

## ГРАДУИРОВКА СДВОЕННОГО ЭЛЕКТРОИНДУКЦИОННОГО СФЕРИЧЕСКОГО ДАТЧИКА НАПРЯЖЕННОСТИ ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ПОЛЯ В ОДНОРОДНОМ ПОЛЕ

Для измерения напряженности электрических полей вблизи высоковольтного оборудования перспективными являются сдвоенные электроиндукционные сферические датчики, представляющие собой конструктивное объединение двух двойных датчиков в одно целое. Перед эксплуатацией датчиков они должны быть отградуированы в однородном ЭП. Этот процесс трудоемкий, дорогостоящий и небезопасный. В работе авторами предлагается идея градуировать датчики токами, эквивалентными выходным токам датчика, находящегося в реальном однородном поле. Для этого разработан имитатор токовых сигналов, в основу которого положены математические соотношения, полученные при теоретическом взаимодействии датчика с однородным ЭП. Для проверки выдвинутой идеи сдвоенный датчик сначала настраивался и градуировался по изложенной в статье методике с получением статических характеристик. Затем для подтверждения правильности градуировки датчик помещался в реальное однородное ЭП. В однородном ЭП с датчика снимались статические характеристики и сопоставлялись с его статическими характеристиками, полученными после имитатора токовых сигналов. Результаты сопоставления показали хорошее совпадение статических характеристик. Расхождение составляло не более  $\pm 3\%$ . Поскольку эксперименты были проведены оценочные, то такое согласование статических характеристик можно признать приемлемым. Более тщательная настройка измерительных цепей сдвоенного датчика позволит снизить погрешность расхождения статических характеристик до  $(0,5-1)\%$ . Полученные результаты исследований позволяют подтвердить адекватность теории, положенной в основу расчетов сдвоенных электроиндукционных датчиков напряженности ЭП.

**Ключевые слова:** напряженность электрического поля, сдвоенный датчик напряженности электрического поля, имитатор токовых сигналов датчика, генератор однородного поля.

**Введение.** Экспериментальные исследования средств измерений являются неотъемлемой частью разработки и связанных с ней исследований новых средств измерений в нормальных условиях и в условиях эксплуатации. Таким новым средством измерений, исследуемым в работе, является предложенный авторами сдвоенный электроиндукционный сферический датчик напряженности электрического поля (ЭП) [1]. Сдвоенный датчик входит в состав нового метода измерений напряженности ЭП по среднему значению [2]. Для проверки работоспособности сдвоенного датчика и метода измерений авторами были разработаны низковольтная и высоковольтная измерительные установки. Низ-

ковольтная измерительная установка необходима для регулировки и градуировки сдвоенных датчиков в отсутствие ЭП. Высоковольтная измерительная установка создана для проведения экспериментальных исследований датчиков и методов измерений в условиях реальных однородных ЭП. Отметим, что высоковольтные измерительные установки — это сложные высоковольтные системы, включающие в себя как основные, так и вспомогательные высоковольтные технические средства, такие как устройства блокировки, устройство позиционирования датчика и др. В связи с этим для организации и проведения высоковольтных измерений требуются значительные усилия, место и время проведения.

**Постановка задачи.** В связи с вышесказанным необходимо решить следующие задачи:

1) осуществить настройку и градуировку измерительных цепей сдвоенного датчика с использованием низковольтной измерительной установки — имитатора токовых сигналов электроиндукционных датчиков;

2) экспериментальным путем в высоковольтной измерительной установке, генерирующей однородное ЭП, получить статические характеристики выходных сигналов сдвоенного датчика;

3) сопоставить статические характеристики сдвоенного датчика, полученные при его градуировке в низковольтной и высоковольтной измерительных установках;

4) на основании полученных результатов подтвердить теоретические положения, полученные в работе [2].

Экспериментальные исследования сдвоенных датчиков проводились методом подпитки током с использованием имитатора токовых сигналов датчика и методом с использованием генератора однородного ЭП [3, 4].

**Организация и подготовка эксперимента.** Организация и подготовка эксперимента состоит из нескольких этапов:

1) подготовка объекта исследования;

2) проверка работоспособности и градуировка датчиков;

3) подготовка высоковольтной установки по созданию однородного ЭП к проведению эксперимента;

4) разработка программ и методик эксперимента.

Организация и подготовка эксперимента осуществлялась в соответствии с основными положениями и рекомендациями теории планирования эксперимента, математической статистики [5–7] с использованием ПЭВМ.

**Объекты исследования.** Объектами исследования являются сдвоенный сферический датчик напряженности ЭП электроиндукционного типа и метод измерения напряженности ЭП по среднему значению с использованием сдвоенного датчика.

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

В основе механической части сдвоенного датчика лежит тонкостенное 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 первого двойного датчика имеют форму сферических сегментов и угловой размер  $\theta_0 = 45^\circ$ , а чувствительные элементы 4, 5 второго двойного датчика выполнены в форме сферического сегмента с угловыми размерами  $\theta_1 = 90^\circ$  (полусфера) (рис. 2). Сферическое основание датчика представляет собой две гальванически соединенные вместе проводящие полусферы, внутри которых расположена электрическая часть датчика.

Электрическая часть сдвоенного датчика состоит из первичных измерительных цепей двойных датчиков [1], представляющих собой дифференциальные интеграторы тока ДИТ 1 и ДИТ 2, масштабные преобразователи МП 1 и МП 2 по каждому каналу преобразования и полусумматор  $\frac{1}{2}\Sigma$ . Диф-

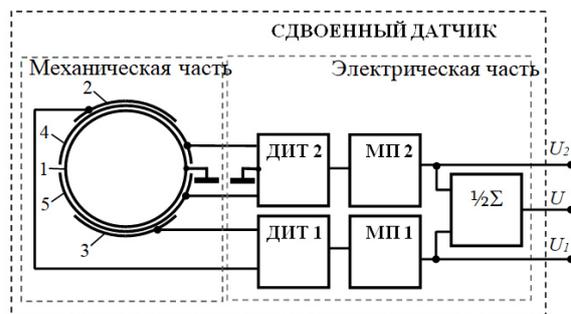


Рис. 1. Сдвоенный датчик с накладными чувствительными элементами. Механическая и электрическая части

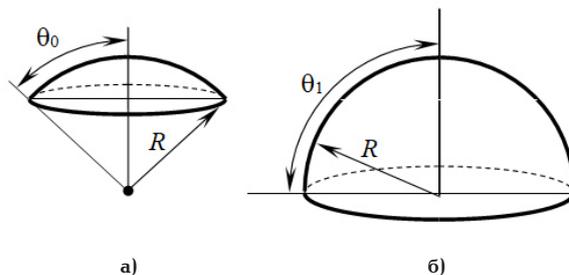


Рис. 2. Формы чувствительных элементов: а) сферический сегмент; б) полусфера

ференциальные 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 заключается в помещении сдвоенного датчика, состоящего из двух двойных датчиков, имеющих противоположные по знаку погрешности в неоднородном ЭП [2]. Одновременно двумя двойными датчиками, входящими в состав сдвоенного датчика, воспринимают напряженность ЭП и преобразуют её в выходные напряжения  $U_1$  и  $U_2$  двух двойных датчиков. Выходные напряжения двойных датчиков, соответственно равные  $U_1 = kE_1$  и  $U_2 = kE_2$  и пропорциональные напряженности ЭП  $E$ , определяются с некоторой погрешностью, с учетом которой  $E_1 = E(1 + |\delta_1|)$  и  $E_2 = E(1 - |\delta_2|)$ . Далее с помощью измерительной цепи, встроенной в датчик, определяют полусумму напряжений  $U_1$  и  $U_2$  как  $U = (U_1 + U_2)/2$ . Полученное напряжение  $U = k(E_1 + E_2)/2 = kE(1 + \delta)$  на выходе сдвоенного датчика будет пропорционально измеряемой напряженности ЭП  $E$  с погрешностью  $\delta = (|\delta_1| - |\delta_2|)/2$ . Т.е. погрешность выходного напряжения сдвоенного датчика от неоднородности поля будет равна полуразности модулей погрешностей двойных датчиков.

**Теория 1.** Для настройки и градуировки электроиндукционных датчиков напряженности ЭП требуется реальное однородное ЭП с известной напряженностью и возможность пошагового её изменения. Практический опыт показывает, что настройка и градуировка датчиков напряженности

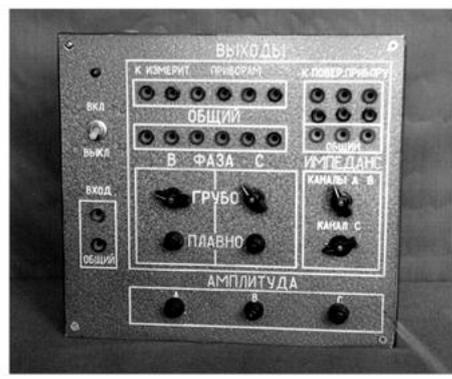


Рис. 3. Имитатор токовых сигналов датчиков

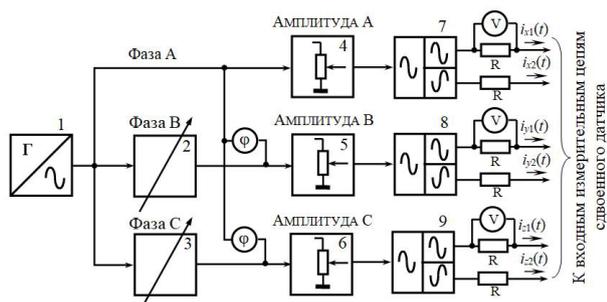


Рис. 4. Структурная схема имитатора токовых сигналов электроиндукционных датчиков напряженности ЭП

ЭП в реальном однородном электрическом поле является трудоёмкой, дорогостоящей и небезопасной задачей. В связи с этим возникла идея воссоздания эквивалентных воздействий на входные измерительные цепи электроиндукционных датчиков электрических сигналов, соответствующих реальным выходным сигналам датчиков, находящихся в однородном ЭП. Ранее проведенные исследования показали, что наиболее приемлемыми выходными сигналами электроиндукционных сферических датчиков, находящихся в ЭП, являются электрические заряды  $q(t)$ , индуцированные на их чувствительных элементах [8]. Однако снять электрические заряды с чувствительных элементов затруднительно. Поэтому снимают электрический ток  $i(t) = dq(t)/dt$  и через его интегрирование находят электрический заряд

$$q(t) = \int i(t) dt. \quad (1)$$

Электрические токи определяются выражениями:

— для чувствительных элементов 2 и 3 первой пары с угловым размером  $\theta_0 = 45^\circ$  [9]

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

— для чувствительных элементов второй пары 4 и 5 с угловым размером  $\theta_1 = 90^\circ$  [9]

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

где знак «+» соответствует выходным токам чувствительных элементов 2 и 4, а знак «-» соответствует выходным токам чувствительных элементов 3 и 5;  $R$  — радиус сферического основания датчика  $E(t) = E_m \sin\omega t$  — напряженность измеряемого поля.

Если имитировать входные токовые сигналы двойного датчика в соответствии с выражениями (2) и (3) и подавать их в первичные измерительные цепи датчика, то можно осуществлять его настройку и градуировку в отсутствие поля. Эти теоретические положения легли в основу построения низковольтной измерительной установки для настройки и градуировки двойных датчиков.

**Низковольтная измерительная установка.** Для имитации входных токовых сигналов создан имитатор токовых сигналов электроиндукционных датчиков (рис. 3).

Структурная схема имитатора токовых сигналов электроиндукционных датчиков напряженности ЭП представлена на рис. 4.

Имитатор токовых сигналов состоит из измерительного генератора 1 синусоидальных напряжений с плавной регулировкой амплитуды; фазорегуляторов 2 и 3 с грубой и плавной регулировкой фазы; регуляторов амплитуд сигналов 4–6; парафазных каскадов 7–9 для преобразования входного сигнала в два одинаковых сигнала, сдвинутых по фазе относительно друг друга на  $180^\circ$ ; шунтов  $R$  для преобразования токов в напряжение; измерительных приборов: фазометров  $\phi$  для установки заданных фазовых сдвигов и вольтметров  $V$  для установки заданных токов.

Имитатор сигналов электроиндукционных датчиков вырабатывает три пары парафазных синусоидальных токовых сигналов сдвинутых, в общем случае, на различные фазовые углы

$$\begin{aligned} i_{x1}(t) &= -I_{mx} \sin\omega t & i_{x2}(t) &= I_{mx} \sin\omega t \\ i_{y1}(t) &= -I_{my} \sin(\omega t + \psi_1) & i_{y2}(t) &= I_{my} \sin(\omega t + \psi_1) \\ i_{z1}(t) &= -I_{mz} \sin(\omega t + \psi_2) & i_{z2}(t) &= I_{mz} \sin(\omega t + \psi_2), \end{aligned} \quad (4)$$

где  $\psi_1, \psi_2$  — регулируемые углы сдвига фаз между первым и вторым и первым и третьим сигналами имитатора и  $I_{mx}, I_{my}, I_{mz}$  — регулируемые амплитуды токовых сигналов. Для исследования двойного датчика на имитаторе достаточно воспроизвести два парафазных выходных сигнала со сдвигом фаз  $\Psi = 0$ .

Сопоставляя выражения (2) и (3) с выражениями (4), устанавливаем их взаимосвязи

$$\begin{aligned} i_{x1}(t) &= -i_1(t) = -3\pi\epsilon_0\omega R^2 \sin^2\theta_0 \cdot E(t) = \\ &= -3\pi\epsilon_0\omega R^2 \sin^2\theta_0 \cdot E_m \cdot \sin\omega t = -I_{mx} \sin\omega t; \end{aligned} \quad (5)$$

$$\begin{aligned} i_{x2}(t) &= i_2(t) = 3\pi\epsilon_0\omega R^2 \sin^2\theta_0 \cdot E(t) = \\ &= 3\pi\epsilon_0\omega R^2 \sin^2\theta_0 \cdot E_m \cdot \sin\omega t = I_{mx} \sin\omega t, \end{aligned} \quad (6)$$

где  $I_{mx} = 3\pi\epsilon_0\omega R^2 \sin^2\theta_0 \cdot E_m$ .

$$\begin{aligned} i_{y1}(t) &= -i_3(t) = -3\pi\epsilon_0\omega R^2 \cos^2\theta_2 \cdot E(t) = \\ &= -3\pi\epsilon_0\omega R^2 \cos^2\theta_2 \cdot E_m \cdot \sin\omega t = -I_{my} \sin\omega t; \end{aligned} \quad (7)$$

$$\begin{aligned} i_{y2}(t) &= i_4(t) = 3\pi\epsilon_0\omega R^2 \cos^2\theta_2 \cdot E(t) = \\ &= 3\pi\epsilon_0\omega R^2 \cos^2\theta_2 \cdot E_m \cdot \sin\omega t = I_{my} \sin\omega t, \end{aligned} \quad (8)$$

где  $I_{mx} = 3\pi\epsilon_0\omega R^2 \cos^2\theta_2 \cdot E$ .

Выражения для токовых сигналов легли в основу проведения эксперимента по получению статистических характеристик двойных датчиков в отсутствие ЭП.

Расчетные значения токов имитатора сигналов датчика и выходные напряжения двойных датчиков, получаемые 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	287,9	312,20
$U(t)$	16,68	33,23	66,9	100	132,03	164,49	198,05	217,43	233,38

**Эксперимент 1.** Первый эксперимент со сдвоенным датчиком проведем с помощью имитатора токовых сигналов в отсутствии внешнего ЭП. Заменителем электрического поля будут эквиваленты напряженности — токовые сигналы, получаемые с имитатора токовых сигналов. Поэтому рассчитаем попарно в соответствии с выражениями (5), (6) и (7), (8) выходные токи имитатора сигналов датчиков для напряженности ЭП, пошагово изменяющейся от 1 кВ/м до 14 кВ/м, и занесем их в табл. 1. С помощью имитатора токовых сигналов рассчитанные значения токов попарно подаются на входы первичных измерительных цепей первого и второго двойных датчиков, входящих в состав сдвоенного датчика.

Первичные измерительные цепи датчиков представляют собой дифференциальные интеграторы тока, с выходов которых снимаются напряжения  $U_1(t)$  и  $U_2(t)$  и заносятся в табл. 1. Напряжения  $U_1(t)$  и  $U_2(t)$  являются выходными напряжениями первого и второго двойных датчиков. Теоретически значения напряжений  $U_1(t)$  и  $U_2(t)$  могут быть рассчитаны по выражениям

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

$$\text{и } U_2(t) = [(6\pi\epsilon_0 R^2 \sin^2\theta_1) / C_{\text{инт.}}] \cdot E(t), \quad (9)$$

где  $C_{\text{инт.}} = 6,8 \text{ нФ}$  — интегрирующая емкость в интеграторах токов.

Рассчитанные по выражениям (9) значения напряжений  $U_1(t)$  и  $U_2(t)$  отличаются от измеренных не более чем на  $\pm 1 \%$ .

По данным табл. 1. построены графики статических характеристик выходных напряжений первого  $U_1(E)$ , второго  $U_2(E)$  двойных и сдвоенного  $U(E)$  датчиков и представлены на рис. 5. На рис. 5 значком « $\cdot$ » обозначены экспериментальные точки статических характеристик  $U_1(E)$ ,  $U_2(E)$  и  $U(E)$ , а сплошными линиями — аппроксимация этих точек линейными зависимостями.

Из анализа рис. 5 и табл. 1 следует, что выходные напряжения двойных датчиков при одинаковых значениях напряженности ЭП не равны, т.е.  $U_1 \neq U_2$ . Из условия выполнения метода измерений по среднему значению следует обязательное равенство выходных сигналов двойных датчиков, входящих в состав двойного датчика при одинаковой напряженности ЭП. В связи с этим необходимо произвести подстройку коэффициента преобразования измерительной цепи первого двойного датчика, т.к. его выходное напряжение  $U_1 < U_2$ .

Для этого в измерительной цепи датчика предусмотрены масштабные преобразователи, регули-

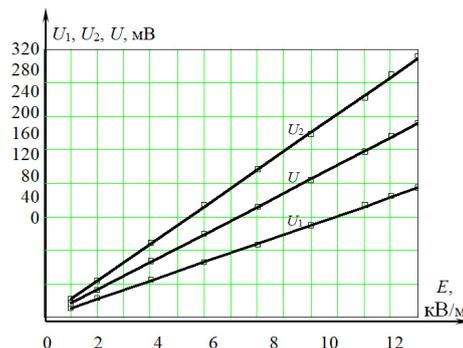


Рис. 5. Графики выходных напряжений сдвоенного датчика при настройке с помощью имитатора токовых сигналов

ровкой которых добиваемся равенства выходных напряжений  $U_1 = U_2$ . Выравниванием выходных напряжений двойных датчиков добиваются равенства их статических характеристик  $U_1(E)$  и  $U_2(E)$ . Поскольку выходное напряжение сдвоенного датчика представляет собой среднее значение между напряжениями  $U_1$  и  $U_2$ , то при их равенстве сдвоенный датчик будет иметь в однородном поле такую же статическую характеристику, как и у двух одинарных датчиков, входящих в его состав. После доведения  $U_1$  до  $U_2$  и получения равенства  $U_1 = U_2$  статические характеристики первого двойного датчика и сдвоенного датчика принимаются равными статической характеристике второго двойного датчика, т.е.  $U_2(E)$ . Таким образом, в результате подстройки коэффициента преобразования измерительной цепи первого двойного датчика с помощью МП 1 добиваемся равенства статических характеристик  $U_1(E) \approx U_2(E) \approx U(E)$ . Усредненная статическая характеристика  $U(E)$  сдвоенного датчика представлена в табл. 1. Таким образом, после регулировки и выполнения равенства  $U_1(E) \approx U_2(E) \approx U(E)$  сдвоенный датчик готов к измерениям в реальных электрических полях.

**Теория 2.** После настройки и градуировки сдвоенных датчиков напряженности в отсутствии ЭП необходимо произвести снятие их статических характеристик в реальном однородном ЭП. Однородное ЭП создается между плоскопараллельными пластинами, если размеры пластин много больше расстояния между ними [10]. При подключении к плоскопараллельным пластинам высокого напряжения в их средней части генерируется однородное ЭП с напряженностью

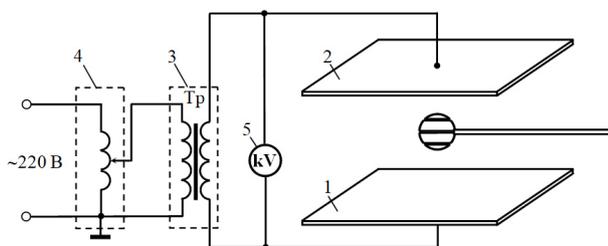


Рис. 6. Высоковольтная измерительная установка

$$E_p = V/d, \quad (10)$$

где  $E_p$  — расчетная напряженность однородного ЭП;  $V$  — напряжение на плоскопараллельных пластинах;  $d$  — расстояние между пластинами. Если плавно или пошагово изменять напряжение  $V$  между плоскопараллельными пластинами, можно изменять значение напряженности однородного ЭП. Эти теоретические положения легли в основу построения высоковольтной измерительной установки для настройки и градуировки двоянных датчиков в реальных однородных ЭП.

**Высоковольтная измерительная установка.** Для экспериментальных исследований создана высоковольтная измерительная установка, генерирующая однородное ЭП заданной напряженности (генератор поля). Высоковольтная измерительная установка схематично представлена на рис. 6.

Высоковольтная измерительная установка состоит из двух проводящих плоскопараллельных пластин 1 и 2, высоковольтного трансформатора 3-го типа ВТО-53, лабораторного автотрансформатора 4-го типа ЛАТР-1 и электростатического киловольтметра 5-го типа С-197, кл. 1,0.

Крепление плоскопараллельных пластин между собой осуществляется с помощью направляющих втулок и диэлектрических трубок. Такое соединение позволяет изменять расстояние между полеформирующими электродами от 0 до 0,7 м. Плоскопараллельные пластины 1 и 2 выполнены из дюралюминия толщиной 5 мм и размерами 1,2×1,2 м (рис. 6).

Высоковольтная измерительная установка работает от сети переменного тока 220 В частоты 50 Гц. Высоковольтный трансформатор, посредством включенного в его первичную цепь ЛАТРа, позволяет получить на полеформирующих электродах плавно регулируемое переменное синусоидальное напряжение от 0 до 12 кВ.

В установке предусмотрено устройство позиционирования (на рис. 6 не показано), осуществляю-

щее фиксацию датчика в любой точке эталонного поля.

**Эксперимент 2.** Экспериментальные исследования двоянного датчика в реальном однородном ЭП направлены на

1) определение статических характеристик датчика вида  $U=f(E_p)$ ,  $U_1=f(E_p)$ ,  $U_2=f(E_p)$ , где  $U$ ,  $U_1$  и  $U_2$  — выходные напряжения двоянного датчика, первого и второго двойных датчиков в зависимости от значения расчетной напряженности  $E_p$  (см. выражение (10) соответственно;

2) сопоставление статических характеристик  $U=f(E_p)$ ,  $U_1=f(E_p)$ ,  $U_2=f(E_p)$  со статическими характеристиками, полученными с помощью имитатора токовых сигналов для подтверждения возможности проведения градуировки датчиков в отсутствие внешнего ЭП.

При определении статических характеристик двоянный датчик на изолирующей штанге закреплялся в устройстве позиционирования, с помощью которого вводился в зону измерения на равных расстояниях от пластин 1 и 2 и ориентировался по направлению поля. Расстояние между датчиком и пластинами, для исключения их влияния на двоянный датчик, было выбрано из условия  $d > 5D$  ( $D$  — диаметр сферического основания двоянного датчика) выбиралось равным не менее  $d = 0,3$  м [11, 12]. Для обеспечения симметрии и равнозначности плоскопараллельных пластин ни одна из них не была заземлена.

При снятии статических характеристик ЛАТРОм 4 на пластинах 1 и 2 высоковольтной измерительной установки пошагово изменялось напряжение от 0 до 10 кВ с шагом в 1 кВ и для каждого шага по выражению (10) рассчитывалась напряженность однородного ЭП  $E_p$  и записывалась в табл. 2—табл. 4. При этом на выходах двоянного датчика измерялись напряжения  $U(E_p)$ ,  $U_1(E_p)$  и  $U_2(E_p)$ , а их значения записывались в соответствующие графы табл. 2—табл. 4.

Значения расчетной напряженности пересчитывались в значения выходных напряжений двоянного датчика и далее сравнивались со значениями выходных напряжений двоянного датчика, полученными после его настройки с помощью имитатора токовых сигналов. По результатам сравнения делалась предварительная оценка погрешности двоянного датчика.

Определение статических характеристик  $U=f(E_p)$ ,  $U_1=f(E_p)$ ,  $U_2=f(E_p)$  для двоянного датчика проводилось как при прямом, так и при обратном ходе. Поэтому на каждом шаге измерений определялось среднее из двух измеренных значений напряжения, и оно записывалось в табл. 2—табл. 4. Всего на каждом направлении делалось 10 отсчетов.

Таблица 2

Статическая характеристика первого двойного датчика в однородном поле

V, кВ	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
$E_p$ , кВ/м	1,43	2,86	4,29	5,71	7,14	8,57	10	11,43	12,86	14,29
$U_1$ , мВ	29,8	62,77	92,64	131,37	162,25	192,12	219,97	252,86	287,78	323,72
$U_1$ , мВ ±1%	29,5	62,15	97,72	130,07	160,64	190,22	219,79	250,36	284,93	320,51
$E$ , кВ/м	1,34	2,82	4,43	5,89	7,28	8,62	9,96	11,34	12,91	14,52
$\gamma$ , %	-6	-1	-2,6	3,8	2,5	1,1	-0,77	-0,2	0,95	2,2

Статическая характеристика второго двойного датчика в однородном поле

$V$ , кВ	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
$E_p$ , кВ/м	1,43	2,86	4,29	5,71	7,14	8,57	10	11,43	12,86	14,29
$U_2$ , мВ	29,96	61,90	89,89	126,54	157,49	187,45	216,22	243,40	276,33	307,28
$U_2$ , мВ $\pm 1\%$	30,26	60,52	90,78	127,82	159,08	189,34	218,4	245,86	279,12	310,38
$E$ , кВ/м	1,37	2,74	4,11	5,79	7,21	8,58	9,89	11,14	12,64	14,05
$\gamma$ ,%	-2,7	0,4	-2,8	2,8	2,3	1,5	0,3	-1,2	-0,3	-0,2

Таблица 4

Статическая характеристика сдвоенного датчика в однородном поле

$V$ , кВ	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
$E_p$ , кВ/м	1,43	2,86	4,29	5,71	7,14	8,57	10,0	11,43	12,86	14,29
$U$ , мВ	29,88	62,34	91,26	128,96	159,87	189,79	218,10	248,13	282,06	315,50
$U$ , мВ $\pm 1\%$	29,88	61,34	94,25	128,95	159,86	189,79	219,78	248,11	282,03	315,45
$E$ , кВ/м	1,35	2,78	4,27	5,84	7,24	8,6	9,95	11,24	12,77	14,29
$\gamma$ ,%	-4,4	-0,3	-2,7	3,3	2,4	1,3	-0,2	-0,7	0,3	1

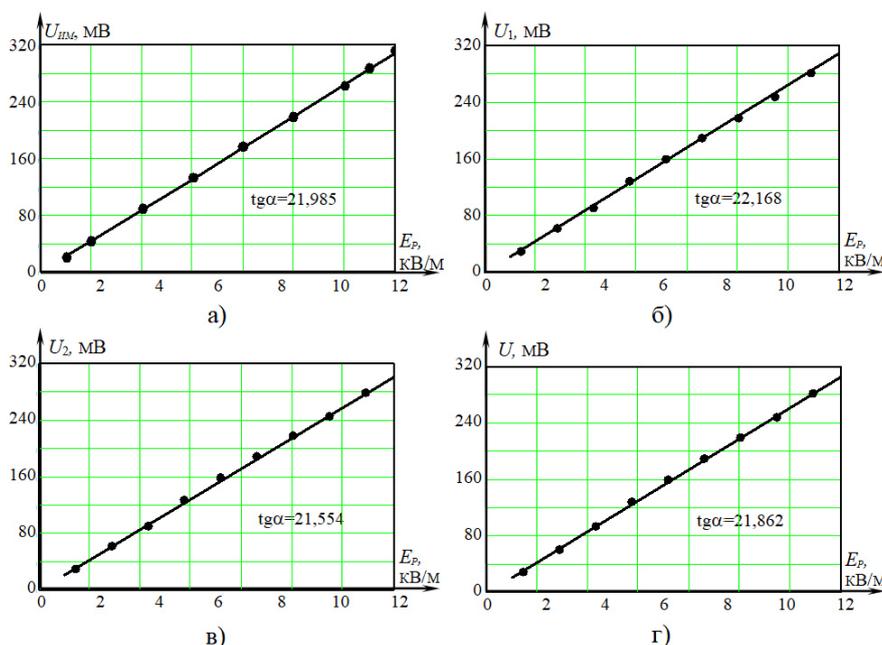


Рис. 7. Статические характеристики выходных сигналов сдвоенного датчика:  
 а) при настройке датчика с помощью имитатора сигналов  $U_{им}(E_p)$ ;  
 б) при снятии характеристик в однородном поле для первого двойного датчика  $U_1(E_p)$ ;  
 в) для второго двойного датчика  $U_2(E_p)$ ; г) для сдвоенного датчика  $U(E_p)$

Далее с помощью ПЭВМ осуществлялась статистическая обработка результатов измерений, и для каждого шага измерений производился оценочный расчет основной погрешности выходных напряжений сдвоенного датчика.

Обработанные с таким подходом экспериментально снятые данные для статических характеристик, а также коэффициенты преобразования сдвоенного датчика сведены в табл. 2–табл. 4.

На рис. 7 представлены построенные по данным табл. 2–табл. 4 статические характеристики выходных сигналов первого двойного датчика  $U_1(E_p)$  (рис. 7б), второго двойного датчика  $U_2(E_p)$  (рис. 7в) и сдвоенного датчика  $U(E_p)$  (рис. 7г) в зависимости от расчетной напряженности  $E_p$  (см. выражение (10)) однородного ЭП. На этом же рисунке представлена статическая характеристика  $U_{им}(E_p)$  (см. рис. 7а) сдвоенного датчика, после его настройки,

с использованием имитатора сигналов с учетом равенства  $U_2 = U_{им}$ . Графики рис. 7 представлены в виде экспериментальных точек и их аппроксимированных линейных зависимостей. На графиках указаны тангенсы углов наклона аппроксимированных линейных зависимостей, которые позволяют оценить их расхождение. Расхождение графиков статических характеристик составляют не более 3 %, а расхождение между статической характеристикой  $U_{им}(E_p)$ , полученной при градуировке двоянного датчика с помощью имитатора токовых сигналов, и статической характеристикой  $U(E_p)$  двоянного датчика, полученной в однородном поле не превышает 1 %.

Поскольку эксперимент проводился оценочный, то более тщательная регулировка и настройка измерительных цепей двоянного датчика позволили бы значительно снизить процент расхождения статических характеристик.

Следует заметить, что отрегулированный и настроенный с помощью имитатора сигналов двоянный датчик не потребовал дополнительной корректировки коэффициентов преобразования в однородном ЭП. При этом хорошее совпадение (до  $\pm 3$  %) статических характеристик двоянного датчика подтверждает правильность математических соотношений, положенных в основу расчетов его конструктивных параметров.

Таким образом, подтверждена возможность аналитического расчета двоянных датчиков и настройки их измерительных цепей в отсутствие ЭП. Очевидно, что это обстоятельство позволит сократить время настройки и поверки двоянных электроиндукционных сферических датчиков напряженности ЭП при их серийном выпуске.

**Результаты исследований.** В результате проведенных исследований была осуществлена настройка и градуировка измерительных цепей двоянного датчика в отсутствие внешнего ЭП и получены его статические характеристики  $U_{им} = f(E_p)$ ,  $U_{им1} = f(E_p)$ ,  $U_{им2} = f(E_p)$ . Для этого использовался имитатор токовых сигналов, генерирующий токи, соответствующие токам, таким же, как и при нахождении двоянного датчика в однородном ЭП. Для экспериментальных исследований двоянного датчика в однородном ЭП была создана высоковольтная измерительная установка, генерирующая регулируемое однородное ЭП. С её использованием получены статические характеристики двоянного датчика  $U = f(E_p)$ ,  $U_1 = f(E_p)$ ,  $U_2 = f(E_p)$  и сопоставлены со статическими характеристиками  $U_{им} = f(E_p)$ ,  $U_{им1} = f(E_p)$ ,  $U_{им2} = f(E_p)$ , полученными в отсутствие поля. Результаты сопоставления показали хорошее совпадение статических характеристик. Расхождение составляло не более  $\pm 3$  %.

Поскольку эксперименты были проведены оценочные, то такое согласование статических характеристик можно признать приемлемым. Более тщательная настройка измерительных цепей двоянного датчика позволит снизить погрешность расхождения статических характеристик до (0,5–1) %.

Полученные результаты исследований позволяют подтвердить адекватность теории, положенной в основу расчетов двоянных электроиндукционных датчиков напряженности ЭП.

**Выводы и заключения.** Из результатов экспериментальных исследований можно заключить:

1) электроиндукционные датчики напряженности ЭП можно градуировать через градуировку

их измерительных цепей с помощью имитатора токовых сигналов, генерирующих токи, соответствующие токам, вырабатываемыми датчиком, находящимся в однородном ЭП;

2) подтверждена возможность теоретического расчета конструктивных параметров двоянных датчиков напряженности ЭП и их градуировка в отсутствие поля.

В связи с представленным заключением можно сделать вывод, что двоянные датчики являются перспективными и открывают новое направление в области измерений электрических полей с использованием новых методов их измерений.

#### Библиографический список

1. Пат. № 207465 U1 Российская Федерация, МПК G 01 R 29/12. Устройство для измерения напряженности электрического поля со двоянным датчиком / Бирюков С. В., Тюкина Л. В., Данышина В. В. № 202111599; 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. ГОСТ Р 51070-97. Измерители напряженности электрического и магнитного полей. Общие технические требования и методы испытаний. Введ. 1998–01–01. Москва: Изд-во стандартов, 1997. 16 с.
4. Бузинов В. С. Образцовая установка для поверки и калибровки малых дипольных антенн // Измерительная техника. 1967. № 6. С. 50–53.
5. Кунце Х. -И. Методы физических измерений: пер. с нем. Москва: Мир, 1989. 216 с.
6. ГОСТ Р 8.736-2011. 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.
7. Сквайрс Дж. Практическая физика. Москва: Книга по требованию, 2012. 248 с.
8. 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.
9. Бирюков С. В. Измерение напряженности электрических полей в диэлектрических средах электроиндукционными датчиками. Методы и средства измерений: моногр. Омск: Изд-во ОмГТУ, 2011. 196 с.
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. Патент № 23687 РФ, 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. Патент № 1366971 A1 SU, МПК G01R 29/12, G01R 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.

**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

ORCID: 0000-0002-7316-3797

AuthorID (SCOPUS): 57203100232

#### Для цитирования

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.

Статья поступила в редакцию 27.01.2022 г.

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