвоенным датчиком / Бирюков С. В., Тюкина Л. В., Эйсмонт Н. Г. № 202111582; заявл. 23.04.21; опубл. 28.10.21, Бюл. 31.
2. 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.
3. Бирюков С. В., Тюкина Л. В., Тюкин А. В. Градуировка сдвоенного электроиндукционного сферического датчика напряженности электрического поля в однородном поле // Омский научный вестник. 2022. № 2 (182). С. 102–109. DOI: 10.25206/1813-8225-2022-182-102-109.
4. ГОСТ Р 51070-97. Государственный стандарт Российской Федерации. Измерители напряженности электрического и магнитного полей. Общие технические требования и методы испытаний. Введ. 1998–01–01. Москва: Изд-во стандартов, 1997. 16 с.
5. Бузинов В. С. Образцовая установка для поверки и калибровки малых дипольных антенн // Измерительная техника. 1967. № 6. С. 50–53.

6. Кунце Х.-И. Методы физических измерений: пер. с нем. Москва: Мир, 1989. 216 с.

7. ГОСТ Р 8.736-2011. Национальный стандарт Российской Федерации. Государственная система обеспечения единства измерений. Измерения прямые многократные. Методы обработки результатов измерений. Общие положения. Введ. 2013–01–01. Москва: Изд-во стандартов, 2013. 19 с.

8. Сквайрс Дж. Практическая физика. Москва: Книга по требованию, 2012. 248 с. ISBN 978-5-458-34864-5.

9. 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.

10. Бузинов В. С. Эталонные измерения параметров радиочастотного электромагнитного поля: сб. науч. тр. / под общ. ред. С. И. Донченко. Менделеево: ФГУП «ВНИИФТРИ», 2019. 260 с.

11. Пат. 23687 Российская Федерация, МКИ G 01 R 35/00. Устройство градуировки измерителей напряженности электрического поля промышленной частоты / Бирюков С. В. № 2001132813/20; заявл. 06.12.01; опубл. 27.06.02, Бюл. № 18.

12. Пат. 1366971 A1 SU СССР, МПК G 01 R 29/12, G 01 R 35/00. Устройство градуировки измерителей напряженности электрического поля промышленной частоты / Иерусалимский А. П., Мейлах Д. И., Портнов Ф. Г. [и др.]. № 4063737; заявл. 02.01.86; опубл. 15.01.88, Бюл. 1.

13. Миролубов Н. Н., Костенко М. В., Левинштейн М. Л. [и др.]. Методы расчёта электростатических полей. Москва: Высшая школа, 1963. 415 с.

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

SPIN-код: 9384-0078

ORCID: 0000-0002-1362-9911

AuthorID (SCOPUS): 7006438919

Адрес для переписки: sbiryukov154@mail.ru

ТЮКИНА Людмила Владимировна, соискатель кафедры физики ОмГТУ, г. Омск.

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

Для цитирования

Бирюков С. В., Тюкина Л. В., Тюкин А. В. Экспериментальные исследования сдвоенного электроиндукционного сферического датчика напряженности электрического поля в неоднородном поле точечного источника // Омский научный вестник. 2022. № 3 (183). С. 90–97. DOI: 10.25206/1813-8225-2022-183-90-97.

Статья поступила в редакцию 14.03.2022 г.

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