

ПРИБОРОСТРОЕНИЕ, МЕТРОЛОГИЯ И ИНФОРМАЦИОННО- ИЗМЕРИТЕЛЬНЫЕ ПРИБОРЫ И СИСТЕМЫ

УДК 621.317.328
DOI: 10.25206/1813-8225-2020-171-57-64

С. В. БИРЮКОВ¹
Е. Г. ГЛУХОВЕРЯ¹
А. В. ТЮКИН²

¹Омский государственный
технический университет,
г. Омск

²Сибирский государственный
автомобильно-дорожный университет,
г. Омск

СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ ПЛОСКИХ МНОГОЭЛЕМЕНТНЫХ ДАТЧИКОВ НАПРЯЖЕННОСТИ ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ПОЛЯ С КРУГЛЫМ ОСНОВАНИЕМ И РАЗЛИЧНЫМИ КОНСТРУКТИВНЫМИ ОСОБЕННОСТЯМИ

В статье проводится сравнительный анализ многоэлементных датчиков электрического поля плоской формы, отличающихся различными конфигурациями чувствительных элементов, каждая из которых определяется своими конструктивными параметрами. Для этого составляется обобщенная математическая модель датчика, учитывающая его конструктивные параметры, влияющие на погрешность от неоднородности поля и пространственный диапазон измерения. С использованием обобщенной математической модели строятся графики погрешности датчика в зависимости от пространственного диапазона измерения и различных конструктивных параметров его чувствительных элементов. Изменение конструктивных параметров позволило моделировать чувствительные элементы в форме квадрантов и усеченных квадрантов круга. По графикам погрешности установлено, что чувствительные элементы, выполненные в форме квадрантов круга, обеспечивают датчику меньшую погрешность и больший пространственный диапазон измерения, поэтому их применение более целесообразно. Выполненные исследования позволили получить следующие технические результаты: датчики с чувствительными элементами в форме квадранта круга имеют минимум погрешности и максимум про-

странственного диапазона измерения при конструктивных параметрах: $b=0$ и $b_0=0,2$; $b=0$ и $b_0=0,4$, для которых при максимальном пространственном диапазоне измерения, равном единице ($a=1$), погрешности соответственно равны -3% и -10% .

Ключевые слова: многоэлементный дисковый датчик электрического поля, однородное поле, неоднородное поле, точечный источник, напряженность электрического поля, чувствительный элемент, погрешность от неоднородности поля, пространственный диапазон измерения.

Введение. Высоковольтное электротехническое оборудование создает в окружающем пространстве сильные электрические поля. Исследования показывают, что такие электрические поля оказывают вредное влияние на технические и биологические объекты, в частности на здоровье и безопасность человека [1–3].

С другой стороны, электрические поля, окружающие технические и биологические объекты, могут вызывать электростатический разряд, что приведет к другим, более серьезным последствиям безопасности. В связи с этим ряд стран и международных организаций выработали стандарты и рекомендации по ограничению уровней электрического поля для населения и обслуживающего персонала энергетических системы [4–7]. В то же время работники и обслуживающий персонал энергосистемы вынуждены работать рядом с высоковольтным электрооборудованием и неизбежно подвергаться воздействию сложных электрических полей. Для создания условий безопасной работы обслуживающего персонала их необходимо оснастить малогабаритными измерителями напряженности электрического поля в рабочей зоне, способными в режиме реального времени выдавать предупреждающий сигнал безопасности [8–10].

Наиболее широкое распространение для измерения полей, окружающих энергосистемы, получили измерители напряженности электрического поля, основанные на электростатической индукции. Они просты, удобны в изготовлении и обладают высокой точностью и сильной перегрузочной способностью [11–13].

Поэтому в данной статье обсуждается многоэлементный датчик напряженности электрического поля, основанный на явлении электростатической индукции.

При проведении исследований в рамках создания новых датчиков напряженности электрического поля для измерения в условиях таких энергосистем, как высоковольтные подстанции и линии электропередач, был разработан плоский многоэлементный датчик вектора напряженности электрического поля с круглыми основаниями [14]. Датчик имеет малые размеры и массу и может быть легко выполнен методами нанотехнологий. Малые габариты и определенная форма и размеры чувствительных элементов датчика позволяют значительно уменьшить влияние электрических возмущений и неоднородности поля на его выходные сигналы. Датчик может применяться для биологических исследований поведения животных в сильных электрических полях частотой 50 Гц, искаженных присутствием клеток для животных. Так как расчеты электрических полей в условиях сильной неоднородности затруднены в связи с присутствием в окружающем пространстве заземленных предметов, стен, пола, то их измерение может выступать чуть ли не единственным способом проведения исследований.

Кроме использования в лабораторных условиях, датчик пригоден для построения бытовых средств контроля и измерения уровней напряженности электрического поля в бытовых условиях, на рабочем месте и т.д.

Анализ технической и патентной литературы показывает, что существует целый ряд средств контроля и измерения [8–10, 15–17] электрических полей. Однако они предназначены для использования в условиях электрических подстанций и линий электропередач сверхвысокого напряжения, и неудобны для использования в быту из-за своих значительных массогабаритных характеристик. В связи с этим создание датчиков напряженности электрического поля для бытовых и лабораторных средств контроля и измерения, имеющих малую массу и размеры, является актуальной задачей.

Впервые попытка создания малогабаритных датчиков напряженности электрического поля была сделана авторами в работах [18, 19]. Эта попытка привела к положительным результатам. Разработанные авторами датчики обладали высокими метрологическими характеристиками (погрешность до 3%), хотя и в малом пространственном диапазоне измерения a , определяемом расстоянием до источника поля d от 0 до $5R$, где R — радиус основания датчика.

С целью получения улучшенных технических и метрологических характеристик многоэлементных датчиков нужны дополнительные исследования. В связи с этим дальнейшие исследования будут связаны с проведением сравнительного анализа метрологических и конструктивных характеристик плоских многоэлементных датчиков напряженности электрического поля с круглым основанием и различными конструктивными особенностями.

Постановка задачи. Провести ряд исследований, по результатам которых установить взаимосвязь метрологических характеристик многоэлементного датчика составляющих напряженности ЭП с его конструктивными параметрами. Отсюда вытекает постановка следующих задач:

- 1) построить конструктивную модель многоэлементного дискового датчика составляющих вектора напряженности ЭП, учитывающую геометрические размеры и формы чувствительных элементов и их пространственное расположение на дисковых основаниях датчика;
- 2) построить обобщенную математическую модель многоэлементного дискового датчика, включающую параметры, определяемые геометрическими размерами чувствительных элементов и взаимным их расположением на поверхностях круглых оснований датчика;
- 3) провести оптимизацию размеров чувствительных элементов датчика и геометрических параметров их взаимного расположения на основаниях датчика с точки зрения минимума погрешности и максимума пространственного диапазона измерения;

4) провести сравнительный анализ и оценить погрешности различных вариантов построения датчика, определяемых размерами чувствительных элементов и их взаимным расположением на основаниях датчика.

Теория. Физические основы работы многоэлементного датчика напряженности электрического поля связаны с взаимодействием проводящей пластины с электрическими полями различной неоднородности. В качестве таких полей в работе выбраны два граничных поля — однородное и сильно неоднородное поле точечного источника. При помещении плоской проводящей пластины в однородное и неоднородное поле точечного источника на противоположных поверхностях оснований пластины будут индуцироваться противоположные по знаку электрические заряды, поверхностные плотности которых будут соответственно равны [19]

$$\sigma = \pm 2\varepsilon\varepsilon_0 E_n; \quad (1)$$

$$\sigma(\rho) = \pm \frac{2\varepsilon\varepsilon_0}{\left[1 + \left(\frac{\rho}{d}\right)^2\right]^{\frac{3}{2}}} E_n, \quad (2)$$

где ε — диэлектрическая проницаемость среды; ε_0 — диэлектрическая постоянная; ρ — расстояние от центра пластины до точки рассмотрения; E_n — нормальная составляющая напряженности электрического поля на поверхностях проводящей пластины. В однородном поле $E_n = E_0$, т.е. напряженности внешнего однородного поля. В неоднородном поле $E_n = E_H$, т.е. напряженности внешнего неоднородного поля в точке, совпадающей с центром пластины.

Конструктивные основы и метод построения плоского многоэлементного датчика составляющих вектора напряженности электрического поля подробно рассмотрены авторами в работе [19]. Откуда следует, что конструктивно многоэлементный датчик легко может быть построен методом трех секущих взаимно перпендикулярных плоскостей. Для обеспечения конструктивной симметрии датчика и равенства его электрических чувствительностей по каждой координатной оси в качестве основы датчика необходимо выбирать тела правильных геометрических форм (сфера [20, 21], куб [22, 23], цилиндр [24], диск [25, 26], квадратная пластина [27]).

Конструктивная модель многоэлементного датчика. Первой задачей сформулированных исследований является построение конструктивной модели многоэлементного дискового датчика, учитывающей геометрические размеры и формы чувствительных элементов и их пространственное расположение на дисковых основаниях датчика. Конструктивная модель датчика для дальнейших расчетов с указанием его геометрических параметров представлена на рис. 1.

В основе конструктивной модели датчика лежит проводящая дисковая пластина 1, на двух основаниях которой расположены четыре пары проводящих чувствительных элементов 2–9 в общем виде в форме усеченных секторов. На одном основании расположены четыре чувствительных элемента 2–5, а на другом — четыре чувствительных элемента 6–9. В общем случае дуги чувствительных элементов выполнены радиусом r меньше радиуса R основания дисковой пластины. Чувствительные элементы удалены друг от друга на расстояние $2h$

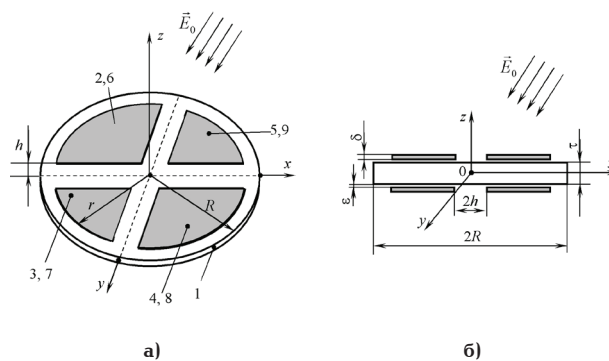


Рис. 1. Конструктивная модель многоэлементного датчика в однородном ЭП: а) вид сверху; б) в разрезе

и изолированы между собой и основанием дисковой пластины, имеющей толщину τ . В качестве материала чувствительных элементов выбирают проводники с высоким удельным сопротивлением, такие как медь, серебро и др.

Таким образом, построенная конструктивная модель датчика реализует двойной датчик напряженности ЭП, основанием которого служит проводящая дисковая пластина, играющая роль средней точки и принимающая потенциал референц-точки [11] поля, в которую помещается датчик. Описанное техническое решение датчика представлено в работе [28].

Авторами в работе приняты следующие допущения. Чувствительные элементы 2–9 датчика (рис. 1а, б) выполнены в виде тонкого проводящего слоя толщиной $\delta \ll \tau$, полученного методом напыления. Они изолированы от проводящего дискового основания диэлектрическим слоем толщиной $\varepsilon \ll \tau$ (рис. 1б). При принятых допущениях чувствительные элементы можно рассматривать частью проводящей пластины основания датчика, с которой снимаются индуцированные полем электрические заряды.

При выполнении условия $\varepsilon \ll \tau$, определяющего расстояние между проводящими чувствительными элементами 2–9 и основанием проводящей дисковой пластины 1, можно считать потенциал чувствительных элементов равным потенциалу дисковой пластины. В этом случае датчик выступает как единая проводящая дисковая пластина.

Для формирования датчика вектора напряженности электрического поля его чувствительные элементы 2–9 необходимо (рис. 1) объединить в противоположные пары групп, по четыре элемента в группе так, что по оси X будут расположены элементы — 2, 3, 6, 7 и 4, 5, 8, 9; по оси Y — 2, 5, 6, 9 и 3, 4, 7, 8 и по оси Z — 2, 3, 4, 5 и 6, 7, 8, 9. Объединение чувствительных элементов в пары групп позволяет организовать двойной датчик. Используя его в дифференциальном включении, датчик обеспечит компенсацию синфазных составляющих помех и при этом повысится его чувствительность.

В качестве выходного сигнала датчика, как показано в работе [19], целесообразней выбрать электрический заряд, поскольку он независим от частоты, гармоник электрического поля и емкостей, образованных чувствительными элементами и основанием датчика. Поэтому он, с метрологической точки зрения, может выступать в качестве выходного сигнала датчика.

Второй задачей исследования является построение обобщенной математической модели многоэлементного датчика. Для её формирования необходимо рассмотреть поведение многоэлементного датчика в однородном и неоднородном полях.

Многоэлементный датчик в однородном поле.

Работа датчика, основанная на взаимодействии проводящей пластины с однородным электрическим полем, подробно описана в работе [19]. Поэтому в данной работе рассмотрим влияние особенностей изменений, внесенных в конструктивную модель датчика на математические выражения его выходных сигналов и новых параметров датчика, отвечающих за его погрешность и пространственный диапазон измерения.

Поместим многоэлементный датчик в однородное электрическое поле и найдем суммарные электрические заряды на сформированных группах чувствительных элементов по осям X, Y и Z, которые будут соответственно равны:

— по оси X заряды $-Q_{O2,3,6,7}$ и $+Q_{O4,5,8,9}$

$$Q_{Ox} = \mp 8\pi\epsilon\epsilon_0 R^2 \left[\frac{1}{4} b^2 - \frac{2}{\pi} bb_0 + \frac{1}{\pi} b_0^2 \right] \cdot E_x; \quad (3)$$

— по оси Y заряды $-Q_{O2,5,6,9}$ и $+Q_{O3,4,7,8}$

$$Q_{Oy} = \mp 8\pi\epsilon\epsilon_0 R^2 \left[\frac{1}{4} b^2 - \frac{2}{\pi} bb_0 + \frac{1}{\pi} b_0^2 \right] \cdot E_y; \quad (4)$$

— по оси Z заряды $-Q_{O2,3,4,5}$ и $+Q_{O6,7,8,9}$

$$Q_{Oz} = \mp 8\pi\epsilon\epsilon_0 R^2 \left[\frac{1}{4} b^2 - \frac{2}{\pi} bb_0 + \frac{1}{\pi} b_0^2 \right] \cdot E_z, \quad (5)$$

где в выражениях (3)–(5) Q_{Ox} , Q_{Oy} и Q_{Oz} — заряды, индуцированные на поверхностях чувствительных элементов однородным электрическим полем.

$$E_x(t) = E_o \cdot \cos \alpha, \quad E_y(t) = E_o \cdot \cos \beta$$

$$\text{и } E_z(t) = E_o \cdot \cos \gamma; \quad (6)$$

E_o — напряженность исходного однородного электрического поля; $\cos \alpha$, $\cos \beta$ и $\cos \gamma$ — направляющие косинусы, удовлетворяющие условию

$$\cos^2 \alpha + \cos^2 \beta + \cos^2 \gamma = 1 \quad (7)$$

и задающие положения вектора напряженности электрического поля в пространстве; $b = r/R$ и $b_0 = h/R$ — параметры, отвечающие за погрешность датчика и его пространственный диапазон измерения.

Для дифференциального включения двойного датчика его дифференциальные заряды по осям x, y и z будут соответственно равны

$$Q_o^{qu\phi}_x = Q_{O4,5,8,9} - Q_{O2,3,6,7} =$$

$$= 16\pi\epsilon\epsilon_0 R^2 \left[\frac{1}{4} b^2 - \frac{2}{\pi} bb_0 + \frac{1}{\pi} b_0^2 \right] \cdot E_x; \quad (8)$$

$$Q_o^{qu\phi}_y = Q_{O3,4,7,8} - Q_{O2,5,6,9} =$$

$$= 16\pi\epsilon\epsilon_0 R^2 \left[\frac{1}{4} b^2 - \frac{2}{\pi} bb_0 + \frac{1}{\pi} b_0^2 \right] \cdot E_y; \quad (9)$$

$$Q_o^{qu\phi}_z = Q_{O6,7,8,9} - Q_{O2,3,4,5} =$$

$$= 16\pi\epsilon\epsilon_0 R^2 \left[\frac{1}{4} b^2 - \frac{2}{\pi} bb_0 + \frac{1}{\pi} b_0^2 \right] \cdot E_z. \quad (10)$$

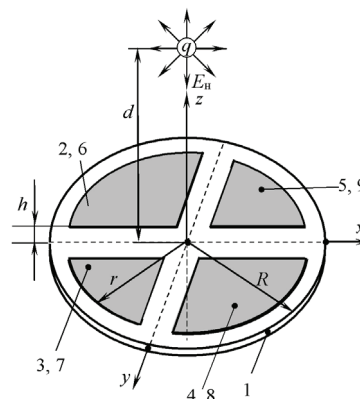


Рис. 2. Датчик в неоднородном электрическом поле

Из выражений (8)–(10) следует, что по координатным осям X, Y и Z чувствительности датчика в однородном поле одинаковы и зависят от радиуса R дисковой пластины и конструктивных параметров датчика b и b_0

$$G_o^{лиф} = 16\pi\epsilon\epsilon_0 R^2 \left[\frac{1}{4} b^2 - \frac{2}{\pi} bb_0 + \frac{1}{\pi} b_0^2 \right]. \quad (11)$$

Указанные конструктивные параметры датчика определяются лишь конструкцией датчика, поэтому они постоянны. В этом случае чувствительность датчика в однородном поле также остается постоянной. Следовательно, выходные электрические заряды датчика, пропорциональные напряженности однородного электрического поля, могут играть роль меры напряженности этого поля.

Многоэлементный датчик в неоднородном поле точечного источника. Многоэлементный датчик, помещенный в неоднородное электрическое поле E_H точечного положительного электрического заряда q, представлен на (рис. 2).

При взаимодействии многоэлементного датчика с неоднородным полем точечного заряда датчик будет рассматривать как проводящую дисковую пластину, имеющую поверхностную плотность электрического заряда, определяемого выражением (2).

При сохранении всех геометрических и конструктивных параметров датчика, приведенного на рис. 1, найдём электрические заряды, индуцированные полем точечного заряда q на сформированных группах чувствительных элементов по осям X, Y и Z, которые будут соответственно равны:

— по оси X заряды $-Q_{O2,3,6,7}$ и $+Q_{O4,5,8,9}$

$$Q_{Hx} = \mp 8\pi\epsilon\epsilon_0 R^2 \times$$

$$\left[\frac{1}{2} \left(1 - \frac{1}{\sqrt{1+a^2b^2}} \right) - \frac{1}{a^2} - \frac{2}{\pi} \arctan \left(\frac{a^2 b_0 b}{\sqrt{1+a^2[b_0^2+b^2]}} \right) + \frac{1}{\pi} \arctan \left(\frac{a^2 b_0^2}{\sqrt{1+2a^2 b_0^2}} \right) \right] E_{Hx}; \quad (12)$$

— по оси Y заряды $-Q_{O2,5,6,9}$ и $+Q_{O3,4,7,8}$

$$Q_{Hy} = \mp 8\pi\epsilon\epsilon_0 R^2 \times$$

$$\times \frac{1}{a^2} \left[\begin{array}{l} \frac{1}{2} \left(1 - \frac{1}{\sqrt{1+a^2b^2}} \right) - \\ - \frac{2}{\pi} \arctan \left(\frac{a^2 b_0 b}{\sqrt{1+a^2[b_0^2+b^2]}} \right) + \\ + \frac{1}{\pi} \arctan \left(\frac{a^2 b_0^2}{\sqrt{1+2a^2b_0^2}} \right) \end{array} \right] + E_{Hy}; \quad (13)$$

— по оси Z заряды $-Q_{02,3,4,5}$ и $+Q_{06,7,8,9}$

$$Q_{Hz} = \mp 8\pi\epsilon_0 R^2 \times \left[\begin{array}{l} \frac{1}{2} \left(1 - \frac{1}{\sqrt{1+a^2b^2}} \right) - \\ - \frac{2}{\pi} \arctan \left(\frac{a^2 b_0 b}{\sqrt{1+a^2[b_0^2+b^2]}} \right) + \\ + \frac{1}{\pi} \arctan \left(\frac{a^2 b_0^2}{\sqrt{1+2a^2b_0^2}} \right) \end{array} \right] + E_{Hz}; \quad (14)$$

где в выражениях (12)–(14) Q_{Hx} , Q_{Hy} и Q_{Hz} — заряды, индуцированные на поверхностях чувствительных элементов неоднородным электрическим полем;

$$E_x(t) = E_H \cdot \cos \alpha, \quad E_y(t) = E_H \cdot \cos \beta \\ \text{и } E_z(t) = E_H \cdot \cos \gamma; \quad (15)$$

E_H — напряженность исходного неоднородного электрического поля.

В дифференциальном включении двойного датчика разность зарядов по осям X, Y и Z можно записать

$$Q_{Hx}^{\text{АиФ}} = Q_{4,5,8,9} - Q_{2,3,6,7} = 16\pi\epsilon_0 R^2 \times \left[\begin{array}{l} \frac{1}{2} \left(1 - \frac{1}{\sqrt{1+a^2b^2}} \right) - \\ - \frac{2}{\pi} \arctan \left(\frac{a^2 b_0 b}{\sqrt{1+a^2[b_0^2+b^2]}} \right) + \\ + \frac{1}{\pi} \arctan \left(\frac{a^2 b_0^2}{\sqrt{1+2a^2b_0^2}} \right) \end{array} \right] + E_{Hx}; \quad (16)$$

$$Q_{Hy}^{\text{АиФ}} = Q_{3,4,7,8} - Q_{2,5,6,9} = 16\pi\epsilon_0 R^2 \times \left[\begin{array}{l} \frac{1}{2} \left(1 - \frac{1}{\sqrt{1+a^2b^2}} \right) - \\ - \frac{2}{\pi} \arctan \left(\frac{a^2 b_0 b}{\sqrt{1+a^2[b_0^2+b^2]}} \right) + \\ + \frac{1}{\pi} \arctan \left(\frac{a^2 b_0^2}{\sqrt{1+2a^2b_0^2}} \right) \end{array} \right] + E_{Hy}; \quad (17)$$

$$Q_{Hz}^{\text{АиФ}} = Q_{6,7,8,9} - Q_{2,3,4,5} = 16\pi\epsilon_0 R^2 \times \left[\begin{array}{l} \frac{1}{2} \left(1 - \frac{1}{\sqrt{1+a^2b^2}} \right) - \\ - \frac{2}{\pi} \arctan \left(\frac{a^2 b_0 b}{\sqrt{1+a^2[b_0^2+b^2]}} \right) + \\ + \frac{1}{\pi} \arctan \left(\frac{a^2 b_0^2}{\sqrt{1+2a^2b_0^2}} \right) \end{array} \right] + E_{Hz}. \quad (18)$$

Из выражений (16)–(18) следует, что дифференциальная чувствительность двойного датчика по трем координатным осям x, y и z одинакова и определяется выражением

$$G_H^{\text{АиФ}} = 16\pi\epsilon_0 R^2 \times \left[\begin{array}{l} \frac{1}{2} \left(1 - \frac{1}{\sqrt{1+a^2b^2}} \right) - \\ - \frac{2}{\pi} \arctan \left(\frac{a^2 b_0 b}{\sqrt{1+a^2[b_0^2+b^2]}} \right) + \\ + \frac{1}{\pi} \arctan \left(\frac{a^2 b_0^2}{\sqrt{1+2a^2b_0^2}} \right) \end{array} \right]. \quad (19)$$

Дифференциальная чувствительность датчика (19) в неоднородном поле точечного заряда в отличие от дифференциальной чувствительности датчика в однородном поле (11) не постоянна, а зависит от конструктивных параметров R , b_0 и b самого датчика и от параметров взаимодействующей среды, а именно от пространственного диапазона измерения $a=R/d$ (R — радиус дискового основания датчика; d — расстояние до источника поля).

Оценим погрешность многоэлементного датчика, вызванную неоднородностью поля. Для этого сравним выражения (11) и (19) для чувствительностей датчика, соответствующие однородному и неоднородному полю. Примем чувствительность датчика в однородном поле за меру. Тогда по отношению к ней искомая погрешность датчика определится выражением

$$\delta(a, b) = \frac{G_H^{\text{АиФ}} - G_O^{\text{АиФ}}}{G_O^{\text{АиФ}}} \cdot 100 = \left[\begin{array}{l} \frac{1}{a^2 \left(\frac{b^2}{4} - \frac{b_0(2b-b_0)}{\pi} \right)} \times \\ \times \left[\begin{array}{l} \frac{1}{2} \left(1 - \frac{1}{\sqrt{1+a^2b^2}} \right) - \\ - \frac{2}{\pi} \arctan \left(\frac{a^2 b_0 b}{\sqrt{1+a^2(b_0^2+b^2)}} \right) + \\ + \frac{1}{\pi} \arctan \left(\frac{a^2 b_0^2}{\sqrt{1+2a^2b_0^2}} \right) \end{array} \right] - 1 \end{array} \right] \cdot 100. \quad (20)$$

Обобщенная математическая модель датчика.

Она относится ко второй поставленной в работе задаче. Решение этой задачи будет связано с объединением математических выражений, полученных для датчика в данной работе в единую обобщенную математическую модель, которая будет представлять совокупность уравнений (6)–(11), и (16)–(20).

Обобщенная математическая модель датчика позволяет провести исследования и оптимизацию конструктивных параметров четырех вариантов построения датчиков. На рис. 3 схематично показаны четыре варианта возможного построения многоэлементного датчика в зависимости от геометрических соотношений его конструктивных параметров.

Применим обобщенную математическую модель к четырем вариантам построения многоэлементного датчика и решим третью задачу, сформулированную в работе. С помощью математической модели

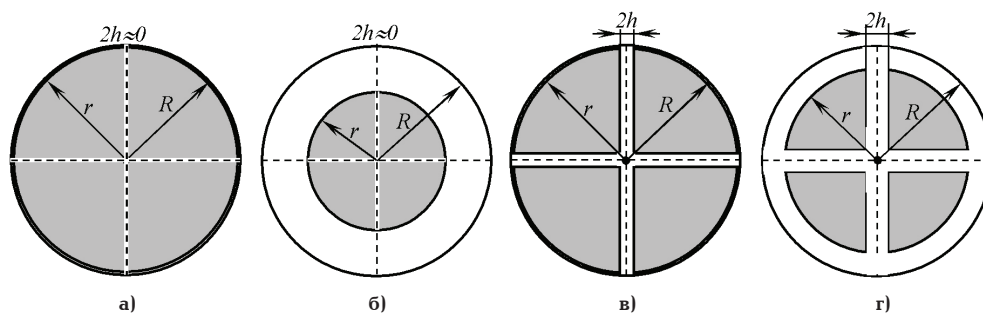


Рис. 3. Схематическое расположение чувствительных элементов датчика для четырех вариантов его построения: а) $r = R$, $b = 1$, $b_0 = 0$; б) $r < R$, $b < 1$, $b_0 = 0$; в) $r = R$, $b = 1$, $0 < b_0 < 1$; г) $r < R$, $b < 1$, $0 < b_0 < 1$

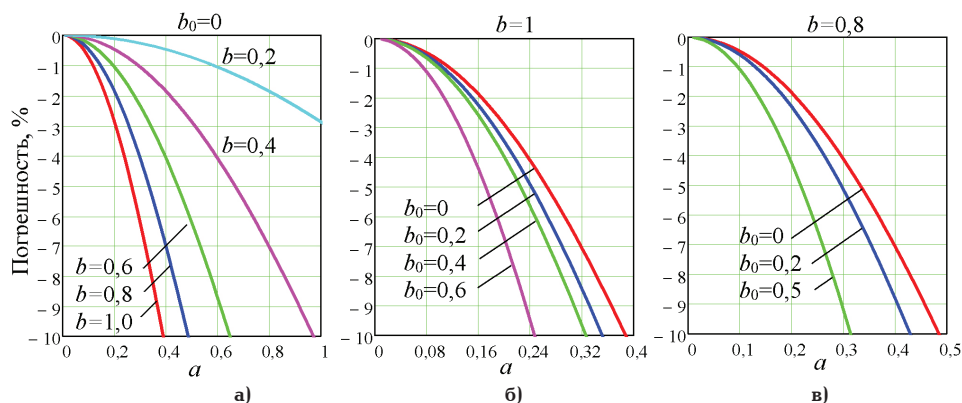


Рис. 4. Семейства графиков погрешность датчика от неоднородности поля в зависимости от относительного расстояния a и различных значений параметров $b = r/R$ и $b_0 = h/R$

оптимизируем размеры чувствительных элементов предложенных вариантов построения датчика, с точки зрения минимума погрешности и максимума его пространственного диапазона измерения

Оптимизация чувствительных элементов четырех вариантов построения датчика. Проанализируем конструктивные параметры и параметры взаимодействия с полем, входящие в выражение (20) и отвечающие за погрешность от неоднородности поля. Конструктивные параметры чувствительных элементов $b=r/R$ и $b_0=h/R$ — отвечают за погрешность датчика от неоднородности поля, оптимизация размеров которых позволит получить минимально возможную погрешность датчика при максимально возможном его пространственном диапазоне измерения. Параметр $a=r/d$ косвенно характеризует степень неоднородности поля и определяет пространственный диапазон измерения датчика.

Для нахождения оптимальных размеров чувствительных элементов датчика рассмотрим четыре возможных варианта его построения. Рассчитаем и построим для них графики погрешности (20) от неоднородности поля в зависимости от параметров b , b_0 и a , воспользовавшись математическим редактором MathCAD. Изменяя параметры b , b_0 , можно получить каждый из вариантов построения датчика в отдельности. Семейства графиков погрешности от неоднородности поля в зависимости от различных параметров b , b_0 и a представлены на рис. 4а–в.

Сравнительный анализ и оценка погрешности различных вариантов построения датчика. Для сравнительного анализа датчиков воспользуемся рис. 4, на котором графики рис. 4а соответствуют вариан-

там построения датчиков, представленных рис. 3а, б; график 4б — варианту 3в; график 4в — варианту 3г. Из графика (рис. 4) следует, что при $b=r/R=1$ датчик будет иметь меньший пространственный диапазон измерения при одинаковой погрешности в сравнении с датчиками, для которых $b < 1$. Следовательно, целесообразней рассматривать вариант построения датчиков, представленный на рис. 3б. Для датчиков такого исполнения оптимальные размеры чувствительных элементов необходимо выбирать из условия $b < 1$, например, $b=0,4$ или $b=0,2$, для которых при одинаковом пространственном диапазоне измерения $a=1$ погрешности датчика не выйдут за пределы 10 % и 3 % соответственно. График рис. 4б показывает, что для датчиков, выполненных согласно рис. 3в, с чувствительными элементами, для которых $b=1$, увеличение параметра $b_0=h/R$ приводит к уменьшению пространственного диапазона измерения при одинаковых погрешностях датчика. То же можно наблюдать у датчиков, представленных на рис. 3г, для которых $b < 1$ и $b_0 > 0$ (см. рис. 4г), хотя в этом случае уменьшение параметра b приводит к незначительному увеличению пространственного диапазона измерения.

Результаты исследования. Результатами данного исследования являются:

а) конструктивная модель многоэлементного дискового датчика составляющих вектора напряженности ЭП, учитывающая геометрические размеры и формы чувствительных элементов и их пространственное расположение на дисковых основаниях датчика;

б) обобщенная математическая модель многоэлементного дискового датчика, включающая пара-

метры, определяемые геометрическими размерами чувствительных элементов и взаимным их расположением на поверхностях круглых оснований датчика;

в) оптимизация размеров чувствительных элементов датчика с точки зрения минимума погрешности и максимума пространственного диапазона измерения.

Полученные результаты позволили провести сравнительный анализ и оценить погрешности различных вариантов построения датчика, определяемых размерами чувствительных элементов и их взаимным расположением на основаниях датчика. Сравнительный анализ четырех вариантов построения датчиков позволил установить, что датчики с чувствительными элементами, выполненными в форме квадрантов круга ($b \leq 1$, $b_0 = 0$, варианты рис. 3а, б) при заданной погрешности имеют больший пространственный диапазон измерения ($\alpha \leq 1$). Датчики с чувствительными элементами, выполненными в форме усеченных квадрантов круга ($b \leq 1$ и $b_0 > 0$, варианты рис. 3в, г) имеют меньшие перспективы использования из-за небольшого пространственного диапазона измерений ($\alpha \leq 0,5$).

Таким образом, наиболее перспективными являются датчики, выполненные по вариантам, представленным на рис. 3а, б. Для датчиков этих вариантов минимум погрешности δ и максимум пространственного диапазона измерения $a = R/d$ выполняется при $b = 0$ и двух значениях $b_0 = 0,2$ параметров b_0 : $b_0 = 0,2$ и $b_0 = 0,4$ (см. рис. 4а). Так, например, для датчика с конструктивным параметром $b_0 = 0,4$ при максимальном пространственном диапазоне $a = 1$ погрешность датчика от неоднородности поля не превышает -10% , а с параметром $b_0 = 0,2$ при том же пространственном диапазоне погрешность не превышает -3% . Таким образом, датчики такой конструкции можно использовать для измерения вблизи источника поля, т.е. на расстояниях d от источника поля, равных R . В сравнении с датчиками, используемыми в работах [19, 29], рассмотренные в статье варианты построения датчиков обладают лучшими техническими и метрологическими характеристиками.

Выводы и заключение. По результатам исследования четырех вариантов построения многоэлементных датчиков и их сравнительного анализа сделаны следующие выводы:

1) построенные конструктивные модели многоэлементного дискового датчика составляющих вектора напряженности ЭП позволяют учитывать геометрические размеры и формы чувствительных элементов при оценке погрешности датчика и установлении пространственного диапазона измерения;

2) полученные математические зависимости устанавливают взаимосвязь между индуцированными на чувствительных элементах датчика электрическими зарядами и составляющими вектора напряженности однородного и неоднородного электрического поля;

3) полученная математическая зависимость погрешности датчика от неоднородности поля позволяет проводить оптимизацию геометрических размеров его чувствительных элементов с точки зрения минимума погрешности и максимума пространственного диапазона измерений;

4) полученные математические зависимости, положенные в основу обобщенной математической модели многоэлементного дискового датчика, позволяют проводить исследование различных

вариантов конструктивного исполнения датчиков в полях различной неоднородности; с учетом параметров, определяемых геометрическими размерами чувствительных элементов и взаимным их расположением на поверхностях круглых оснований датчика;

5) сравнительный анализ четырех вариантов конструктивного исполнения многоэлементных датчиков показал целесообразность использования только двух вариантов, представленных на рис. 3а, б. Для датчиков этих вариантов минимум погрешности и максимум пространственного диапазона измерения выполняется для двух условий конструктивного исполнения чувствительных элементов: $b = 0$ и $b_0 = 0,2$; $b = 0$ и $b_0 = 0,4$. Для этих условий погрешности датчика при равном пространственном диапазоне, равном единице ($a = 1$), погрешности соответственно равны -3% и -10% .

В заключение следует отметить, что плоские многоэлементные датчики напряженности электрического поля из-за малых размеров могут найти широкое применение как в бытовых, так и в промышленных условиях применения.

Библиографический список

- Zloupis I. N., Gonos I. F., Stathopoulos L. A. Measurement and calculation of power frequency electric fields generated by high voltage overhead power lines // Proc. of the Intern. Conf. on High Voltage Engineering and Application (ICHVE), Sept. 8–11, 2014. Poland, 2014. Vol. 1. P. 1–4. ISBN 9781479966141.
- Korpinen L., Pääkkönen R. Occupational exposure to electric and magnetic fields during tasks at ground or floor level at 110 kV substations in Finland // International Journal of Occupational Safety and Ergonomics. 2016. Vol. 22, Issue 3. P. 384–388. DOI: 10.1080/10803548.2016.1153858.
- Ziegelberger G., Repacholi M., McKinlay A. International commission on non-ionizing radiation protection // Progress in Biophysics and Molecular Biology. 2006. Vol. 92, Issue 1. P. 1–3. DOI: 10.1016/j.pbiomolbio.2006.02.022.
- International Commission on Non-Ionizing Radiation Protection. Guidelines for limiting exposure to time-varying electric and magnetic fields (1 Hz to 100 kHz) // Health Physics. 2010. Vol. 99, Issue 6. P. 818–836. DOI: 10.1097/HP.0b013e3181f06c86.
- C95.6-2002. IEEE Standard for Safety Levels with Respect to Human Exposure to Electromagnetic Fields, 0-3 kHz. NY: IEEE, 2002. ISBN 978-0-7381-3390-4. DOI: 10.1109/IEEESTD.2002.94143.
- Decat G., Deckx L., Meynen G. [et al.]. Magnetic Fields of Induction Heaters in the Framework of Directive 2004/40/EC of the European Parliament and of the Council // International Journal of Occupational Safety and Ergonomics. 2006. Vol. 12, Issue 2. P. 169–176. DOI: 10.1080/10803548.2006.11076678.
- Hui J., Guan Z., Liu Y. Values and rationales of limits of power frequency electric and magnetic fields in various countries // High Voltage Engineering. 2006. Vol. 32. P. 51–54.
- Korpinen L. H., Kuisti H. A., Tarao H. [et al.]. Occupational exposure to electric fields and currents associated with 110 kV substation tasks // Bioelectromagnetics. 2012. Vol. 33, Issue 5. P. 438–442. DOI: 10.1002/bem.21711.
- Huss A., Spoerri A., Egger M. [et al.]. Occupational exposure to magnetic fields and electric shocks and risk of ALS: The Swiss National Cohort // Amyotrophic Lateral Sclerosis and Frontotemporal Degeneration. 2015. Vol. 16, Issue 1-2. P. 80–85. DOI: 10.3109/21678421.2014.954588.
- Kletzing C. A., Kurth W. S., Acuna M. [et al.]. The electric and magnetic field instrument suite and integrated science (EMFISIS) on RBSP // Space Science Reviews. 2013. Vol. 179. P. 127–181. DOI: 10.1007/s11214-013-9993-6.
- Avramov-Zamurovic S., Lee R. D. A High-Stability Capacitance Sensor System and Its Evaluation // IEEE

Transactions on Instrumentation and Measurement. 2009. Vol. 58, Issue 4. P. 955–961. DOI: 10.1109/TIM.2008.2007039.

12. Lin Y. Y., Zhao Y. Y., Li P. L. Study on measurement errors of the ball type sensor in the power frequency electric field // Advanced Materials Research. 2014. Vol. 1022. P. 415–418. DOI: 10.4028/www.scientific.net/AMR.1022.415.

13. Beriain A., Gutierrez I., Solar H., Berenguer R. 0.5 V and 1.43 pJ/bit capacitive sensor interface for passive wireless sensor systems // Sensors. 2015. Vol. 15, Issue 9. P. 21554–21566. DOI: 10.3390/s150921554.

14. Пат. 194713 Российская Федерация, МПК G 01 R 29/12. Датчик напряженности электрического поля / Бирюков С. В., Блесман А. И. № 2019133609; заявл. 23.10.19; опубл. 19.12.19, Бюл. № 35.

15. Измеритель напряженности электростатического поля СТ-01. Руководство по эксплуатации. МГФК 410000.001 РЭ. URL: https://ntm.ru/UserFiles/File/product/EMF/ST01/manual_ST01.pdf (дата обращения: 18.04.2019).

16. Измеритель параметров электростатического поля ИПЭП-1. Руководство по эксплуатации. УШЯИ.411153.002 РЭ. URL: <http://www.priborelektro.ru/price/IPEP-1.php?deviceid=854> (дата обращения: 12.04.2019).

17. Измеритель параметров электрического и магнитного полей ВЕ-метр-АТ-003 – 3Д. Руководство по эксплуатации. БВЕК43 1440.07 РЭ. URL: <http://ciklon-pribor.ru> (дата обращения: 12.04.2019).

18. Пат. 175038 Российская Федерация, МПК G 01 R 29/12. Датчик напряженности электрического поля / Бирюков С. В. № 2017118612; заявл. 29.05.17; опубл. 16.11.17, Бюл № 32.

19. Бирюков С. В., Колмогорова С. С., Колмогоров А. С., Баранов Д. С. Многоэлектродный датчик составляющих напряженности электрического поля в форме диска из проводящего материала // Динамика систем, механизмов и машин. 2019. Т. 7, № 2. С. 180–190. DOI: 10.25206/2310-9793-7-2-180-190.

20. Misakian M., Kotter F. R., Kahler R. L. Miniature ELF Electric Field Probe // Review of Scientific Instruments. 1978. Vol. 49, Issue 7. P. 933–935. DOI: 10.1063/1.1135497.

21. Kamra A. K. Spherical field meter for measurement of the electric field vector // Review of Scientific Instruments. 1983. Vol. 54, Issue 10. P. 1401–1406. DOI: 10.1063/1.1137255.

22. Pittman E. P., Stanford R. A. Electric field sensor. US patent 3641427; filed September 24th, 1969; published February 08th, 1972.

23. Гатман С. Двойной измеритель электрического поля с защитой // Приборы для научных исследований. 1968. № 1. С. 45–49.

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

25. Biryukov S. V., Korolyova M. A. Electroinduction disk sensor of electric field strength // IOP Conf. Series: Journal of Physics. 2017. Vol. 944. P. 012017-1–012017-8. DOI: 10.1088/1742-6596/944/1/012017.

26. Berent G. N., Plays I. R. Electric Field sensor // Instruments for Scientific Research. 1971. Vol. 6. P. 141–142.

27. Бирюков С. В., Щапова Л. В. Датчик напряженности электрического поля в виде плоской проводящей пластины в форме квадрата // Омский научный вестник. 2017. № 5 (155). С. 126–130.

28. Пат. 194713 Российская Федерация, МПК G 01 R 29/12. Датчик напряженности электрического поля / Бирюков С. В., Блесман А. И. № 2019133609; заявл. 23.10.19; опубл. 19.12.19, Бюл № 35.

29. Baicry M., Le Prado M. Device for measuring an electric field in a conductive medium and method for calibrating said device. US patent 3067704; filed February 17th, 2016; published August 18th, 2016.

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

SPIN-код: 9384-0078

AuthorID (РИНЦ): 189467

ORCID: 0000-0002-1362-9911

AuthorID (SCOPUS): 7006438919

ГЛУХОВЕРЯ Евгений Григорьевич, ассистент кафедры «Физика» ОмГТУ.

SPIN-код: 2578-4140

AuthorID (РИНЦ): 814812

ТЮКИН Александр Владимирович, кандидат технических наук, доцент (Россия), доцент кафедры «Физика и математика» Сибирского государственного автомобильно-дорожного университета.

SPIN-код: 4516-7742

AuthorID (РИНЦ): 775886

Адрес для переписки: sbiryukov154@mail.ru

Для цитирования

Бирюков С. В., Глуховеря Е. Г., Тюкин А. В. Сравнительный анализ плоских многоэлементных датчиков напряженности электрического поля с круглым основанием и различными конструктивными особенностями // Омский научный вестник. 2020. № 3 (171). С. 57–64. DOI: 10.25206/1813-8225-2020-171-57-64.

Статья поступила в редакцию 10.03.2020 г.

© С. В. Бирюков, Е. Г. Глуховеря, А. В. Тюкин