



ПРИБОРОСТРОЕНИЕ, МЕТРОЛОГИЯ И ИНФОРМАЦИОННО- ИЗМЕРИТЕЛЬНЫЕ ПРИБОРЫ И СИСТЕМЫ

УДК 621.317.328

DOI: 10.25206/1813-8225-2021-179-62-67

С. В. БИРЮКОВ¹Л. В. ТЮКИНА¹А. В. ТЮКИН²

¹Омский государственный
технический университет,
г. Омск

²Сибирский государственный
автомобильно-дорожный университет,
г. Омск

СДВОЕННЫЕ СФЕРИЧЕСКИЕ ДАТЧИКИ НАПРЯЖЕННОСТИ НИЗКОЧАСТОТНЫХ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ПОЛЕЙ НОВОГО ПОКОЛЕНИЯ

Электрические поля неблагоприятно воздействуют на окружающую среду, технические и биологические объекты. В связи с этим необходимо контролировать уровни электрических полей, важной характеристикой которых является напряженность электрического поля. Для восприятия электрического поля необходимы датчики напряженности электрического поля. Существующие датчики неудобны в эксплуатации и имеют высокую погрешность восприятия напряженности электрического поля, достигающую $\pm 20\%$. В рассматриваемой работе выдвигается идея создания универсального датчика, относящегося к новому виду сдвоенных датчиков. Его универсальность заключается в том, что он воплощает в себе все виды известных датчиков — одинарные, двойные и теперь еще сдвоенные. Погрешность восприятия напряженности неоднородного электрического поля сдвоенных датчиков не превышает $+5\%$ во всем пространственном диапазоне измерения $0 \leq a \leq 1$. При этом расстояние d до источника поля ограничено только радиусом сферического основания датчика, т.е. $d \approx R$. В то время как для датчиков, входящих в состав сдвоенного датчика в том же пространственном диапазоне измерения, погрешность составляет $\pm 35\%$. Используя сдвоенный датчик, можно добиться значительного повышения точности измерения напряженности неоднородных электрических полей в широком пространственном диа-

Введение. Измерение напряженности низкочастотных электрических полей энергетических систем непосредственно связано с разработкой датчиков, взаимодействующих с электрическим полем. Разработка датчиков напряженности электрических полей энергетических объектов ведется с начала 80-х годов [1–4] и др. Многолетний опыт показывает целесообразность использования для этих целей, с экономической и практической точки зрения, электроиндукционных датчиков напряженности электрических полей. В настоящее время существует большое многообразие таких датчиков [5–10]. Датчики отличаются как формой тела основания, так и направленностью восприятия вектора напряженности электрического поля [11]. Формы основания датчиков могут быть: планарная, кубическая, цилиндрическая и сферическая [12]. Тело основания датчика чаще всего является проводящим, поскольку принцип работы датчика основывается на явлении электрической индукции. Форма тела основания датчика определяется условиями измерения. В большей части для измерения электрических полей энергетических объектов, таких как линии электропередачи 330 кВ и более, высоковольтные подстанции 750 кВ и более, целесообразно использовать сферическую форму тела основания, поскольку взаимодействие проводящего тела сферической формы с электрическим полем достаточно просто описывается математически. Это позволяет получать аналитические формулы погрешности датчиков при их взаимодействии с электрическим полем. Оценка погрешностей электроиндукционных датчиков показывает их уровень от 10 до 20 %. Из сказанного следует, что разработка высокоточных электроиндукционных сферических датчиков напряженности электрического поля является довольно сложной задачей и исчерпывает свои возможности.

В связи с этим разработка электроиндукционных сферических датчиков напряженности электрического поля нового поколения, обеспечивающих высокую точность в широком пространственном диапазоне измерения, является целью данной работы.

Постановка задачи. На наш взгляд, повышение точности рассматриваемых датчиков лежит на уровне конструктивных решений. Поэтому необходимо исследовать существующие электроиндукционные сферические датчики напряженности электрического поля и на основании этого предложить идею создания датчика нового поколения с повышенной точностью измерения и использованием в широком пространственном диапазоне. Для этого необходимо решить следующие задачи:

- 1) рассмотреть конструктивные особенности группы известных электроиндукционных сферических датчиков напряженности электрического поля;
- 2) предложить идею по разработке датчика для измерения напряженности неоднородных электрических полей;
- 3) разработать датчик нового поколения, привести оценку его погрешности при измерении неод-

нородных электрических полей с подтверждением ее уменьшения.

Конструктивные решения датчиков. В настоящее время используются два теоретически обоснованных конструктивных решения электроиндукционных датчиков напряженности электрического поля вне зависимости от формы корпуса их оснований. К таким решениям конструктивного исполнения относятся два известных вида электроиндукционных датчиков напряженности электрического поля — одинарные [5] и двойные [13]. Конструктивно одинарные датчики имеют один проводящий чувствительный элемент, изолированно расположенный с одной стороны проводящего основания корпуса датчика. В этом случае проводящее основание является вторым чувствительным элементом датчика. Двойные датчики имеют два чувствительных элемента, изолированно расположенных с двух противоположных сторон проводящего основания корпуса датчика. Одинарные датчики первого вида дешевы и просты в изготовлении, но сильно восприимчивы к различным электрическим помехам и наводкам, и в электрическом поле основание датчика имеет плавающий, т.е. неуправляемый потенциал. Сильная восприимчивость к помехам одинарных датчиков и плавающий потенциал основания датчика приводят их к значительным систематическим погрешностям. Последние обстоятельства ограничивают использование одинарных и способствуют широкому распространению двойных датчиков, относящихся ко второму виду.

Для дальнейших теоретических исследований рассмотрим сферические электроиндукционные двойные датчики напряженности электрического поля разного конструктивного исполнения. В качестве таких датчиков выберем два датчика. Оба датчика будут иметь в качестве основания сферический проводящий корпус. У одного датчика два диаметрально расположенных чувствительных элемента, выполненных в форме сферических сегментов, имеют угловые размеры $\theta_0 \leq 45^\circ$ [14, 15], у другого — в форме полусфер, т.е. сферических сегментов с угловыми размерами $\theta_0 = 90^\circ$ [16–18].

Конструктивная модель датчика первого исполнения. Двойной электроиндукционный трехкоординатный сферический датчик напряженности электрического поля первого конструктивного исполнения (рис. 1), рассмотрен в работе [15].

Датчик представляет собой проводящее сферическое основание 1, на поверхности которого размещены три пары проводящих чувствительных элементов 2-3, 4-5 и 6-7. Пары чувствительных элементов диаметрально противоположны относительно поверхности проводящей сферы 1 и расположены по трем координатным осям x , y и z , проходящим через центр сферического основания 0.

Чувствительные элементы выполнены в форме сферических сегментов и изолированы друг от друга и поверхности сферического основания. Угловой размер θ_0 чувствительных элементов, выбранный так, чтобы они не перекрывали друг друга, и не должен превышать 45° . Обеспечивая малую толщину

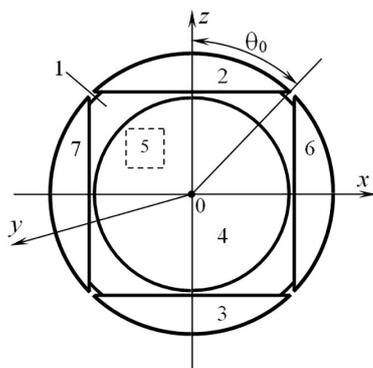


Рис. 1. Двойной трехкоординатный сферический датчик

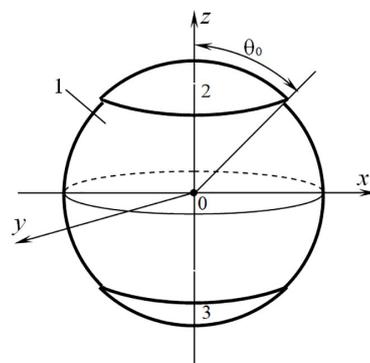


Рис. 2. Двойной однокоординатный сферический датчик

изоляция слоя и чувствительных элементов, добиваются того, что поверхность датчика можно считать единой сферической поверхностью, все точки которой в электрическом поле имеют равные потенциалы. Проводящее сферическое основание является средней точкой датчика. Дифференциальное включение двойного датчика в измерительную цепь позволяет исключить синфазные составляющие и значительно снизить погрешности, вызванные неоднородностью поля и внешними электрическими помехами.

Для проведения дальнейшего теоретического анализа будем рассматривать только одну из координатных осей, например, ось z , трехкоординатного датчика, сформировав при этом двойной однокоординатный сферический датчик (рис. 2). При теоретическом анализе в первую очередь интересует

погрешность сформированного датчика от неоднородности электрического поля.

Неоднородные электрические поля можно модулировать с помощью точечных зарядов [3, 7, 15, 17–23], поскольку поле точечного заряда убывает обратно пропорционально квадрату расстояния. Изменяя расстояние до источника поля, можно получать электрические поля разной степени неоднородности. В качестве показателя неоднородности поля может выступать параметр $a=R/d$, где R — линейный размер датчика, например, его радиус; d — расстояние от центра основания датчика до источника поля.

Погрешность от неоднородности электрического поля датчиков первого исполнения будем оценивать, воспользовавшись известным выражением для погрешности, приведенным в [3]

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

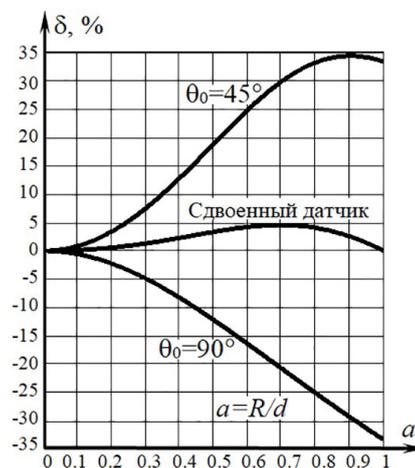
где $\theta_0 \leq 45^\circ$ — угловой размер чувствительного элемента, выполненного в форме сферического сегмента; $a=R/d$ — пространственный диапазон измерения, характеризующий степень неоднородности поля; R — радиус сферического основания датчика; d — расстояние от центра сферического основания до источника поля.

График погрешности от неоднородности электрического поля в зависимости от пространственного диапазона измерения a , построенный по выражению (1), для двойного датчика с угловыми размерами сферических сегментов $\theta_0=45^\circ$, представлен на рис. 3.

Из графика (рис. 3) следует, что двойной датчик первого исполнения при угловых размерах сферических сегментов $\theta_0=45^\circ$ во всем пространственном диапазоне измерения $0 \leq a \leq 1$ имеет положительную погрешность, достигающую 35%. Если ограничиться приемлемой погрешностью 10%, то расстояние d до источника поля не превысит $3R$, а пространственный диапазон измерения составит $0 \leq a \leq 0,35$.

Конструктивная модель датчика второго исполнения. Двойной электроиндукционный однокоординатный сферический датчик напряженности электрического поля второго конструктивного исполнения рассмотрен в работе [7].

Датчик второго исполнения рассмотрен в работе [7] и представлен на рис. 4. Конструктивно он состоит из проводящего сферического основания

Рис. 3. Графические зависимости погрешности от неоднородности электрического поля для двойных датчиков с угловыми размерами чувствительных элементов $\theta_0=45^\circ$ и $\theta_0=90^\circ$ и двойного датчика

и двух изолированных от сферического основания и друг от друга проводящих тонкостенных полусфер 1-2. Проводящие полусферы являются чувствительными элементами датчика. При принятии специальных мер датчик образует единую эквипотенци-

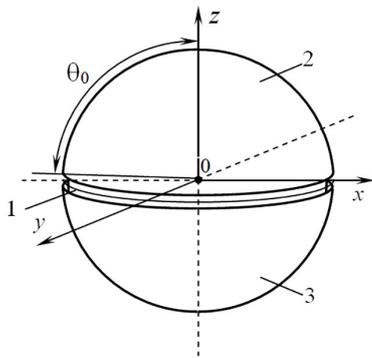


Рис. 4. Двойной однокоординатный датчик с чувствительными элементами в форме полусфер

альную сферическую поверхность. К специальным мерам относятся малый зазор между полусферами (не более 0,1 мм) и использование измерительной цепи для съема сигналов с чувствительных элементов с малым входным сопротивлением. Полусферы представляют собой сферические сегменты с угловым размером $\theta_0 \approx 90^\circ$, а проводящее сферическое основание является средней точкой датчика.

Воспользовавшись выражением (1), проведем оценку погрешности от неоднородности поля для двойного однокоординатного датчика с чувствительными элементами в форме полусфер, имеющих угловой размер $\theta_0 \approx 90^\circ$. Для этого построим по выражению (1) график (рис. 3) погрешности $\delta(a)$ датчика с угловыми размерами чувствительных элементов $\theta_0 = 90^\circ$.

Из графика (рис. 3) следует, что двойной датчик второго исполнения при угловых размерах сферических сегментов $\theta_0 = 90^\circ$ во всем пространственном диапазоне измерений $0 \leq a \leq 1$ имеет отрицательную погрешность, достигающую 35%. Если ограничиться допустимой погрешностью -10% , то расстояние d до источника поля не превысит $2R$, а пространственный диапазон измерения составит $0 \leq a \leq 0,45$.

Таким образом, можно заключить, что для датчиков первого и второго исполнения имеются следующие особенности и недостатки:

- знак и значения погрешностей от неоднородности поля зависит от угловых размеров их чувствительных элементов;
- приемлемая погрешность составляет $\pm 10\%$;
- ограничен пространственный диапазон измерения, который не может превышать $0 \leq a \leq 3R$.

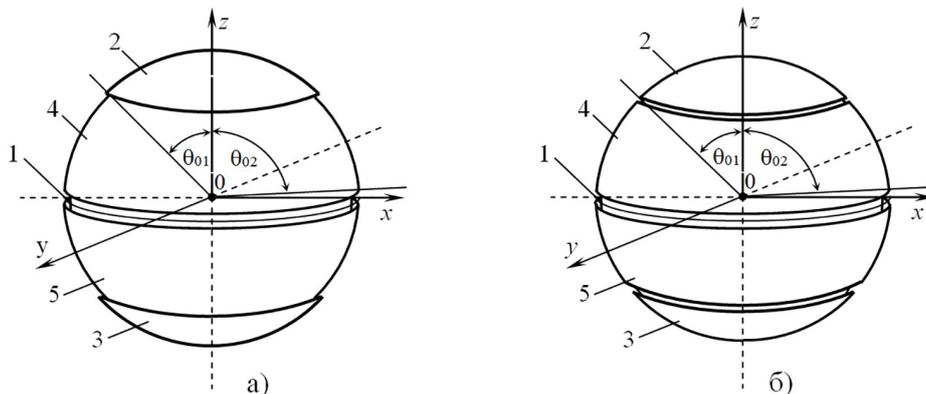


Рис. 5. Сдвоенные однокоординатные сферические датчики

Эти особенности и недостатки необходимо учитывать при разработке датчиков нового поколения, позволяющих с меньшими погрешностями и в широком пространственном диапазоне проводить измерения напряженности неоднородных электрических полей.

В основу построения датчиков нового поколения может быть положена особенность датчиков первого и второго исполнения, иметь разную по знаку погрешность от неоднородности электрического поля.

Датчик нового поколения. При теоретическом анализе датчиков были выявлены особенности двойных электроиндукционных сферических датчиков первого и второго исполнения. Эти особенности выражаются в отличие по знаку погрешностей в поочередно измеренных двумя датчиками значениях напряженности в одной точке неоднородного электрического поля. В связи с чем для одновременного измерения двух значений напряженности электрического поля в одной точке была выдвинута идея совмещения датчиков двух исполнений в одном. Это позволило бы проводить в одной точке поля одновременное измерение двумя датчиками напряженностей, измеренных с разными по знаку значениями погрешности с последующим определением среднего из них. Среднее значение между двумя величинами, измеренными с разными по знаку погрешностями, всегда будет ближе к истинному значению. Следовательно, при нахождении среднего между двумя измеренными значениями можно уменьшить погрешность измерения неоднородного электрического поля. Таким образом, объединив два датчика в один, получим универсальный датчик нового поколения. Универсальному датчику присвоим название — сдвоенный датчик, и он отнесен к третьему виду датчиков.

Введя понятие сдвоенного датчика наряду с известными двумя видами датчиков — одинарный и двойной, появляется еще и третий новый вид — сдвоенный. В свою очередь, сдвоенный датчик может быть как одинарным, так и двойным. Таким образом, сдвоенный датчик может воплощать в себе одинарные, двойные и сдвоенные виды датчиков. В этом его универсальность.

Сдвоенные датчики напряженности электрического поля разного конструктивного исполнения представлены на рис. 5.

Сдвоенный датчик (рис. 5а) состоит из проводящего сферического основания 1 и двух пар чувствительных элементов 2-3 и 4-5, расположенных на поверхности сферического основания и одной координатной оси z . Чувствительные элементы 2-3

выполнены с угловым размером $\theta_{01}=45^\circ$, а 4-5 — с угловым размером $\theta_{02}\approx 90^\circ$. Они изолированы друг от друга и от сферического основания. Толщина изоляционного слоя и чувствительных элементов датчика много меньше радиуса сферического основания. Это и специально принятые меры позволяют считать поверхность датчика единой сферической эквипотенциальной поверхностью. Проводящее сферическое основание является средней точкой датчика.

На рис. 5б представлен тот же датчик, но с составными чувствительными элементами. Это единственное их отличие в конструктивном решении. Датчик состоит из проводящего сферического основания 1 и двух пар чувствительных элементов 2-3 и (2+4)-(3+5), расположенных на поверхности сферического основания и одной координатной оси z . Чувствительные элементы 2-3 выполнены в форме сферических сегментов с угловым размером $\theta_{01}=45^\circ$. Чувствительные элементы 4-5 выполнены в форме сферического слоя с угловыми размерами у вершины $\theta_0\leq 45^\circ$, у основания — $\theta_{02}\approx 90^\circ$.

Теоретически обоснуем уменьшение погрешности при измерении неоднородных электрических полей двоянным датчиком.

При внесении двоянного датчика в электрическое поле происходит одновременное измерение напряженностей E_1 и E_2 каждым датчиком. Причем напряженность поля E_1 , измеренная датчиком с чувствительными элементами 2-3, имеет положительную погрешность, а напряженность E_2 , измеренная датчиком с чувствительными элементами 4-5, имеет отрицательную погрешность.

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

Воспользуемся математическим редактором MathCAD-14, построим по выражению (4) график погрешности от неоднородности электрического поля для двоянного датчика в зависимости от пространственного диапазона измерения a . График погрешности $\delta(a)$ представлен на рис. 3. На этом же рисунке показаны погрешности двойных датчиков, входящих в состав двоянного датчика с угловыми размерами сферических сегментов $\theta_0 = 45^\circ$ и $\theta = 90^\circ$ соответственно.

Из графиков рис. 3 следует, что двоянный датчик позволяет не только значительно снизить погрешность измерения неоднородных электрических полей, но и расширить пространственный диапазон измерения.

График погрешности для двоянного датчика показывает, что его погрешность не превышает +5 % во всем пространственном диапазоне измерения $0\leq a\leq 1$. При этом расстояние d до источника поля ограничено только радиусом сферического основания датчика, т.е. $d \approx R$. В то время как для датчиков, входящих в состав двоянного датчика в том же пространственном диапазоне измерения, погрешность составляет $\pm 35\%$.

Если ограничить у этих датчиков погрешность до $\pm 5\%$, то пространственные диапазоны измерения у них будут соответственно равны $0\leq a\leq 0,24$ ($d\approx 4R$) и $0\leq a\leq 0,3$ ($d\approx 3R$).

Таким образом, используя двоянный датчик, можно добиться значительного повышения точ-

С учетом этого запишем для каждого датчика выражения для измеренных значений напряженности электрического поля E_1 и E_2 :

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

где E_0 — напряженность электрического поля в исследуемой точке пространства.

Найдем среднее значение напряженности электрического поля

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

где $\delta = \frac{\delta_1 - \delta_2}{2}$; δ_1 — погрешность, получаемая при использовании первым датчиком в составе двоянного датчика; δ_2 — погрешность, получаемая при использовании вторым датчиком в составе двоянного датчика; δ — погрешность, получаемая при использовании двоянного датчика.

Проведем оценку погрешности δ двоянного датчика. Для этого подставим в выражение (2) погрешности δ_1 для углового размера сферического сегмента $\theta_{01} = 45^\circ$ и δ_2 для углового размера сферического сегмента $\theta_2 = 90^\circ$, определяемые выражением (1)

$$\delta(a) = \frac{\delta_1(a, 45^\circ) - \delta_2(a, 90^\circ)}{2}. \quad (3)$$

После преобразования выражения (3) получим

ности измерения напряженности неоднородных электрических полей в широком пространственном диапазоне измерений по сравнению с известными датчиками.

Результаты исследований. Проведенные исследования позволили на основании сравнительного анализа двойных датчиков выявить зависимость знака их погрешностей, вызванных неоднородностью поля от размеров чувствительных элементов датчиков.

Это позволило создать универсальный датчик напряженности электрического поля нового вида, относящийся к виду двоянных датчиков.

Сдвоенный датчик позволяет воспринимать напряженность неоднородного электрического поля с погрешностью, не превышающей +5 % во всем пространственном диапазоне измерения $0\leq a\leq 1$. При этом расстояние d до источника поля ограничено только радиусом сферического основания датчика, т.е. $d \approx R$.

Выводы и заключение. По результатам проведенных исследований предложен новый универсальный датчик, относящийся к сдвоенному виду датчиков. Таким образом, в работе введено новое понятие — «сдвоенный датчик». Поэтому на ряду с известными одинарными и двойными датчиками появился новый вид сдвоенных датчиков. Сдвоенный датчик без усложнения процесса измерений позволяет повысить точность измерения напряженности неоднородных электрических полей в широком пространственном диапазоне.

Библиографический список

1. 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: материалы Междунар. конф. по большим электрическим системам (СИГРЭ-72). Москва: Энергоатомиздат, 1974. С. 33–43.
2. Eggert S., Goltz S. NFM-1 ein aperiodisches Nahfeld — Stärkemessgerät für Messungen an Hochfrequenzarbeitsplätze // Radio Fernsehen Elektronik. 1976. Vol. 25 (15). S. 488–490.
3. Biryukov S. V., Kaidanov F. G., Kats R. A., Lozhnikov V. Ya. Calculation and measurement of fields on EHV and UHV substations and near transmission lines // CIGRE-86. International Conference on Large High Voltage Electric Systems, Report 36-06, Session 27th August–4th September. Paris, 1986. 5 p.
4. Сукманов В. И., Сафонов В. И., Ильин А. Н. [и др.]. Прибор для измерения напряженности электрического поля // Электрические станции. 1987. № 6. С. 69–71.
5. Берент Г. Н., Плейс И. Р. Датчик электрического поля // Приборы для научных исследований. 1971. № 6. С. 141–142.
6. Delong A. Zarojeni pro akumulacni měření intenzity elektromagnetického pole. ČSSR patent 148321; September 11th, 1971; April 15th, 1973.
7. 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.
8. Датчики напряженности электростатического поля EP-600. Руководства, инструкции, описание для «Narda PMM EP-600, EP-601, EP-602, EP-603, EP-604 датчики напряженности поля (ГОСТ 30804.4.3-2013)». URL: <https://newpribor.ru/catalog/ispitatelnoe-oborudovanie/probniki-polya/narda-pmm-ep-600-ep601-ep-602.html> (дата обращения: 05.08.2019).
9. Baicry M., Le Prado M. Device for measuring an electric field in a conducting medium and method of calibrating such a device. US patent 20160238646; filed February 17th, 2016; published August 18th, 2017.
10. William H. Beasley, Leon G. Byerley, Jody A. Swenson, Ivan G. Bogoev. Low power, low maintenance. Electric-field meter. US patent 6984971; filed March 14th, 2002; published January 10th, 2006.
11. 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.
12. Бирюков С. В. Трехкоординатный электроиндукционный датчик напряженности электрического поля в виде трех взаимно перпендикулярных дисков // Омский научный вестник. 2020. № 5 (173). С. 67–73. DOI: 10.25206/1813-8225-2020-173-67-73.
13. Гатман С. Двойной измеритель электрического поля с защитой // Приборы для научных исследований. 1968. № 1. С. 45–49.
14. Бирюков С. В., Ложников В. Я. Цифровой измеритель напряженности электрического поля промышленной частоты // Приборы и техника эксперимента. 1981. № 1. С. 275.
15. Horvath T., Clement G. Measurement of the distortion less electric field intensity of high voltage installations // Third International Symposium on High Voltage Engineering. Milan, 28–31 Aug. 1979. P. 44.05/1–44.05/4.
16. Бирюков С. В., Тюкин А. В. Конструктивные погрешности трехкоординатных датчиков напряженности электрического поля // Омский научный вестник. 2017. № 3 (153). С. 82–86.
17. 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.
18. Charles J., Miller J. The Measurement of Electric Fields in Live Line Working // IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems. 1967. Vol. PAS-86, Issue 4. P. 493–498. DOI: 10.1109/TPAS.1967.291859.
19. Pop E., Crișans S., Stoica V. Măsurarea intensității cîmpului electric alternativ // Metrologia aplicată. 1975. Vol. 22, no. 2. P. 73–81.
20. Böcker H., Hagenmeyer E. Ein Paित्रag zur Messung der elektrischen Feldstärke bei hoher Gleichspannung // Elektrotechnische zeitschrift. 1966. A87, № 23. S. 829–831.
21. Feser K., Pfaff W. A potential free spherical sensor for the measurement of transient electric fields // IEEE Transaction on Power Apparatus and Systems. 1984. Vol. PAS-103, Issue 10. P. 2904–2911. DOI: 10.1109/TPAS.1984.318292.
22. Thomson E. M., Medelius P. J., Uman M. A. A remote sensor for the three components of transient electric field // IEEE Trans. Ind. Electron. 1988. Vol. 35 (3). P. 426–433. DOI: 10.1109/41.3117.
23. Bassen H. I., Smith G. S. Electric field probes — a review // IEEE Transactions on Antennas and Propagation. 1983. Vol. 31, no. 5. P. 710–718. DOI: 10.1109/TAP.1983.1143126.

БИРЮКОВ Сергей Владимирович, доктор технических наук, профессор (Россия), профессор кафедры «Физика» Омского государственного технического университета (ОмГТУ).

SPIN-код: 9384-0078

ORCID: 0000-0002-1362-9911

AuthorID (SCOPUS): 7006438919

ТЮКИНА Людмила Владимировна, соискатель кафедры «Физика» ОмГТУ.

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

Адрес для переписки: sbiryukov154@mail.ru

Для цитирования

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.

Статья поступила в редакцию 21.06.2021 г.

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