

ПРИБОРОСТРОЕНИЕ, МЕТРОЛОГИЯ И ИНФОРМАЦИОННО- ИЗМЕРИТЕЛЬНЫЕ ПРИБОРЫ И СИСТЕМЫ

УДК 621.317.328

DOI: 10.25206/1813-8225-2020-173-67-73

С. В. БИРЮКОВ

Омский государственный
технический университет,
г. Омск

ТРЕХКООРДИНАТНЫЙ ЭЛЕКТРОИНДУКЦИОННЫЙ ДАТЧИК НАПРЯЖЕННОСТИ ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ПОЛЯ В ВИДЕ ТРЕХ ВЗАИМНО ПЕРПЕНДИКУЛЯРНЫХ ДИСКОВ

Измерение параметров электрических полей, воздействующих на технические и биологические объекты немислимо без использования датчиков напряженности электрического поля. Точное измерение и контроль уровней напряженности электрического поля представляется довольно сложной задачей. Это связано с тем, что напряженность — это векторная величина, характеризующаяся не только модулем, но и направлением. Существующее большое многообразие датчиков напряженности различных форм (кубическая, цилиндрическая, сферическая), принципа действий (направленного и ненаправленного приема) и особенностей конструкции (корпусная, бескорпусная) не обеспечивают желаемых метрологических характеристик. Поэтому работа, связанная с разработкой датчиков напряженности электрического поля не стоит на месте и является актуальной. Целью исследования является создание бескорпусного трехкоординатного датчика напряженности электрического поля, расчет которого был бы прост как для корпусных, а простота конструкции и малая масса как у бескорпусных датчиков. Созданный в результате исследований датчик конструктивно представляет три взаимно перпендикулярных диэлектрических диска, основаниями которых являются проводящие чувствительные элементы. Датчик, в зависимости от желаемой погрешности, имеет различный пространственный диапазон измерения, причем чем больше погрешность, тем шире диапазон. Для погрешности измерения, не превышающей 10 %, максимально возможный пространственный диапазон измерения составит $a = 0,4$. Следовательно, минимально возможное расстояние до источника поля, при котором погрешность датчика не выйдет за пределы 10 %, составит $d = 2,5R$, где R — радиус диска датчика.

Ключевые слова: трехкоординатный датчик напряженности электрического поля, бескорпусной датчик напряженности электрического поля, дисковый датчик напряженности электрического поля, напряженность электрического поля, погрешность от неоднородности поля, электрометрические измерения.

Введение. Измерение параметров электрических полей, воздействующих на технические и биологические объекты, немислимо без использования датчиков напряженности электрического поля. Использование таких датчиков в измерителях напряженности низкочастотных электрических полей началось еще в 1970-х годах как в России [1–5], так и за рубежом [6–10].

Напряженность является силовой характеристикой электрического поля, поэтому она оказывает силовое воздействие на технические и биологические объекты. Оценка влияния напряженности поля на отмеченные объекты связана с электромагнитной совместимостью (ЭМС), т.е. с измерением и контролем уровней параметров поля. В настоящее время в России ЭМС технических и биологических объектов регламентируют более двух сотен общепринятых промышленных стандартов. Для проведения исследований на устойчивость к электромагнитным воздействиям наука и промышленность предлагают целый ряд датчиков напряженности электрического поля. Однако не все они удовлетворяют высоким метрологическим требованиям. Так как точное измерение и контроль уровней напряженности электрического поля представляется довольно сложной задачей. Это связано, прежде всего, с тем, что напряженность поля — это векторная величина, характеризующаяся не только модулем, но и направлением. Согласно ГОСТ Р 51070-97 [11] датчики напряженности

делятся на датчики направленного и ненаправленного приема. Датчики направленного приема требуют их ориентации в электрическом поле до достижения максимального сигнала. В этом случае датчик будет ориентирован по направлению поля. Датчики ненаправленного приема одновременно воспринимают три составляющие вектора напряженности электрического поля. Поэтому при соответствующей обработке сигналов с датчика можно определить как модуль, так и направление вектора напряженности электрического поля. В связи с этим векторную величину удобнее измерять трехкоординатными датчиками, поскольку они не требуют их ориентации в пространстве электрического поля. Формы и конструкции таких датчиков весьма разнообразны. Для построения датчиков обычно используется кубическая [12–14], цилиндрическая [15, 16] и сферическая формы [17–20]. Общей особенностью таких датчиков является то, что их чувствительные элементы попарно устанавливаются на трех координатных осях прямоугольной декартовой системы координат. Конструкции трехкоординатных электроиндукционных датчиков напряженности электрического поля датчиков можно разделить на два типа. К первому типу датчиков относятся датчики с замкнутой (корпусные), а ко второму — с разомкнутой (бескорпусные) системой чувствительных элементов. Корпусные датчики с замкнутой системой чувствительных элемен-

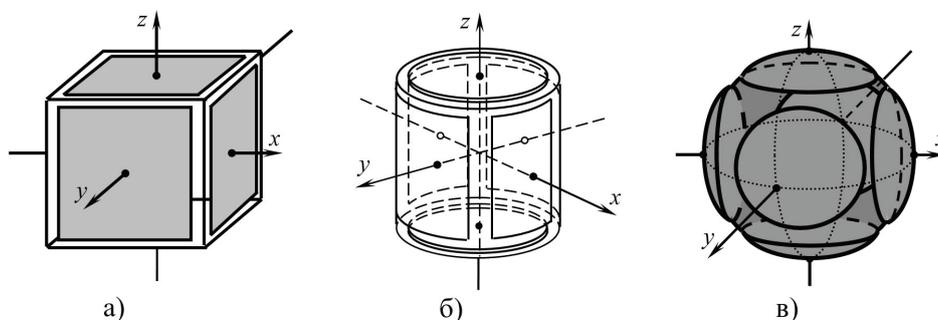


Рис. 1. Трехкоординатные электроиндукционные датчики напряженности электрического поля замкнутого типа и различных форм: а) кубическая; б) цилиндрическая; в) сферическая

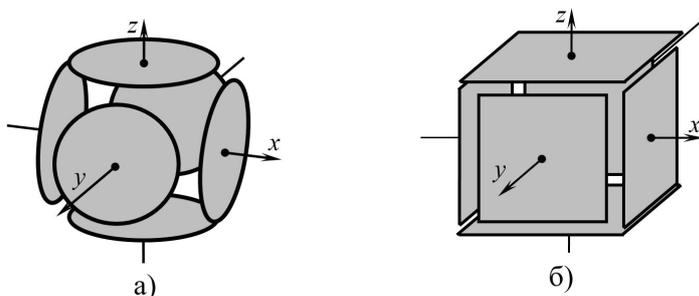


Рис. 2. Трехкоординатные электроиндукционные датчики напряженности электрического поля разомкнутого типа кубической формы:

- а) с круглыми чувствительными элементами;
б) с квадратными чувствительными элементами



Рис. 3. Трехкоординатные электроиндукционные датчики напряженности электрического поля разомкнутого типа: а) и б) — с чувствительными элементами цилиндрической формы; в) — с чувствительными элементами сферической формы

тов (рис. 1) имеют корпус, представляющий собой проводящие тела в форме куба (рис. 1а), цилиндра (рис. 1б) или сферы (рис. 1в).

Бескорпусные датчики с разомкнутой системой чувствительных элементов (рис. 2, 3) не имеют корпуса и состоят из чувствительных элементов, которые являются частью кубической (рис. 2а, б), цилиндрической (рис. 3а) и сферической (рис. 3б) поверхности.

На рис. 3б представлены серийно выпускаемые трехкоординатные датчики напряженности типа Narda PММ EP-600, EP-601, EP-602, EP-604 цилиндрической формы [20].

Корпусные датчики позволяют получить аналитические выражения для выходных сигналов, установить параметры как датчика, так и условий измерения на его погрешность, что упрощает расчет датчиков. Однако из-за наличия корпуса такие датчики имеют относительно большую массу. Расчет выходных сигналов бескорпусных датчиков можно выполнить только численными методами, что усложняет выявление параметров как самого датчика, так и взаимодействующего с ним поля, влияющих на его погрешность. Однако такие датчики просты в изготовлении и имеют малую массу. Таким образом, анализ различных типов датчиков показывает дальнейшее направление в проектировании, связанном с конструированием бескорпусных трехкоординатных датчиков, но с возможностью их аналитического расчета.

В связи с этим разработка и исследование новой конструкции трехкоординатного бескорпусного датчика будет являться целью данной работы. К ближайшим датчикам, подлежащим конструктивным изменениям и формированию нового датчика, являются бескорпусные датчики с плоскими чувствительными элементами, представленные на рис. 2.

Постановка задачи. Провести исследования и рассмотреть возможность создания бескорпусного трехкоординатного датчика напряженности электрического поля, расчет которого был бы прост как для корпусных, а простота конструкции и малая масса как у бескорпусных датчиков. Для этого необходимо решить следующие задачи:

- 1) создать новую расчетную конструктивную модель трехкоординатного бескорпусного датчика;
- 2) составить математическую модель датчика, учитывающую как параметры самого датчика, так и параметры взаимодействующего с ним неоднородного электрического поля;
- 3) оценить погрешность датчика от неоднородности электрического поля.

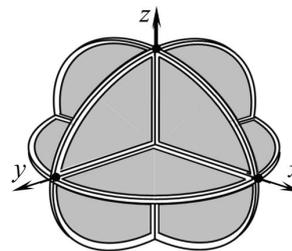


Рис. 4. Трехкоординатный датчик напряженности электрического поля в виде трех взаимно перпендикулярных дисков

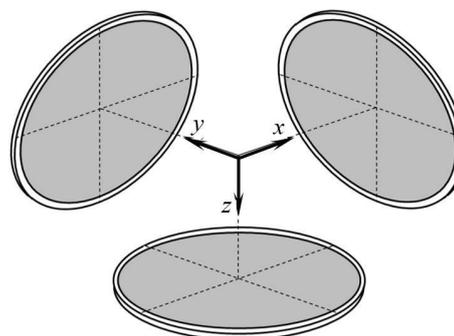


Рис. 5. Разложение датчика на три взаимно перпендикулярных диска

Теория. Для проведения теоретических исследований составим конструктивную и математическую модель бескорпусного трехкоординатного датчика напряженности электрического поля.

Конструктивная модель датчика. За основу возьмем датчик, представленный на рис. 2а, с чувствительными элементами, расположенными на трех парах оснований круглых дисков. Если сдвигать каждую пару дисков датчика навстречу друг другу по соответствующим координатным осям к началу координат, то сформируется датчик в виде трех взаимно перпендикулярных дисков. При этом совокупность взаимно перпендикулярных дисков впишется в сферу радиуса R , а проводящие чувствительные элементы датчика окажутся расположенными на двух основаниях каждого диска, выполненного из диэлектрического материала. Датчик с таким расположением дисковых оснований чувствительных элементов представлен на рис. 4.

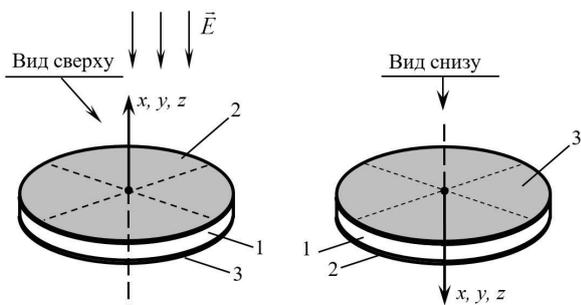


Рис. 6. Конструктивные составляющие трехкоординатный датчик в форме диска 1 с расположенными на них чувствительными элементами 2 и 3

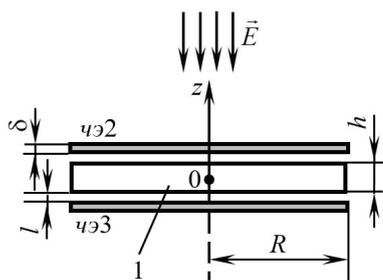


Рис. 7. Конструктивные параметры составляющих датчик дисков

На рис. 5 показано разложение этого датчика на конструктивные составляющие, состоящие из трех взаимно перпендикулярных дисков. Описанная и представленная на рис. 4 конструктивная модель датчика защищена патентом [21].

Таким образом, конструктивная модель датчика представляет собой три взаимно перпендикулярных диэлектрических диска, центры которых совпадают с началом декартовой системы координат. Каждый такой диск 1 с проводящими чувствительными элементами 2 и 3, расположенными на его основаниях, представляет собой однокоординатный двойной датчик (рис. 6).

Конструктивные параметры каждого из трех однокоординатных датчиков представлены на рис. 7. Однокоординатный датчик состоит из дисковой диэлектрической пластины 1, радиуса R и толщиной h ($h \ll R$), на двух основаниях которой располагаются проводящие чувствительные элементы 2 и 3 (рис. 7). Чувствительные элементы 2 и 3, представляющие собой тонкий проводящий слой толщиной δ , имеют одинаковые размеры и круглую форму и расположены на расстоянии l от поверхности диэлектрической пластины 1 (рис. 7).

Теория работы датчика. Теория работы исследуемого трехкоординатного датчика (рис. 4) основывается на взаимодействии электрического поля различной неоднородности с проводящими поверхностями, явлении электростатической индукции и методе наложения (суперпозиции) полей.

Для исследования трехкоординатного датчика разложим его на три конструктивных составляющих (рис. 5), представляющих собой три однокоординатных двойных датчика, центры которых расположены на трех координатных осях x , y и z соответственно. Метод наложения позволяет рас-

смотреть сначала работу одного из трех датчиков, а затем их в совокупности.

Рассмотрим работу двойного однокоординатного датчика с чувствительными элементами толщиной δ и радиуса R ($\delta \ll R$) в однородном и неоднородном электрическом поле. Обоснование выбора электрических полей приведено в [22], из которого следует, что «... однородное поле будет рассматриваться как эталонное, т.е. как образцовое поле. По отношению к нему будет оцениваться погрешность датчика, работающего в реальных условиях. Такие поля часто бывают неоднородными. Неоднородность поля при этом будет рассматриваться как одна из составляющих при оценке предельной погрешности датчика».

Далее будем считать, что погрешность датчика в других неоднородных полях меньше, чем в поле точечного источника. Поле точечного источника выбирается из условия наибольшей неоднородности, которую можно смоделировать при анализе поведения датчика в неоднородном поле».

Датчик в однородном поле. Поместим двойной однокоординатный датчик в однородное электрическое поле перпендикулярно его силовым линиям. Тогда, согласно [22], явления электростатической индукции на его чувствительных элементах индуцируются разнополярные электрические заряды

$$Q_o = \pm \iint_S \sigma \cdot dS = \pm 2\pi\epsilon\epsilon_0 R^2 E_o, \quad (1)$$

где $\sigma = -2\epsilon\epsilon_0 E_n$ — поверхностная плотность заряда; $E_n = E_o$ — нормальная составляющая напряженности электрического поля на поверхности чувствительного элемента; S — площадь поверхности чувствительного элемента; dS — элемент поверхности; Q_o — заряд, индуцируемый однородным полем; знак «-» — относится к верхнему чувствительному элементу, расположенному на одном основании диэлектрического диска, а знак «+» — к нижнему чувствительному элементу, расположенному на другом основании диэлектрического диска (рис. 6 и рис. 7); R — радиус чувствительного элемента; E_o — напряженность измеряемого однородного электрического поля в точке пространства, совпадающей с центром датчика.

Поскольку датчик имеет два чувствительных элемента, а следовательно, является двойным, то при его дифференциальном включении в измерительную цепь её выходной сигнал будет пропорционален удвоенному заряду с двух чувствительных элементов соответственно, согласно выражению

$$Q_o^{diff} = (+Q_o) - (-Q_o) = 2Q_o = 4\pi\epsilon\epsilon_0 R^2 E_o. \quad (2)$$

Поворачивая координатную ось датчика в электрическом поле, его дифференциальный заряд будет изменяться по закону косинуса, согласно выражению

$$Q_{Ox}^{diff} = 4\pi\epsilon\epsilon_0 R^2 E_o \cos\alpha = 4\pi\epsilon\epsilon_0 R^2 E_x. \quad (3)$$

Аналогично рассуждая относительно двух других однокоординатных датчиков, входящих в состав трехкоординатного, можно записать

$$Q_{Oy}^{diff} = 4\pi\epsilon\epsilon_0 R^2 E_o \cos\beta = 4\pi\epsilon\epsilon_0 R^2 E_y. \quad (4)$$

$$Q_{Oz}^{diff} = 4\pi\epsilon\epsilon_0 R^2 E_o \cos\gamma = 4\pi\epsilon\epsilon_0 R^2 E_z. \quad (5)$$

В выражениях (3), (4) и (5) $Q_{Ox}^{gu\phi}$, $Q_{Oy}^{gu\phi}$ и $Q_{Oz}^{gu\phi}$ — электрические заряды, являющиеся выходными сигналами трехкоординатного датчика; $\cos \alpha$, $\cos \beta$ и $\cos \gamma$ — направляющие косинусы; α , β и γ — углы между осью датчика и координатными осями x , y и z декартовой системы координат; E_x , E_y и E_z — составляющие вектора напряженности E_0 .

Производя геометрическое суммирование трех выходных сигналов (3), (4) и (5) трехкоординатного датчика, сформированных однородным полем, можно получить суммарный сигнал, пропорциональный модулю вектора напряженности электрического поля

$$Q_0^{An\phi} = \sqrt{(Q_{Ox}^{An\phi})^2 + (Q_{Oy}^{An\phi})^2 + (Q_{Oz}^{An\phi})^2} = 4\pi\epsilon_0 R^2 E_0. \quad (6)$$

В выражении (6) учли, что $\cos^2 \alpha + \cos^2 \beta + \cos^2 \gamma = 1$.

Таким образом, суммарный выходной сигнал датчика пропорционален модулю вектора E_0 .

Выражения (2)–(6) являются первой группой уравнений, входящих в математическую модель датчика и отвечающих за его поведение в однородном электрическом поле.

Датчик в неоднородном поле точечного источника. Здесь также рассмотрим сначала взаимодействие двойного однокоординатного датчика с неоднородным электрическим полем, а затем совокупность таких датчиков, формирующих трехкоординатный датчик. Поместим двойной однокоординатный датчик в неоднородное электрическое поле точечного заряда q перпендикулярно его силовым линиям (рис. 8). Тогда поверхностная плотность зарядов в зависимости от расстояния d от источника поля до датчика и от расстояния ρ от центра проводящей пластины до точки наблюдения будет определяться выражением [22]

$$\sigma(\rho) = -\frac{2\epsilon\epsilon_0 d^3}{(d^2 + \rho^2)^3} E_H. \quad (7)$$

Величины зарядов, индуцированных на двух чувствительных элементах, с учетом выражения (7), определяются как

$$Q_H = \pm \iint_S \sigma_H \cdot dS = \int_0^{2\pi} \int_0^R \frac{2\epsilon\epsilon_0 d^3 E_H}{(d^2 + \rho^2)^3} \rho d\rho \cdot d\varphi =$$

$$= \pm 2\pi\epsilon\epsilon_0 R^2 \frac{2}{\left(\frac{R}{d}\right)^2} \left[1 - \frac{1}{\sqrt{1 + \left(\frac{R}{d}\right)^2}} \right] E_H, \quad (8)$$

где знак « $-$ » — относится к верхнему чувствительному элементу, расположенному на одном основании диэлектрического диска, а знак « $+$ » — к нижнему чувствительному элементу, расположенному на другом основании диэлектрического диска (рис. 8); R — радиус окружности чувствительного элемента; E_H — напряженность неоднородного электрического поля.

Для упрощения выражения (8) введем нормировку

$$a = \frac{R}{d}, \quad (9)$$

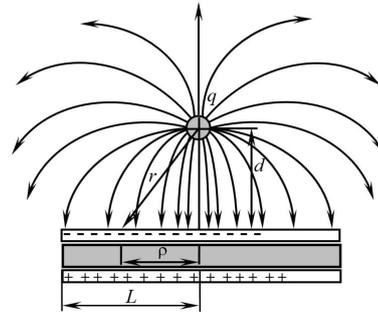


Рис. 8. Взаимодействие двойного однокоординатного датчика с электрическим полем точечного заряда

где a — параметр, в математической модели отвечающий за пространственный диапазон измерения датчика и косвенно характеризующий степень неоднородности электрического поля.

С учетом (9) приведем выражение (8) к виду

$$Q_H = \pm 2\pi\epsilon\epsilon_0 R^2 \frac{2}{a^2} \left[1 - \frac{1}{\sqrt{1 + a^2}} \right] E_H. \quad (10)$$

При дифференциальном включении датчика в измерительную цепь её выходной сигнал будет пропорционален суммарному дифференциальному заряду

$$Q_H^{An\phi} = (-Q_H) - (-Q_H) =$$

$$= 2Q_0 = 4\pi\epsilon\epsilon_0 R^2 \frac{2}{a^2} \left[1 - \frac{1}{\sqrt{1 + a^2}} \right] E_H. \quad (11)$$

Поворачивая координатную ось датчика в неоднородном электрическом поле, его дифференциальный заряд будет изменяться по закону косинуса, согласно выражению

$$Q_{Hx}^{An\phi} = 4\pi\epsilon\epsilon_0 R^2 \frac{2}{a^2} \left[1 - \frac{1}{\sqrt{1 + a^2}} \right] E_H \cos \alpha =$$

$$= 4\pi\epsilon\epsilon_0 R^2 \frac{2}{a^2} \left[1 - \frac{1}{\sqrt{1 + a^2}} \right] E_x. \quad (12)$$

Аналогично рассуждая относительно двух других однокоординатных датчиков, входящих в состав трехкоординатного, можно записать

$$Q_{Hy}^{An\phi} = 4\pi\epsilon\epsilon_0 R^2 \frac{2}{a^2} \left[1 - \frac{1}{\sqrt{1 + a^2}} \right] E_H \cos \beta =$$

$$= 4\pi\epsilon\epsilon_0 R^2 \frac{2}{a^2} \left[1 - \frac{1}{\sqrt{1 + a^2}} \right] E_y; \quad (13)$$

$$Q_{Hz}^{An\phi} = 4\pi\epsilon\epsilon_0 R^2 \frac{2}{a^2} \left[1 - \frac{1}{\sqrt{1 + a^2}} \right] E_H \cos \gamma =$$

$$= 4\pi\epsilon\epsilon_0 R^2 \frac{2}{a^2} \left[1 - \frac{1}{\sqrt{1 + a^2}} \right] E_z. \quad (14)$$

Производя геометрическое суммирование трех выходных сигналов (12), (13) и (14) трехкоорди-

натного датчика, сформированных неоднородным полем, можно получить суммарный сигнал, пропорциональный модулю вектора напряженности электрического поля

$$Q_H^{\text{АиФ}} = \sqrt{(Q_{Hx}^{\text{АиФ}})^2 + (Q_{Hy}^{\text{АиФ}})^2 + (Q_{Hz}^{\text{АиФ}})^2} = 4\pi\epsilon\epsilon_0 R^2 \frac{2}{a^2} \left[1 - \frac{1}{\sqrt{1+a^2}} \right] E_H. \quad (15)$$

Выражения (12)–(15) являются второй группой уравнений, входящих в математическую модель датчика и отвечающих за его поведение в неоднородном электрическом поле.

Воспользовавшись выражениями (6) и (15), найдем погрешность датчика от параметра a . Тогда погрешность трехкоординатного датчика, вызванной неоднородностью электрического поля определится выражением

$$\delta = \frac{Q_H^{\text{АиФ}} - Q_O^{\text{АиФ}}}{Q_O^{\text{АиФ}}} \times 100 = \left[\frac{2}{a^2} \left(1 - \frac{1}{\sqrt{1+a^2}} \right) - 1 \right] \times 100\%, \quad (16)$$

которое будет являться еще одним уравнением математической модели датчика.

Таким образом, математическая модель трехкоординатного бескорпусного датчика новой конструкции будет включать в себя следующие уравнения: (2)–(6), (9), (12)–(16). Эта математическая модель позволяет по заданной погрешности от неоднородности поля, величине электрического заряда и требуемого диапазона измерений по напряженности поля определить пространственный диапазон измерения a и конструктивный размер датчика R .

Воспользуемся математической моделью датчика, составленной в математическом редакторе MathCAD-14, и построим график его погрешности от неоднородности электрического поля в зависимости от параметра a . График погрешности представлены на рис. 9.

Из рис. 9 следует, что погрешность датчика во всем пространственном диапазоне измерения a отрицательна. Следовательно, датчик будет формировать выходные сигналы, пропорциональные заниженным значениям напряженности электрического поля. И это обстоятельство нужно учитывать при измерениях.

Таким образом, представленные теоретические исследования позволили предложить новую форму бескорпусного трехкоординатного электроиндукционного датчика напряженности электрического поля в виде трех взаимно перпендикулярных дисков, оценить его погрешность и соответствующий ей пространственный диапазон измерения.

Результаты исследований. Проведенные исследования позволили создать:

— новую форму бескорпусного трехкоординатного электроиндукционного датчика напряженности электрического поля в виде трех взаимно перпендикулярных дисков;

— установить взаимосвязь погрешности датчика от неоднородности поля и его параметров от пространственного диапазона измерений (рис. 9).

График погрешности, представленный на рис. 9, показывает, что погрешность датчика во всем про-

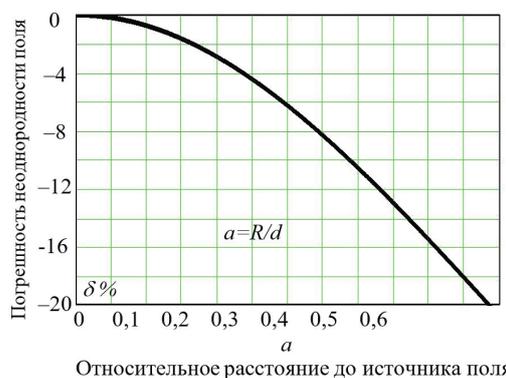


Рис. 9. Зависимость погрешности неоднородности поля от относительного расстояния до его источника

странственном диапазоне измерения a отрицательна. Он позволяет также осуществить рациональный выбор конструктивного размера R датчика, а следовательно, и его чувствительных элементов, исходя из требуемой погрешности датчика от неоднородности электрического поля и максимально возможного пространственного диапазона измерения. Например, требуется изготовить датчик, погрешность измерения которого не превышает 10%. Согласно рис. 9, этой погрешности будет соответствовать максимально возможный пространственный диапазон измерения $a = 0,4$. Это означает, что минимально возможное расстояние до источника поля, при котором погрешность датчика не выйдет за пределы 10%, составит $d = 2,5R$, где R — радиус диска датчика.

Таким образом, представленные теоретические исследования позволили предложить новую форму бескорпусного трехкоординатного электроиндукционного датчика напряженности электрического поля в виде трех взаимно перпендикулярных дисков, оценить его погрешность и соответствующий ей пространственный диапазон измерения. Следует также отметить, что датчик дает заниженные значения зарядов в неоднородном поле, это может привести к необъективной оценке влияния напряженности электрического поля на технические и биологические объекты.

Выводы и заключения. По результатам исследований можно сделать следующие выводы:

- 1) создана конструктивная модель бескорпусного трехкоординатного электроиндукционного датчика напряженности электрического поля в виде трех взаимно перпендикулярных дисков;
- 2) составлена математическая модель бескорпусного трехкоординатного электроиндукционного датчика напряженности электрического поля;
- 3) сделана оценка погрешности датчика от неоднородности электрического поля;
- 4) установлена однозначная зависимость погрешности датчика, вызванной неоднородностью поля от пространственного диапазона измерения;
- 5) погрешность датчика от неоднородности поля во всем пространственном диапазоне измерения отрицательна.

В заключение следует отметить, что исследуемый датчик обладает невысокими метрологическими характеристиками. В связи с этим требуется улучшение его метрологических характеристик. Предполагаем, что дальнейшая работа должна быть направлена на минимизацию погрешности от не-

однородности поля, которая возможна при оптимизации размеров чувствительных элементов датчика.

Библиографический список

1. Юркевич В. М., Кондратьев Б. Л. О методике измерения напряженности и других характеристик электрического поля // Измерительная техника. 1980. № 5. С. 57–59.
2. Чугунов С. А., Юркевич В. М. Расширение зоны измерения параметров электрического поля при применении зондового метода // Измерительная техника. 1981. № 1. С. 33–35.
3. Климашевский И. П., Кондратьев Б. Л., Полетаев В. А., Юркевич В. М. Измеритель вектора напряженности электрического поля высоковольтного оборудования // Измерительная техника. 1983. № 1. С. 48–49.
4. 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. Intern. Conf. on Large High Voltage Electric Systems. 1986. Report 36-06. 5 p.
5. Бирюков С. В. Теория и практика построения электроиндукционных датчиков потенциала и напряженности электрического поля // Омский научный вестник. 2000. № 11. С. 89–93.
6. Берент Г. Н., Плейс И. Р. Датчик электрического поля // Приборы для научных исследований. 1971. № 6. С. 141–142.
7. Мисакян М., Коттер Ф. Р., Калер Р. Л. Миниатюрный датчик электрического поля // Приборы для научных исследований. 1978. № 7. С. 52–55.
8. Steward M. F. Electric field measurement system. US patent 5315232; filed January 3d, 1991; published May 24th, 1994.
9. Beasley W. H., Byerley L. G., Swenson J. A., Bogoev I. G. Low power, low maintenance. Electric-field meter. US patent 6984971; filed March 14th, 2002; published January 10th, 2006.
10. 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.
11. ГОСТ Р 51070-97. Государственный стандарт Российской Федерации. Измерители напряженности электрического и магнитного полей. Общие технические требования и методы испытаний. Введ. 1998–01–01. М.: Изд-во стандартов, 1997. 16 с.
12. Гатман С. Двойной измеритель электрического поля с защитой // Приборы для научных исследований. 1968. № 1. С. 45–49.
13. Pittman E. P., Stanford R. A. Electric field sensor. US patent 3641427; filed September 24th, 1969; published February 8th, 1972.
14. Tong Z. R., Wang X., Wang Y. [et al.]. Dual-parameter optical fiber sensor based on few-mode fiber and spherical structure // Optics Communications. 2017. Vol. 405. P. 60–65. DOI: 10.1016/j.optcom.2017.07.070.
15. Щигловский К. Б., Аксельрод В. С. Приборы для измерения параметров электростатического поля и их калибровка // Измерительная техника. 1978. № 5. С. 63–65.
16. Bowman R. R., Larson E. B., Belsher D. R. The device for measurement of an electromagnetic. US patent 3750017; field September 16th, 1971; published July 31st, 1973.
17. Измерение напряженности неискаженного электрического поля в высоковольтных установках = Horvath T. Measurement of the distortion less electric field intensity of high voltage installations / Перевод ВЦП № Г-21913. М., 1981. 12 с.
18. Rumyantseva E. V., Biryukov S. V., Lyutarevich A. G. [et al.]. Development of spherical sensor electric field strength measuring method // 2016 International Siberian Conference on Control and Communications (SIBCON), Moscow. 2016. P. 1–4. DOI: 10.1109/SIBCON.2016.7491735.
19. Zhang Z. L., Li L., Xie X. M. [et al.]. Optimization design and research character of the passive electric field sensor // IEEE Sens. J. 2014 Vol. 14. P. 508–513. DOI: 10.1109/JSEN.2013.2284201.
20. 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. URL: <https://newpribor.ru/catalog/ispitatelnoe-oborudovanie/probniki-polya/narda-pmm-ep-600-ep601-ep-602.html> (дата обращения: 05.08.2019).
21. Пат. 190509 Российская Федерация, МПК G 01 R 29/12. Датчик напряженности электрического поля / Бирюков С. В., Блесман А. И. № 2019112607; заявл. 25.04.19; опубл. 03.07.19, Бюл. № 19.
22. Biryukov S. V., Korolyova M. A. Electroinduction disk sensor of electric field strength // IOP Conf. Series: Journal of Physics. 2017. Vol. 944 (1). P. 012017-1–012017-8. DOI: 10.1088/1742-6596/944/1/012017.

БИРЮКОВ Сергей Владимирович, доктор технических наук, профессор (Россия), профессор кафедры «Физика».

SPIN-код: 9384-0078

ORCID: 0000-0002-1362-9911

AuthorID (SCOPUS): 7006438919

Адрес для переписки: sbiryukov154@mail.ru

Для цитирования

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.

Статья поступила в редакцию 23.06.2020 г.

© С. В. Бирюков