



ПРИБОРОСТРОЕНИЕ, МЕТРОЛОГИЯ И ИНФОРМАЦИОННО- ИЗМЕРИТЕЛЬНЫЕ ПРИБОРЫ И СИСТЕМЫ

УДК 621.317

DOI: 10.25206/1813-8225-2019-165-46-53

С. В. БИРЮКОВ¹А. В. ТЮКИН²

¹Омский государственный
технический университет,
г. Омск

²Сибирский государственный
автомобильно-дорожный университет,
г. Омск

ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ИССЛЕДОВАНИЯ МНОГОЭЛЕКТРОДНОГО ДАТЧИКА СОСТАВЛЯЮЩИХ ВЕКТОРА НАПРЯЖЕННОСТИ ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ПОЛЯ В ФОРМЕ КВАДРАТНОЙ ПЛАСТИНЫ ИЗ ПРОВОДЯЩЕГО МАТЕРИАЛА

В статье исследуется многоэлементный плоский датчик составляющих вектора напряженности низкочастотного электрического поля, изготавливаемый по новым технологиям и способный встраиваться в современные гаджеты. Датчик пригоден для измерения напряженности электрических полей, неблагоприятно воздействующей на человека. В связи с этим решаемая в статье задача является актуальной. Результаты исследования позволили создать такой датчик, оценить его метрологические характеристики и установить их зависимость от степени однородности электрического поля. Установленная взаимосвязь погрешности датчика от степени неоднородности электрического поля позволяет по заданной погрешности определять пространственный диапазон измерения или по заданному пространственному диапазону измерения установить погрешность датчика. Например, погрешности датчика 2 % соответствует пространственный диапазон измерения a , определяемый расстоянием до источника поля от 0 М до 7 М ($a=0,15$), где М — линейный размер датчика.

Ключевые слова: многоэлементный плоский датчик составляющих вектора напряженности электрического поля, однородное поле, точечный

Введение. Научно-технический прогресс приводит к все большему и большему потреблению и выработке электроэнергии. Доставка электроэнергии к потребителю осуществляется по электрическим проводам, которые опутали всю Землю и проникли в жилища людей. По электрическим проводам передаются высокие напряжения и большие электрические токи. В связи с этим электрические провода стали источниками электрических полей, неблагоприятно воздействующих на технические и биологические объекты, и в частности на людей. Для контроля за уровнями электрических полей (ЭП) существует целый ряд средств измерений [1–3], непосредственно предназначенных для этих целей. Однако отдельные средства измерений имеют значительные масса-габаритные характеристики и в нужный момент не оказываются под рукой. В связи с этим необходимы малогабаритные датчики напряженности ЭП, изготавливаемые по новым технологиям и способные встраиваться в современные гаджеты, всегда имеющиеся под рукой, например, смартфоны, калькуляторы и прочие.

Разработка средств измерений для исследования электрических полей проводится как в России [4–8], так и за рубежом [9, 10]. Данная работа посвящена исследованию многоэлектродного датчика составляющих вектора напряженности ЭП, выполненного в форме квадратной пластины из проводящего материала, конструктивно и технологически пригодного для изготовления методами нанотехнологий и обладающего гарантированными метрологическими характеристиками.

Постановка задачи. Провести исследования и рассмотреть возможность создания плоского многоэлементного датчика составляющих напряженности ЭП. Для этого необходимо решить следующие задачи:

- 1) создать метод конструктивного построения многоэлементных датчиков составляющих напряженности ЭП;
- 2) обосновать выбор формы основания датчика, обеспечивающий его встраиваемость в из-

вестные гаджеты;

- 3) оценить погрешность датчика в неоднородных ЭП.

Теория. В основе построения исследуемого датчика лежит явление электростатической индукции и, сформулированный авторами, метод трех секущих взаимно перпендикулярных плоскостей. Суть метода сводится к условному разделению поверхности тела правильной геометрической формы тремя взаимно перпендикулярными секущими плоскостями на восемь конгруэнтных поверхностных участков. Если каждый такой поверхностный участок тела выполнить из проводящего материала (напылить, наклеить, вытравить и т.п.), то эти участки могут служить чувствительными элементами датчика составляющих вектора напряженности ЭП. Для обеспечения симметрии датчика и равенства чувствительностей по каждой составляющей вектора напряженности ЭП целесообразней использовать в качестве основы датчика тела правильных геометрических форм (сфера [10, 11], куб [12, 13], цилиндр [14], диск [15], квадратная пластина [16]). Впервые этот метод без заявки на его формулировку был использован в работе [17] и далее в работе [18].

Согласно поставленным задачам, дальнейшие исследования будут направлены на построение и разработку датчика составляющих вектора напряженности ЭП, удобного для встраивания в переносные гаджеты. В связи с этим в основу построения датчика целесообразней положить проводящую пластину в форме квадрата.

Согласно методу трех взаимно перпендикулярных секущих плоскостей, разделим квадратную пластину на восемь частей, как показано на рис. 1а.

Пластина, лежащая в основании датчика, может быть как проводящей, так и диэлектрической. Формирование чувствительных элементов датчика на выделенных восьми участках оснований пластины (четыре участка на верхнем основании и четыре — на нижнем) может быть выполнено напылением, наклеиванием, вытрав-

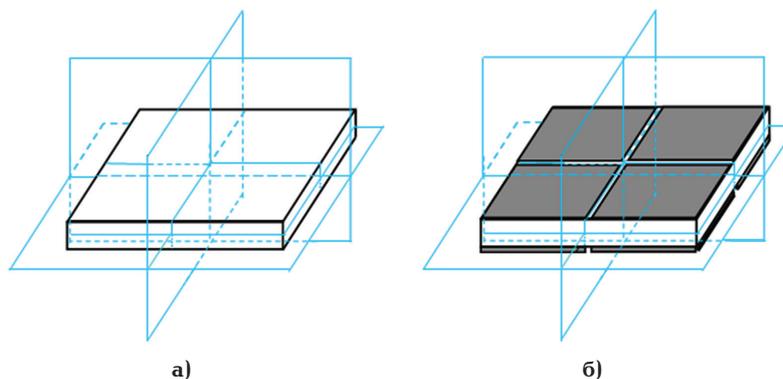


Рис. 1. Разделение тела квадратной пластины тремя секущими плоскостями на восемь равных частей

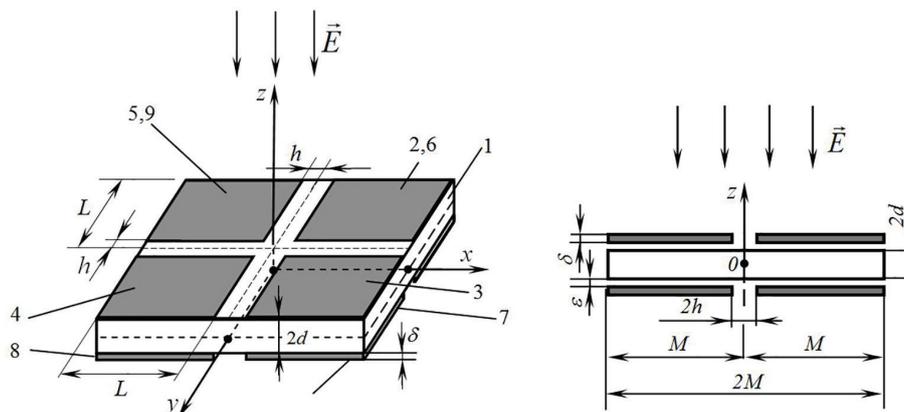


Рис. 2. Расчетная модель многоэлементного датчика в однородном ЭП

ливанием или другими способами. Если пластина диэлектрическая, то на неё можно напылить или наклеить чувствительные элементы из проводящего материала. Если пластина диэлектрическая с уже нанесенными проводящими основаниями (стеклотекстолит фольгированный), то чувствительные элементы можно вытравить. И наконец, если пластина проводящая, то на её поверхность методом напыления сначала наносится тонкий слой диэлектрика толщиной порядка 10–20 мкм, а затем тонкий слой проводящего материала. Сформированные таким образом восемь проводящих чувствительных элементов датчика показаны на рис. 16. В результате проделанных действий сформирован многоэлементный датчик составляющих вектора напряженности ЭП. Расчетная конструктивная модель многоэлектродного датчика, находящегося в однородном ЭП с указанием его геометрических параметров, представлена на рис. 2.

Датчик состоит из проводящей пластины 1, имеющей в сечении форму квадрата, четырех пар проводящих чувствительных элементов, из которых четыре элемента 2–5 расположены на одном основании и четыре элемента 6–9 расположены на другом основании пластины. Чувствительные элементы отдалены друг от друга на расстояние $2h$ и не имеют электрической связи между собой и пластиной основания, имеющего толщину $2d$. Они изготавливаются из проводящего материала малой толщиной δ и имеют форму квадрата с размерами $L \times L$, стороны которого расположены параллельно сторонам квадратной пластины основания с размерами $2M \times 2M$, где $M = (L+h)$.

Таким образом, формируется двойной датчик напряженности ЭП, средней точкой которого будет проводящая пластина основания. В ЭП эта пластина будет принимать потенциал референц-точки [14], т.е. той точки пространства, в которую помещается датчик.

Для дальнейших расчетов примем следующие допущения. Чувствительные элементы 2–9 датчика (рис. 2) выполнены в виде тонкого проводящего слоя толщиной $\delta \ll d$ (δ выполняют от нанометров до микрон), имеющего одинаковую форму и размеры $2M \times 2M$ ($M \gg d$), и изолированы от проводящей поверхности пластины диэлектрическим слоем толщиной $\varepsilon \ll d$ (ε составляет нанометры).

При внесении проводящей пластины в ЭП на её поверхности индуцируются электрические заряды, пропорциональные напряженности электрического поля [9]. Для снятия этих зарядов с нужных частей проводящей поверхности пластины используются чувствительные элементы, которые должны являться ничем иным, как самой поверхностью пластины. Для этого необходимо обеспечить, во-первых, изоляцию чувствительных элементов от проводящей пластины и, во-вторых, равенство потенциалов чувствительных элементов и проводящей пластины. Это возможно осуществить, если принять допущения $\delta \ll h$ и $\varepsilon \ll d$. При этих условиях (и дополнительно принятых мерах) потенциалы чувствительных элементов 2–9 можно считать равными потенциалу проводящей пластины 1, а чувствительные элементы — поверхностью пластины. Таким образом датчик в общем случае представляет ничто иное, как плоскую проводящую пластину с квадратными основаниями.

Рассмотрим работу описанного многоэлементного датчика напряженности ЭП в граничных полях и оценим его погрешность. Граничными полями будем считать однородное и неоднородное ЭП. Условно, однородное поле — это поле, созданное между бесконечно длинными проводящими параллельными пластинами, в котором датчик находится от пластин на расстояниях много больше его размеров. Это поле будем рассматривать как опорное, и погрешность датчика в этом поле будем считать нормированной. В качестве неоднородного поля будем рассматривать поле, создающееся точечным источником и обладающее высокой степенью неоднородности. В этом поле будем оценивать погрешность датчика, вызванную неоднородностью ЭП.

Многоэлектродный датчик в однородном поле. Работы датчика, основанная на рассмотрении проводящей пластины квадратной формы толщиной d и с размерами сторон $M \times M$ ($d \ll M$), помещенной в однородное квазистатическое ЭП с напряженностью $E = E_m \sin \omega t$, рассмотрена в [16]. Воспользовавшись результатами этой работы, проведем исследования многоэлементного датчика.

При внесении датчика в ЭП на его проводящих чувствительных элементах 2–9 индуцируются электрические заряды, величина которых пропорциональна измеряемой напряженности E ЭП.

Электрические заряды на чувствительных элементах 2–9 датчика будут определяться выражением

$$Q = \iint_S \sigma \cdot dS, \quad (1)$$

где $\sigma = -2\varepsilon\varepsilon_0 E_n = -2\varepsilon\varepsilon_0 E_O$ — поверхностная плотность заряда; E_O — напряженность однородного ЭП; S — площадь чувствительного элемента.

Поочередно направляя вектор напряженности ЭП на координатные оси датчика x , y и z , найдем электрические заряды, индуцированные ЭП на частях поверхности пластины, ограниченных размерами чувствительных элементов 2–9.

Если направить вектор напряженности ЭП вдоль оси z датчика, то электрические заряды, индуцированные ЭП на диаметрально расположенной паре чувствительных элементов 2 и 6, с учетом (1) будут определяться выражением

$$Q_{O2,6} = \pm \int_h^M \int_h^M 2\varepsilon\varepsilon_0 E \cdot dx dy = \pm 2\varepsilon\varepsilon_0 E \int_h^M \int_h^M dx dy = \pm 2\varepsilon\varepsilon_0 (M-h)^2 E = \pm 2\varepsilon\varepsilon_0 M^2 \left(1 - \frac{h}{M}\right)^2 \cdot E, \quad (2)$$

где Q_O — заряд, индуцированный однородным ЭП.

Обозначим отношение $\frac{h}{M} = b$, тогда выражение (2) примет вид

$$Q_{O2,6} = \pm 2\varepsilon\varepsilon_0 M^2 (1-b)^2 \cdot E. \quad (3)$$

Меняя границы интегрирования в выражении (2), найдем электрические заряды на других парах чувствительных элементов, таких как 3 и 7, 4 и 8, 5 и 9. Они также будут определяться выражениями (2) и (3). Поскольку под действием ЭП положительные заряды движутся по направлению, а отрицательные против направления поля, то знак минус в выражении (2) будет соответствовать зарядам на чувствительных элементах 2, 3, 4 и 5, а знак плюс — зарядам на чувствительных элементах 6, 7, 8 и 9.

При направлении вектора напряженности ЭП вдоль осей x и y датчика электрические заряды на диаметрально расположенных парах чувствительных элементов, для оси x : 2 и 5, 3 и 4, 6 и 9, 7 и 8, и для оси y : 5 и 4, 3 и 3, 8 и 8, 6 и 7 будут также определяться выражениями (2) и (3).

Если объединить чувствительные элементы 2–9 многоэлементного датчика (рис. 2) в противоположные пары групп, каждая из которых состоит из четырех элементов: по оси X — 2, 3, 6, 7 и 4, 5, 8, 9; по оси Y — 2, 5, 6, 9 и 3, 4, 7, 8; по оси Z — 2, 3, 4, 5 и 6, 7, 8, 9, разделенных координатными плоскостями XOZ , YOZ и XOY , то формируется двойной датчик составляющих вектора напряженности ЭП. С учетом сказанного суммарные заряды на группах чувствительных элементов будут соответственно равны:

первый датчик

$$\text{по оси } x \quad Q_{O2,3,6,7} = -8\varepsilon\varepsilon_0 M^2 (1-b)^2 \cdot E_x; \quad (4)$$

$$\text{по оси } y \quad Q_{O2,5,6,9} = -8\varepsilon\varepsilon_0 M^2 (1-b)^2 \cdot E_y; \quad (5)$$

$$\text{по оси } z \quad Q_{O2,3,4,5} = -8\varepsilon\varepsilon_0 M^2 (1-b)^2 \cdot E_z. \quad (6)$$

второй датчик

$$\text{по оси } x \quad Q_{O4,5,8,9} = +8\varepsilon\varepsilon_0 M^2 (1-b)^2 \cdot E_x; \quad (7)$$

$$\text{по оси } y \quad Q_{O3,4,7,8} = +8\varepsilon\varepsilon_0 M^2 (1-b)^2 \cdot E_y; \quad (8)$$

$$\text{по оси } z \quad Q_{O6,7,8,9} = +8\varepsilon\varepsilon_0 M^2 (1-b)^2 \cdot E_z. \quad (9)$$

Если использовать двойной датчик в дифференциальном включении, тогда для дифференциальных зарядов датчика по осям x , y и z можно записать

$$Q_O^{\text{диф}}{}_x = Q_{O4,5,8,9} - Q_{O2,3,6,7} = 16\varepsilon\varepsilon_0 M^2 (1-b)^2 \cdot E_x; \quad (10)$$

$$Q_O^{\text{диф}}{}_y = Q_{O3,4,7,8} - Q_{O2,5,6,9} = 16\varepsilon\varepsilon_0 M^2 (1-b)^2 \cdot E_y; \quad (11)$$

$$Q_O^{\text{диф}}{}_z = Q_{O6,7,8,9} - Q_{O2,3,4,5} = 16\varepsilon\varepsilon_0 M^2 (1-b)^2 \cdot E_z. \quad (12)$$

Из выражений (10–12) следует, что чувствительности сформированного датчика напряженности ЭП по трем координатным осям x , y и z в однородном поле одинаковы и зависят только от размера M проводящей пластины основания датчика и параметра b

$$G_O^{\text{диф}} = 16\varepsilon\varepsilon_0 M^2 (1-b)^2. \quad (13)$$

Поскольку размеры датчика и его параметры неизменны, чувствительность датчика, при его работе в однородном поле остается постоянной. Следовательно, заряды, индуцированные на чувствительных элементах, пропорциональные напряженности ЭП, могут выступать мерой напряженности этого поля.

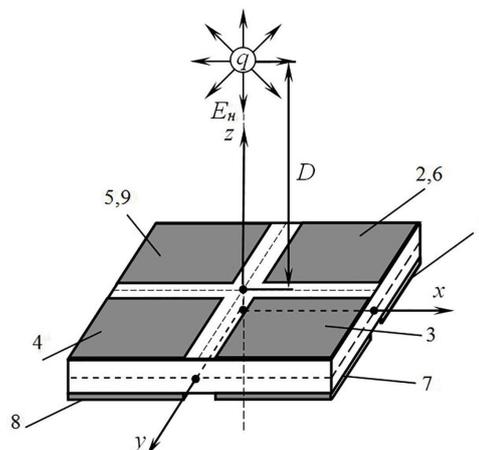


Рис. 3. Многоэлектродный датчик в однородном электрическом поле

Многоэлементный датчик в неоднородном поле точечного источника. Работа датчика в ЭП точечного источника основана на рассмотрении проводящей пластины, находящейся в поле точечного положительного электрического заряда q (рис. 3).

Сохраним все геометрические соотношения датчика, приведенные на рис. 2 и используемые при рассмотрении его взаимодействия с однородным полем.

Воспользовавшись вышеприведенной методикой, найдём электрические заряды, индуцированные на чувствительных элементах датчика полем точечного заряда q . Электрические заряды на чувствительных элементах 2–9 датчика будут определяться выражением (1), в котором поверхностная плотность заряда σ определится выражением [16]

$$\sigma(x, y) = -\frac{2\varepsilon\varepsilon_0}{\left[1 + \frac{x^2}{D^2} + \frac{y^2}{D^2}\right]^{\frac{3}{2}}} \cdot E_H, \quad (14)$$

где E_H — напряженность неоднородного поля.

Поочередно направляя вектор напряженности ЭП на координатные оси датчика x , y и z , найдём электрические заряды, индуцированные ЭП на частях поверхности пластины, ограниченных размерами чувствительных элементов 2–9.

При направлении точечного источника вдоль оси z электрические заряды, индуцированные ЭП на диаметрально расположенной паре чувствительных элементов 2 и 6 определяются выражением

$$Q_{H2,6} = \pm \iint_S \sigma(x, y) \cdot dS = \pm \int_{-h}^M \int_{-h}^M \frac{2\varepsilon\varepsilon_0 dx dy}{\left[1 + \frac{x^2}{D^2} + \frac{y^2}{D^2}\right]^{\frac{3}{2}}} =$$

$$\pm 2\varepsilon\varepsilon_0 M^2 \frac{1}{D^2} \cdot \left[\arctan\left(\frac{\frac{M^2}{D^2}}{\sqrt{1 + 2\frac{M^2}{D^2}}}\right) - \right. \\ \left. - 2 \arctan\left(\frac{\frac{h}{D} \cdot \frac{M}{D}}{\sqrt{1 + \frac{h^2}{D^2} + \frac{M^2}{D^2}}}\right) + \arctan\left(\frac{\frac{h^2}{D^2}}{\sqrt{1 + 2\frac{h^2}{D^2}}}\right) \right] E_H, \quad (15)$$

где Q_H — заряд, индуцированный неоднородным полем.

Введем следующие нормировки: $\frac{M}{D} = a$, $\frac{h}{M} = b$, $\frac{h}{D} = a \cdot b$. Тогда выражение (15) примет вид

$$Q_{H2,6} = \pm 2\varepsilon\varepsilon_0 M^2 \cdot \frac{1}{a^2} \cdot \left[\arctan\left(\frac{a^2}{\sqrt{1 + 2a^2}}\right) - 2 \arctan\left(\frac{a^2 b}{\sqrt{1 + a^2(1 + b^2)}}\right) + \right. \\ \left. + \arctan\left(\frac{a^2 b^2}{\sqrt{1 + 2a^2 b^2}}\right) \right] E_H. \quad (16)$$

Меняя границы интегрирования в выражении (15), найдём электрические заряды на других парах чувствительных элементов, таких как 3 и 7, 4 и 8, 5 и 9. Они также будут определяться выражениями (15) и (16).

В выражениях (15) и (16) знак минус соответствует зарядам на чувствительных элементах 2, 3, 4 и 5, а знак плюс — зарядам на чувствительных элементах 6, 7, 8 и 9.

При направлении точечного заряда вдоль осей x и y датчика электрические заряды на диаметрально расположенных парах чувствительных

элементов — для оси x : 2 и 5, 3 и 4, 6 и 9, 7 и 8, и для оси y : 5 и 4, 3 и 3, 8 и 8, 6 и 7 будут также определяться выражениями (15) и (16).

Объединяя чувствительные элементы 2–9 многоэлементного датчика попарно в группы по координатным осям x , y и z и формируя двойной датчик, как это было сделано при рассмотрении датчика в однородном поле, суммарные заряды на каждой паре групп чувствительных элементов будут соответственно равны:

По оси x

Первый датчик

$$Q_{H2,3,6,7} = -8\varepsilon\varepsilon_0 M^2 \cdot \frac{1}{a^2} \cdot \left[\arctan\left(\frac{a^2}{\sqrt{1 + 2a^2}}\right) - 2 \arctan\left(\frac{a^2 b}{\sqrt{1 + a^2(1 + b^2)}}\right) + \right. \\ \left. + \arctan\left(\frac{a^2 b^2}{\sqrt{1 + 2a^2 b^2}}\right) \right] E_{Hx}. \quad (17)$$

Второй датчик

$$Q_{H4,5,8,9} = +8\varepsilon\varepsilon_0 M^2 \cdot \frac{1}{a^2} \cdot \left[\arctan\left(\frac{a^2}{\sqrt{1+2a^2}}\right) - 2 \arctan\left(\frac{a^2 b}{\sqrt{1+a^2(1+b^2)}}\right) + \arctan\left(\frac{a^2 b^2}{\sqrt{1+2a^2 b^2}}\right) \right] E_{Hx}. \quad (18)$$

По оси y

Первый датчик

$$Q_{H2,5,6} = -8\varepsilon\varepsilon_0 M^2 \cdot \frac{1}{a^2} \cdot \left[\arctan\left(\frac{a^2}{\sqrt{1+2a^2}}\right) - 2 \arctan\left(\frac{a^2 b}{\sqrt{1+a^2(1+b^2)}}\right) + \arctan\left(\frac{a^2 b^2}{\sqrt{1+2a^2 b^2}}\right) \right] E_{Hy}. \quad (19)$$

Второй датчик

$$Q_{H3,4,7,8} = +8\varepsilon\varepsilon_0 M^2 \cdot \frac{1}{a^2} \cdot \left[\arctan\left(\frac{a^2}{\sqrt{1+2a^2}}\right) - 2 \arctan\left(\frac{a^2 b}{\sqrt{1+a^2(1+b^2)}}\right) + \arctan\left(\frac{a^2 b^2}{\sqrt{1+2a^2 b^2}}\right) \right] E_{Hz}. \quad (20)$$

По оси z

Первый датчик

$$Q_{H2,3,4,5} = -8\varepsilon\varepsilon_0 M^2 \cdot \frac{1}{a^2} \cdot \left[\arctan\left(\frac{a^2}{\sqrt{1+2a^2}}\right) - 2 \arctan\left(\frac{a^2 b}{\sqrt{1+a^2(1+b^2)}}\right) + \arctan\left(\frac{a^2 b^2}{\sqrt{1+2a^2 b^2}}\right) \right] E_{Hx}. \quad (21)$$

Второй датчик

$$Q_{H6,7,8,9} = +8\varepsilon\varepsilon_0 M^2 \cdot \frac{1}{a^2} \cdot \left[\arctan\left(\frac{a^2}{\sqrt{1+2a^2}}\right) - 2 \arctan\left(\frac{a^2 b}{\sqrt{1+a^2(1+b^2)}}\right) + \arctan\left(\frac{a^2 b^2}{\sqrt{1+2a^2 b^2}}\right) \right] E_{Hz}. \quad (22)$$

Если использовать двойной датчик в дифференциальном включении, тогда для дифференциальных зарядов датчика по осям x, y и z можно записать

$$Q_{Hx}^{diff} = Q_{4,5,8,9} - Q_{2,3,6,7} = 16\varepsilon\varepsilon_0 M^2 \cdot \frac{1}{a^2} \cdot \left[\arctan\left(\frac{a^2}{\sqrt{1+2a^2}}\right) - 2 \arctan\left(\frac{a^2 b}{\sqrt{1+a^2(1+b^2)}}\right) + \arctan\left(\frac{a^2 b^2}{\sqrt{1+2a^2 b^2}}\right) \right] E_{Hx}; \quad (23)$$

$$Q_{Hy}^{diff} = Q_{3,4,7,8} - Q_{2,5,6,9} = 16\varepsilon\varepsilon_0 M^2 \cdot \frac{1}{a^2} \cdot \left[\arctan\left(\frac{a^2}{\sqrt{1+2a^2}}\right) - 2 \arctan\left(\frac{a^2 b}{\sqrt{1+a^2(1+b^2)}}\right) + \arctan\left(\frac{a^2 b^2}{\sqrt{1+2a^2 b^2}}\right) \right] E_{Hy}; \quad (24)$$

$$Q_{H_z}^{\text{оиф}} = Q_{6,7,8,9} - Q_{2,3,4,5} = 16\epsilon\epsilon_0 M^2 \cdot \frac{1}{a^2} \left[\arctan\left(\frac{a^2}{\sqrt{1+2a^2}}\right) - 2 \arctan\left(\frac{a^2 b}{\sqrt{1+a^2(1+b^2)}}\right) + \arctan\left(\frac{a^2 b^2}{\sqrt{1+2a^2 b^2}}\right) \right] E_{H_z}. \quad (25)$$

Из выражений (23–25) следует, что дифференциальная чувствительность двойного датчика напряженности ЭП по трем координатным осям x , y и z одинакова и определяется выражением

$$G_{H_z}^{\text{оиф}} = 16\epsilon\epsilon_0 M^2 \frac{1}{a^2} \cdot \left[\arctan\left(\frac{a^2}{\sqrt{1+2a^2}}\right) - 2 \arctan\left(\frac{a^2 b}{\sqrt{1+a^2(1+b^2)}}\right) + \arctan\left(\frac{a^2 b^2}{\sqrt{1+2a^2 b^2}}\right) \right]. \quad (26)$$

Согласно (26), дифференциальная чувствительность датчика, находящегося в неоднородном поле, не остается постоянной, а зависит как от конструктивных параметров M и b самого датчика, так и от параметров взаимодействующей среды, а именно от расстояния до источника поля a .

Результаты исследования. Оценим погрешность датчика, вызванную неоднородностью поля. Для этого сопоставим чувствительности датчика, находящегося в однородном (13) и неоднородном (26) полях. Примем чувствительность датчика в однородном поле как меру, соответствующую однородному полю. Тогда по отношению к ней искомая погрешность датчика определится выражением

$$\delta(a, b) = \frac{G_{H_z}^{\text{оиф}} - G_{H_z}^{\text{оиф}}}{G_{H_z}^{\text{оиф}}} \cdot 100 = \left[\frac{1}{a^2(1-b^2)} \cdot \left[\arctan\left(\frac{a^2}{\sqrt{1+2a^2}}\right) - 2 \arctan\left(\frac{a^2 b}{\sqrt{1+a^2(1+b^2)}}\right) + \arctan\left(\frac{a^2 b^2}{\sqrt{1+2a^2 b^2}}\right) \right] - 1 \right] \cdot 100. \quad (27)$$

Проанализируем и оценим погрешность (27) датчика от неоднородности ЭП. Для этого учтем ранее введенные нормировки $a = M/D$, $b = h/M$, где M — половина стороны квадратной пластины основания датчика; D — расстояние от центра датчика до источника поля. Нормирующий параметр a определяет степень неоднородности поля и характеризует близость датчика к источнику поля. Таким образом, с удалением датчика от источника ЭП ($a \rightarrow 0$) поле вблизи окрестностей датчика приближается к однородному. Наиболее приемлемый диапазон изменения относительного параметра a от 0 до 1. При этом

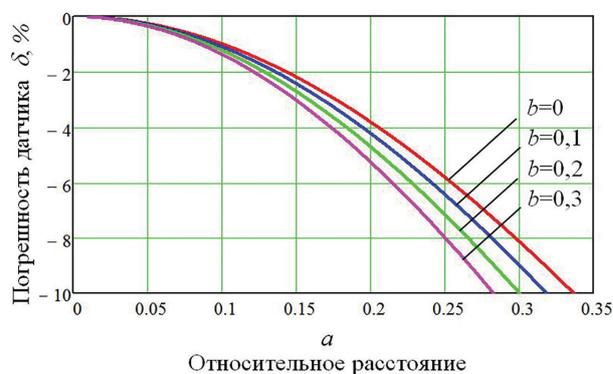


Рис. 4. Погрешность датчика от неоднородности поля в зависимости от относительного расстояния a и различных значений параметра $b=h/M$

поле изменяется от однородного $a = 0$ до поля со 100 % неоднородностью, $a = 1$. Нормирующий параметр b отвечает за конструктивные размеры чувствительных элементов, оптимизация размеров которых позволит свести погрешность датчика от неоднородности поля к желаемому минимуму.

Рассчитаем и построим графики погрешности (27) от неоднородности поля в зависимости от параметров a и b . Для этого воспользуемся математическим редактором MathCAD 14. График погрешности от неоднородности ЭП для датчика с чувствительными элементами в виде квадратов, отстоящих друг от друга на расстояние $2h$, в зависимости от относительного расстояния a и различных значений параметра $b = h/M$ представлены на рис. 4.

Анализ графиков рис. 4 показывает, что погрешность многоэлектродного датчика во всем пространственном диапазоне измерения отрицательная и при $a > 0,15$ выходит за пределы 2 %. И это уже на расстояниях от источника поля D , равных приблизительно семи линейным размерам M половины стороны проводящей квадратной пластины основания датчика ($D \approx 7M$). В сравнении с датчиком, используемым в работе [19], рассмотренный в статье датчик обладает лучшими метрологическими характеристиками.

Выводы и заключение. Результаты исследования позволяют сделать следующие выводы:

1) сформулирован метод трех секущих взаимно перпендикулярных плоскостей, позволяющий получать датчики составляющих вектора напряженности ЭП;

2) подтверждена возможность создания плоского многоэлементного датчика составляющих вектора напряженности ЭП с использованием метода трех секущих взаимно перпендикулярных плоскостей;

3) установлено, что многоэлементный датчик напряженности ЭП обладает средними метрологическими характеристиками (погрешность до 2 % при пространственном диапазоне $a \approx 0,15$);

4) установлено ограничение пространственного диапазона a измерения датчика предельным расстоянием D до источника поля заданной погрешностью датчика δ от неоднородности поля. Например, при $\delta = 2$ % пространственный диапазон $a \approx 0,15$, тогда $D \approx 7M$, где M — линейный размер половины стороны проводящей квадратной пластины — основы датчика, а уже при $\delta = 10$ % $a \approx 0,33$, а $D \approx 3M$;

5) датчик выдает сигнал, пропорциональный заниженному значению заряда, индуцированному неоднородным полем, что приведет к необъективной оценке влияния напряженности ЭП на технические и биологические объекты;

6) датчик имеет слоистую структуру, представляющую чередование диэлектрических и проводящих слоев, толщина которых может составлять десятки нанометров. Это позволяет изготавливать датчик методами нанотехнологий.

В заключение можно отметить, что метрологические характеристики датчика можно улучшить, решив задачу оптимизации размеров чувствительных элементов датчика. Дальнейшие исследования будут проводиться в этом направлении.

Библиографический список

1. 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).
2. Измеритель параметров электростатического поля ИПЭП-1. Руководство по эксплуатации УШЯИ.411153.002 РЭ. URL: <http://www.priborelektro.ru/price/IPEP-1.php4?deviceid=854> (дата обращения: 12.04.2019).
3. Измеритель параметров электрического и магнитного полей ВЕ-метр-АТ-003 — 3D. Руководство по эксплуатации БВЕК43 1440.07 РЭ. URL: <http://ciklon-pribor.ru> (дата обращения: 12.04.2019).
4. Юркевич В. М., Кондратьев Б. Л. О методике измерения напряженности и других характеристик электрического поля // Измерительная техника. 1980. № 5. С. 57–59.
5. Чугунов С. А., Юркевич В. М. Расширение зоны измерения параметров электрического поля при применении зондового метода // Измерительная техника. 1981. № 1. С. 33–35.
6. 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.
7. 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.
8. Бирюков С. В. Теория и практика построения электроиндукционных датчиков потенциала и напряженности электрического поля // Омский научный вестник. 2000. Вып. 11. С. 89–93.

9. Берент Г. Н., Плейс И. Р. Датчик электрического поля // Приборы для научных исследований. 1971. № 6. С. 141–142.

10. Мисакян М., Коттер Ф. Р., Калер Р. Л. Миниатюрный датчик электрического поля // Приборы для научных исследований. 1978. № 7. С. 52–55.

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

12. E. P. Pittman, Stanford R. A. Electric field sensor. US patent no. 3,641,427; filed September 24th, 1969; published February 08th, 1972.

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

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

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

16. 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.

17. А. с. 920569 СССР, МКИ G 01R 29/08. Устройство для измерения составляющих электрического поля / Хахамов И. В. № 2954934/18-21; заявл. 10.07.80; опубл. 15.04.82. Бюл. № 14.

18. А. с. 1401407 СССР, МКИ G 01 R 29/12 Датчик напряженности электрического поля / Юркевич В. М., Климашевский И. Л., Полетаев В. А., Сидоров И. А. № 4114543/24-09; заявл. 09.09.86; опубл. 09.06.88, Бюл. № 21.

19. Baicry M., Le Prado M. Device for measuring an electric field in a conducting medium and method of calibrating such a device. US patent 0238646A1; filed February 17th, 2016; published August 18th, 2016.

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

SPIN-код: 9384-0078

ORCID: 0000-0002-1362-9911

AuthorID (SCOPUS): 7006438919

ТЮКИН Александр Владимирович, кандидат технических наук, доцент (Россия), доцент кафедры «Физика» Сибирского государственного автомобильно-дорожного университета, г. Омск. Адрес для переписки: sbiryukov154@mail.ru

Для цитирования

Бирюков С. В., Тюкин А. В. Теоретические исследования многоэлектродного датчика составляющих вектора напряженности электрического поля в форме квадратной пластины из проводящего материала // Омский научный вестник. 2019. № 3 (165). С. 46–53. DOI: 10.25206/1813-8225-2019-165-46-53.

Статья поступила в редакцию 23.04.2019 г.

© С. В. Бирюков, А. В. Тюкин