



ЭЛЕКТРОНИКА, ФОТОНИКА, ПРИБОРОСТРОЕНИЕ И СВЯЗЬ

УДК 621.317.328

DOI: 10.25206/1813-8225-2023-186-134-139

С. В. БИРЮКОВ

Омский государственный
технический университет,
г. Омск

ИССЛЕДОВАНИЕ ЭЛЕКТРОИНДУКЦИОННОГО ДИСКОВОГО ДАТЧИКА НАПРЯЖЕННОСТИ ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ПОЛЯ

Задачи, связанные с защитой биологических и технических объектов от воздействия электрических, являются актуальными. Одна из таких задач связана с разработкой датчиков напряженности электрического поля с заданными метрологическими характеристиками. Целью исследования является минимизация погрешности известного датчика и расширения его пространственного диапазона измерений за счет рационального выбора чувствительных элементов. Предложенный в работе датчик имеет отрицательную погрешность δ от неоднородности поля по модулю, не превышающую 3 % в пространственном диапазоне измерения $0 \leq r \leq R$, где R — радиус дискового основания датчика. Для обеспечения требуемых метрологических характеристик датчика были подобраны рациональные размеры его чувствительных элементов. При этом рациональный радиус r чувствительных элементов, выполненных в форме круга, должен удовлетворять условию $r < R$, т.е. должен быть меньше радиуса R дискового основания датчика. При выполнении этого условия меньшему радиусу r чувствительного элемента будет соответствовать меньшая погрешность δ от неоднородности поля и больший пространственный диапазон измерения. В сравнении с известными датчиками, при одинаковой погрешности, предложенный датчик имеет пространственный диапазон измерения примерно в пять раз больше. Такой подход к выбору чувствительных элементов позволяет проектировать датчики с лучшими метрологическими характеристиками.

Ключевые слова: электрическое поле, однородное поле, неоднородное поле, точечный источник, напряженность, дисковый датчик, погрешность от неоднородности поля, электрометрические измерения.

Введение. Электрические поля (ЭП) низкочастотного диапазона (10 Гц ... 1 МГц) оказывают негативное влияние на работу технических устройств и на функционирование биологических систем, в частности человека. Основным негативным фак-

тором низкочастотного ЭП является его напряженность. Источниками низкочастотного ЭП, в зону которых попадают человек, животные и природная среда, являются высоковольтные линии электропередач (ЛЭП), трансформаторные подстанции (ПС),

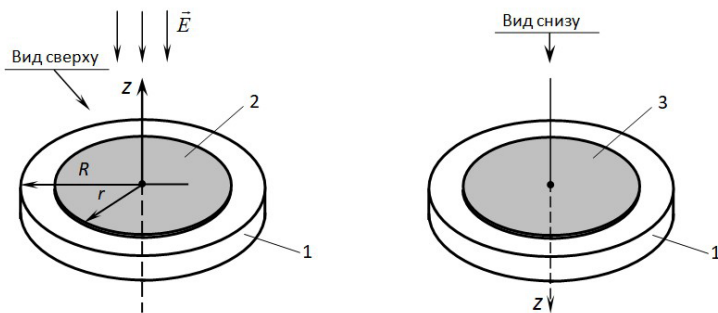


Рис. 1. Датчик напряженности электрического поля с проводящей подложкой в форме круглой пластины с чувствительными элементами радиуса $r < R$ в однородном поле

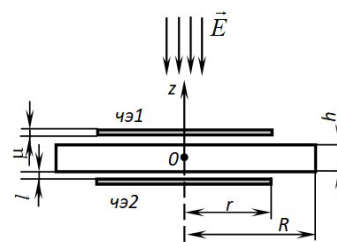


Рис. 2. Конструктивные параметры датчика и его взаимодействие с ЭП

кабельные линии и низковольтные бытовые приборы и электронная техника.

Одним из способов средств защиты от воздействия ЭП — это выявление зон повышенной напряженности и исключение присутствия человека без специальных средств защиты в этих зонах. Для выявления опасных для жизнедеятельности человека зон с повышенной напряженностью необходимы средства контроля и измерения уровней напряженности ЭП. Основной составляющей этих средств являются датчики напряженности ЭП.

Разработка таких датчиков и средств измерений на их основе ведется в России [1–5] и за рубежом [6–10]. Данная работа не является исключением. В работе исследуется однокоординатный электроиндукционный планарный датчик напряженности ЭП. Датчик выполнен в форме проводящего диска с круговыми чувствительными элементами, радиус которых меньше радиуса диска. Ранее автором в работах [11, 12] проведены теоретические исследования работы дискового датчика напряженности низкочастотного ЭП с чувствительными элементами, имеющими радиус, равный радиусу диска. В результате исследований были получены математические выражения для выходного сигнала датчика, его погрешности и пространственный диапазон измерения, в пределах которого поддерживается его погрешность. Показано, что погрешность датчика от неоднородности поля отрицательная и составляет $\delta = -3\%$.

С такой погрешностью датчик будет измерять напряженность ЭП на расстояниях от источника поля $d = 5R$, где R — радиус проводящего диска датчика.

В работе [11] отмечается простота технической реализации и малые габариты датчика, позволяющие встраивать датчик в измерительный прибор. Недостатком датчика является малый пространственный диапазон измерения при заданной погрешности. Поэтому данный датчик требует улучшения метрологических характеристик, приводящих к расширению пространственного диапазона измерения при малой погрешности, вызванной неоднородностью реальных ЭП. Улучшение метрологических характеристик этого датчика будет являться целью данной работы.

Постановка задачи. Чтобы достичь поставленных целей, требуется решить ряд задач:

1) установить взаимосвязи между размерами чувствительных элементов датчика, размером его дискового основания и пространственным диапазоном измерения;

2) установить взаимосвязь погрешности датчика от размеров его чувствительных элементов;

3) провести оптимизацию размеров чувствительных элементов датчика, при которых его погрешность будет минимальной в максимальном возможном пространственном диапазоне измерения.

Теория. В основе теории работы датчика лежат его конструктивные и математические модели.

Конструктивная модель датчика состоит из проводящего диска 1 радиуса R , на основаниях которого расположены изолированно от него проводящие чувствительные элементы 2 и 3, как показано на рис. 1.

Проводящее основание датчика имеет толщину h ($h \ll R$), много меньшую радиуса R диска. Чувствительные элементы и изоляционные слои наносятся на поверхность диска методом напыления. Чувствительные элементы имеют круглую форму радиуса $r < R$ и толщину $\mu < 100$ мкм, а изоляционные слои имеют толщину $k < 50$ мкм (рис. 2).

Малые толщины чувствительных элементов $\mu \ll h$ и изоляционных слоёв $k \ll h$, позволяют считать чувствительные элементы неотъемлемой частью проводящего диска с потенциалами, равными потенциалам диска. В этом случае датчик представляет единый проводящий диск. Описанная конструктивная модель датчика защищена авторским правом [13].

Математическую модель датчика составим на основании теории его взаимодействия с однородным полем свободного пространства и неоднородным полем вблизи источника. Однородное поле свободного пространства будем рассматривать как эталонное. Оно будет служить эталоном при оценке погрешности датчика, работающего в неоднородном поле.

Воспользовавшись датчиком, представленным на рис. 1, и его конструктивными параметрами, указанными на рис. 2, проведем теоретические исследования взаимодействия датчика с ЭП различной неоднородности. В качестве источника неоднородного ЭП выберем поле точечного заряда, поле которого убывает обратно пропорционально квадрату расстояния до исследуемой точки поля. С помощью такого поля можно смоделировать поля с различной степенью неоднородности.

Рассмотрим взаимодействие датчика напряженности с однородным и неоднородным ЭП.

Датчик в однородном поле. Поместим проводящий диск в однородное поле (рис. 1) так, чтобы силовые линии поля были перпендикулярно его поверхности. При этом на двух противоположных основаниях диска будут индуцироваться электрические заряды. На одном основании — отрицательные, а на другом — положительные. Величины этих зарядов пропорциональны измеряемой напряжен-

ности ЭП. При этом сам проводящий диск приобретает потенциал референц-точки, т.е. точки пространства, совпадающей с центром диска.

Электрические заряды, индуцированные на основаниях диска, пропорциональны напряженности ЭП в точке размещения датчика. Поэтому необходимо установить взаимосвязь между индуцированными однородным полем зарядами и конструктивными параметрами датчика.

Для датчика с чувствительными элементами в форме круга с радиусом $r=R$ эта взаимосвязь получена в работе [11]. В данной работе чувствительные элементы выполнены в форме круга с радиусом $r < R$, поэтому нужны дополнительные исследования.

Введем нормировку $b=r/R$. Она понадобится для построения математической модели датчика и будет отвечать за относительный размер чувствительного его элемента.

Индуцированные заряды на чувствительных элементах датчика можно определить двойного интегрирования плотности электрических зарядов на поверхностях чувствительных элементов датчика площадью S

$$q = \iint_s \sigma \cdot dS, \quad (1)$$

где $\sigma = -2\epsilon\epsilon_0 E_n = -2\epsilon\epsilon_0 \cdot E_0$ — поверхностная плотность заряда [2]; ϵ — диэлектрическая проницаемость среды; ϵ_0 — электрическая постоянная; E_0 — напряженность однородного ЭП; $dS = \rho d\rho d\varphi$ — элемент площади чувствительного элемента.

Воспользовавшись выражением (1) и вводя полярные координаты для элемента dS поверхности чувствительных элементов, получим заряды чувствительных элементов 2 и 3:

$$q_0 = \pm 2\pi\epsilon\epsilon_0 R^2 b^2 E_0 = \pm k_0 E_0, \quad (2)$$

где q_0 — заряд, индуцируемый однородным полем; знак «+» и знак «-» соответственно относятся к чувствительным элементам 2 и 3; $k_0 = 2\pi\epsilon\epsilon_0 R^2 b^2$ — коэффициент пропорциональности в однородном поле.

Из выражения (2) следует, что электрические заряды, индуцированные на чувствительных элементах 2 и 3, пропорциональны напряженности однородного ЭП E_0 . При этом коэффициент пропорциональности является постоянной величиной, т.к. определяется только через конструктивные параметры R , b датчика и среды ϵ .

В связи с тем что датчик состоит из двух чувствительных элементов, из него можно сформировать двойной датчик. Для двойного датчика целесообразно использовать его включение в измерительную цепь в дифференциальном режиме. При таком включении выходной сигнал датчика будет пропорционален сумме зарядов с чувствительных элементов 2 и 3

$$q_0^{\Delta\Phi} = (+q_0) - (-q_0) = 2q_0 = 4\pi\epsilon\epsilon_0 R^2 b^2 E_0 = 2k_0 E_0. \quad (3)$$

Это выражение будет включено в математическую модель датчика и будет эталонным, отвечающим в математической модели за поведение датчика в однородном ЭП.

Датчик в неоднородном поле точечного заряда. Представим графическую картину неоднородного

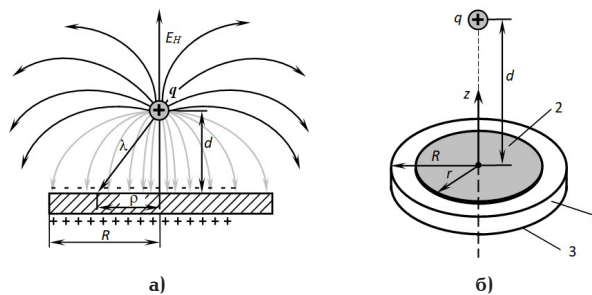


Рис. 3. Датчик напряженности ЭП в поле точечного источника: а) вид силовых линий; б) датчик с выделенной зоной снятия заряда в форме круга радиуса r

ЭП в присутствии проводящего диска, находящегося в поле точечного заряда q (рис. 3а, б). Будем считать, что заряд q положительный и находится на расстоянии d от проводящего диска. Рис. 3а демонстрирует силовые линии ЭП при взаимодействии проводящего диска с точечным зарядом, а также показывает электрические заряды, индуцированные на поверхностях оснований проводящего диска. На рис. 3б показано, что чувствительные элементы датчика, с которых необходимо снимать заряды, выполнены в форме круга радиуса $r < R$ меньшего радиуса диска.

Заряды, индуцированные на чувствительных элементах датчика, найдем из выражения (1), подставив в него поверхностную плотность σ , полученную в работе [11] для неоднородного поля точечного заряда

$$\sigma = - \frac{2\pi\epsilon\epsilon_0}{\left[1 + \left(\frac{\rho}{d}\right)^2\right]^{\frac{3}{2}}} E_H, \quad (4)$$

где d — расстояние от источника ЭП до центра проводящего диска; ρ — расстояние от центра проводящего диска до точки наблюдения (см. рис. 3а); E_H — напряженность неоднородного ЭП. Тогда, с учетом сказанного, выражения для индуцированных на чувствительных элементах 2 и 3 датчика зарядов будут иметь вид

$$q_H = \pm 2\pi\epsilon\epsilon_0 R^2 \frac{2}{\left(\frac{R}{d}\right)^2} \left[1 - \frac{1}{\sqrt{1 + \left(\frac{r}{d}\right)^2}}\right] E_H = \pm k_H E_H, \quad (5)$$

где q_H — заряд, индуцируемый неоднородным полем; знак «+» и знак «-» соответственно относятся к чувствительным элементам 2 и 3 (см. рис. 3,б);

$$k_H = 2\pi\epsilon\epsilon_0 R^2 \frac{2}{\left(\frac{R}{d}\right)^2} \left[1 - \frac{1}{\sqrt{1 + \left(\frac{r}{d}\right)^2}}\right] \text{ — коэффициент пропорциональности в неоднородном поле.}$$

Из выражения (5) следует, что коэффициент пропорциональности k в неоднородном поле является непостоянной величиной и зависит от расстояния d , не связанного с параметрами датчика. По-

этому коэффициент k будет меняться от перехода от одной точки измерения к другой, т.е. от одной степени неоднородности к другой. Чем меньше d , тем больше степень неоднородности поля. Зависимость коэффициента пропорциональности k от степени неоднородности поля будет приводить к погрешности, вызванной этой неоднородностью.

Для дальнейших исследований введем нормировку $a=R/d$. Параметр a будем рассматривать как пространственный диапазон измерения. Он также косвенно будет характеризовать степень неоднородности поля. Таким образом, в математической модели датчика параметр a будет отвечать как за пространственный диапазон измерения, так и за степень неоднородности ЭП.

С учетом сказанного приведем выражение (5) к виду

$$q_H = \pm 2\pi\epsilon\epsilon_0 R^2 \frac{2}{a^2} \left[1 - \frac{1}{\sqrt{1+a^2b^2}} \right] E_H. \quad (6)$$

Из выражения (6) следует, что электрические заряды, индуцированные на чувствительных элементах 2 и 3, пропорциональны напряженности неоднородного ЭП E_H . При этом коэффициент пропорциональности не является постоянной величиной, т.к. он зависит от переменного параметра a , зависящего от удаленности датчика от источника поля.

При включении датчика в измерительную цепь в дифференциальном режиме происходит, так же как и в однородном поле, удвоение зарядов с двух чувствительных элементов 2 и 3. При этом величина удвоенного заряда будет определяться выражением

$$q_H^{\text{АнФ}} = \pm 4\pi\epsilon\epsilon_0 R^2 b^2 \frac{2}{a^2 b^2} \times \left[1 - \frac{1}{\sqrt{1+a^2b^2}} \right] E_H = 2k_H E_H. \quad (7)$$

Выражение (7) будет вторым выражением математической модели датчика, отвечающим за поведение датчика в неоднородном поле.

Полученные выражения (3) и (7) позволяют сделать оценку погрешности датчика от неоднородности ЭП, которая примет вид

$$\delta = \frac{q_H^{\text{АнФ}} - q_0^{\text{АнФ}}}{q_0^{\text{АнФ}}} \cdot 100 = \left[\frac{2}{a^2 b^2} \left(1 - \frac{1}{\sqrt{1+a^2b^2}} \right) - 1 \right] \cdot 100\%. \quad (8)$$

Выражение (8) будет являться третьим выражением математической модели рассматриваемого датчика.

Таким образом, созданы:

— конструктивная модель датчика, представленная рис. 1 и введенными выше в его описании геометрическими параметрами;

— математическая модель датчика, включающая выражения (3), (7) и (8) и введенные нормированные параметры $a=R/d$ и $b=r/R$.

Параметры a и b , входящие в выражения (3), (7) и (8), позволяют найти в лучшем случае оптимальные, а в приемлемом случае рациональные конструктивные размеры как датчика, так и его чувствительных элементов, обеспечивающие минимальную погреш-

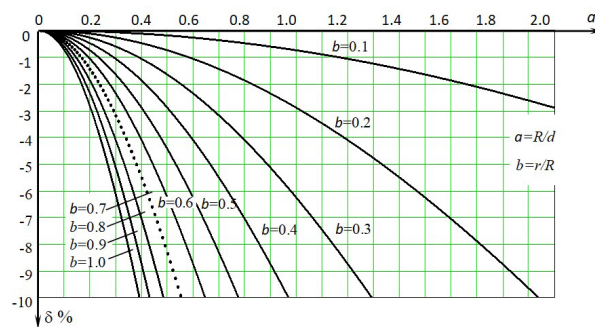


Рис. 4. Графики погрешности датчика от неоднородности ЭП в зависимости от относительного расстояния a до источника поля при постоянном относительном размере чувствительного элемента b

ность при максимально возможном пространственным диапазоном измерения.

Выбор конструктивных размеров чувствительных элементов датчика. Для оптимального выбора конструктивных размеров чувствительных элементов датчика воспользуемся выражением (8) для погрешности датчика от неоднородности ЭП. Изменяя в выражении (8) параметры a и b , будем искать такое их сочетание, при котором погрешность датчика примет допустимые значения при максимально возможном пространственном диапазоне измерения.

Для этого воспользуемся математическим редактором MathCAD, в котором построим графики в зависимости погрешности δ от параметров a и b (рис. 4).

Графики (рис. 4) позволяют при выбранном $b=r/R$ найти радиус r чувствительного элемента, обеспечивающий датчику заданную погрешность в максимально возможном пространственном диапазоне a . Однако графики не позволяют оптимизировать размеры чувствительных элементов, т.к. они монотонно убывают и на них не наблюдается максимумов и минимумов. Однако рациональный выбор размеров чувствительных элементов возможен. Например, задаём пространственный диапазон $0 \leq a \leq 1$. В этом диапазоне расстояние до источника поля $d=R$. По рис. 4 находим, что этому пространственному диапазону соответствуют графики с параметрами чувствительных элементов $b=0,3$; $b=0,2$; $b=0,1$. Выбранным графикам при $a=1$ будут соответствовать предельные погрешности -6% , -3% и $-0,8\%$. Тогда выбранной предельной погрешности датчика, например -3% , будет соответствовать $b=0,2$, а радиус чувствительного элемента $r=0,2R$. Сравнивая дисковый датчик, рассмотренный в данной работе ($\delta = -3\%$, $b=0,2$ и $a=1$), и дисковый датчик, представленный в работе [11] ($\delta = -3\%$, $b=1$ и $a=0,2$) делаем вывод, что рассматриваемый датчик при одинаковой погрешности $\delta = -3\%$ имеет больший пространственный диапазон измерения, чем датчик, представленный в работе [11].

Из сказанного следует: пространственный диапазон стал шире в пять раз и изменился от $a=0,2$ до $a=1$.

В результате проведенных исследований удалось создать датчик с лучшими метрологическими характеристиками, чем у известных датчиков, описанных в работах [6, 11].

Результаты исследования. Исследования, проведенные в данной работе, позволили создать однокоординатный электроиндукционный датчик

напряженности ЭП дискового типа с требуемыми метрологическими характеристиками. Датчик имеет отрицательную погрешность δ от неоднородности поля по модулю, не превышающую 3% в пространственном диапазоне измерения $0 \leq a < R$, где R — радиус дискового основания датчика. Для обеспечения требуемых метрологических характеристик датчика были подобраны рациональные размеры его чувствительных элементов. При этом рациональный радиус r чувствительных элементов, выполненных в форме круга, должен удовлетворять условию $r < R$, т.е. должен быть меньше радиуса R дискового основания датчика. При выполнении этого условия меньшему радиусу r чувствительного элемента будет соответствовать меньшая погрешность δ от неоднородности поля и больший пространственный диапазон измерения.

В сравнении с известными датчиками, при одинаковой погрешности, предложенный датчик имеет пространственный диапазон измерения примерно в пять раз больше.

Выводы и заключение. По результатам исследований, проведенных в данной работе, можно сделать следующие выводы:

- разработана конструктивная модель электроиндукционного датчика напряженности ЭП дискового типа, в отличие от ранее известных датчиков, имеющих чувствительные элементы в форме круга радиуса $r < R$, где R — радиус дискового основания датчика;

- получены функциональные зависимости электрических зарядов, индуцированных полями на чувствительных элементах датчика от напряженности ЭП различной неоднородности;

- получены функциональные зависимости погрешности датчика, вызванной неоднородностью поля от его конструктивных параметров и пространственного диапазона измерения;

- составлена математическая модель электроиндукционного датчика напряженности ЭП дискового типа, включающая в себя функциональные зависимости электрических зарядов, индуцированных полями от напряженности ЭП различной неоднородности и зависимость погрешности датчика от его конструктивных параметров и пространственного диапазона измерения;

- выявлены рациональные конструктивные размеры чувствительных элементов датчика, с учетом требуемых погрешности и пространственного диапазона измерений, которые следует выбирать из условия $r \leq 0,2R$, где r — радиус круговых чувствительных элементов; R — радиус дискового основания датчика. Выполнение этого условия обеспечивает погрешность датчика в пространственном диапазоне измерения $a \geq 1$ ($d < R$), не превышающую –3 % (см. рис. 4).

Достоинством датчика является простота его конструкции.

Это позволяет изготовление датчика методами нанотехнологий. Малые габариты датчика дают возможность его размещения внутри измерительного прибора.

Таким образом, датчики предложенной конструкции позволяют измерять напряженность ЭП с погрешностью по модулю менее 3 % на расстояниях от источника поля d , менее радиуса R диска основания датчика, т.е. $d \leq R$.

В заключение отметим, что дальнейшие исследования будут направлены на улучшение метрологических характеристик дискового датчика.

Библиографический список

1. Юркевич В. М., Кондратьев Б. А. 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., Поletaев В. А. [и др.]. 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. International Conference on Large High Voltage Electric Systems, Report 36-06, Session 27th August-4th September. Paris. 1986. 5 p.
5. Бирюков С. В. Теория и практика построения электро- и индукционных датчиков потенциала и напряженности электрического поля // Омский научный вестник. 2000. Вып. 11. С. 89–93.
6. Berent G. N., Plays I. R. Electric Field sensor // Instruments for scientific research. 1971. Vol. 6. P. 141–142.
7. Misakian M., Kotter F. R., Kahler R. L. Miniature ELF Electric Field Probe // Instruments for Scientific Research. 1978. Vol. 7. P. 933–935.
8. Steward M. F. Electric field measurement system. US patent 5315232; filed January 3rd, 1991; published May 24th, 1994.
9. Beasley W. H., Byerley L. G., Swenson J. A. [et al.]. Low power, low maintenance. Electric-field meter. US patent US006984971B1; filed March 14th, 2002; published January 10th, 2006.
10. Baicry M., Prado M. Device for measuring an electric field in a conducting medium and method of calibrating such a device. US patent US20160238646 A1; filed February 17th, 2016; published August 18th, 2017.
11. Бирюков С. В., Королева М. А. Электроиндукционный дисковый датчик напряженности электрического поля // Динамика систем механизмов и машин. 2017. Т. 5, № 4. С. 177–182. DOI: 10.25206/2310-9793-2017-5-4-177-182.
12. 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–P. 012017-8. DOI: 10.1088/1742-6596/944/1/012017.
13. Пат. 177779 Российская Федерация, МПК G 01 R 29/12. Датчик напряженности электрического поля / Бирюков С. В., Данышина В. В., Эйсмонт Н. Г. № 2017131988; заявл. 12.09. 17; опубл. 12.03. 18, Бюл. № 8.
14. Benenson W., Harris J. W., Stöcker H. [et al.]. Handbook of Physics. New York [etc.]. Springer, 2002. 1181 p. ISBN 0-387-95269-1.

БИРЮКОВ Сергей Владимирович, доктор технических наук, профессор (Россия), профессор кафедры физики Омского государственного технического университета, г. Омск.

SPIN-код: 9384-0078

ORCID: 0000-0002-1362-9911

AuthorID (SCOPUS): 7006438919

Адрес для переписки: sbiryukov154@mail.ru

Для цитирования

Бирюков С. В. Исследование электроиндукционного дискового датчика напряженности электрического поля // Омский научный вестник. 2023. № 2 (186). С. 134–139. DOI: 10.25206/1813-8225-2023-186-134-139.

Статья поступила в редакцию 09.01.2023 г.

© С. В. Бирюков

STUDY OF ELECTROINDUCTIVE DISK SENSOR OF ELECTRIC FIELD STRENGTH

Tasks related to the protection of biological and technical objects from the effects of electrical are relevant. One of these tasks is related to the development of electric field strength sensors with specified metrological characteristics. The aim of the study is to minimize the error of the known sensor and expand its spatial measurement range due to the rational choice of sensitive elements. The sensor proposed in the work has a negative error δ from the field inhomogeneity modulo no more than 3 % in the spatial measurement range $0 \leq a \leq R$, where R is the radius of the disk base of the sensor. To ensure the required metrological characteristics of the sensor, rational dimensions of its sensitive elements are selected. In this case, the rational radius r of the sensing elements made in the shape of a circle must satisfy the condition $r < R$, i.e. it must be less than the radius R of the disk base of the sensor. If this condition is met, a smaller radius r of the sensing element will correspond to a smaller error δ from the inhomogeneity of the field and a larger spatial measurement range. In comparison with known sensors, with the same error, the proposed sensor has a spatial measurement range approximately five times larger. This approach to the selection of sensitive elements allows us to design sensors with the best metrological characteristics.

Keywords: electric field, homogeneous field, inhomogeneous field, point source, intensity, disk sensor, error from field inhomogeneity, electrometric measurements.

References

1. Yurkevich V. M., Kondrat'yev B. L. O metodike izmereniya napryazhennosti i drugikh kharakteristik elektricheskogo polya [On the methodology for measuring electric field strength and other characteristics] // *Izmeritel'naya tekhnika. Measuring Instruments*. 1980. No. 5. P. 57–59. (In Russ.).
2. Chugunov S. A., Yurkevich V. M. Rasshirenije zony izmereniya parametrov elektricheskogo polya pri primenenii zondovogo metoda [Extension of the electric field measurement area when using the probe method] // *Izmeritel'naya tekhnika. Measuring Instruments*. 1981. No. 1. P. 33–35. (In Russ.).
3. Klimashevskiy I. P., Kondrat'yev B. L., Poletayev V. A. [et al.]. Izmeritel' vektora napryazhennosti elektricheskogo polya vysokovol'nogo oborudovaniya. [Tension vector meter an electric field for high-voltage equipment] // *Izmeritel'naya tekhnika. Measuring Instruments*. 1983. No. 1. P. 48–49. (In Russ.).
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. International Conference on Large High Voltage Electric Systems, Report 36-06, Session 27th August-4th September. Paris. 1986. 5 p. (In Engl.).
5. Biryukov S. V. Teoriya i praktika postroyeniya elektroinduktsionnykh datchikov potentsiala i napryazhennosti elektricheskogo polya [Theory and practice of building electrical and inductive sensors for potential and electric field strength] // *Omskiy nauchnyy vestnik. Omsk Scientific Bulletin*. 2000. Issue 11. P. 89–93. (In Russ.).
6. Berent G. N., Plays I. R. Electric Field sensor // *Instruments for Scientific Research*. 1971. Vol. 6. P. 141–142. (In Engl.).
7. Misakian M., Kotter F. R., Kahler R. L. Miniature ELF Electric Field Probe // *Instruments for Scientific Research*. 1978. Vol. 7. P. 933–935. (In Engl.).
8. Steward M. F. Electric field measurement system. US patent 5315232; filed January 3rd, 1991; published May 24th, 1994. (In Engl.).
9. Beasley W. H., Byerley L. G., Swenson J. A. [et al.]. Low power, low maintenance. Electric-field meter. US patent US006984971B1; filed March 14th, 2002; published January 10th, 2006. (In Engl.).
10. Baicry M., Prado M. Device for measuring an electric field in a conducting medium and method of calibrating such a device. US patent US20160238646 A1; filed February 17th, 2016; published August 18th, 2017. (In Engl.).
11. Biryukov S. V., Koroleva M. A. Elektroinduktsionnyy diskovyy datchik napryazhennosti elektricheskogo polya [Electroinductive disc sensor for electric field strength] // *Dinamika sistem mekhanizmov i mashin. Dynamics of Mechanism and Machine*. 2017. Vol. 5, no. 4. P. 177–182. DOI: 10.25206/2310-9793-2017-5-4-177-182. (In Russ.).
12. 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–P. 012017-8. DOI: 10.1088/1742-6596/944/1/012017. (In Engl.).
13. Patent No. 177779 Russian Federation, IPC G 01 R 29/12. Datchik napryazhennosti elektricheskogo polya [Electric field strength sensor] / Biryukov S. V., Dan'shina V. V., Eysmont N. G. No. 2017131988. (In Russ.).
14. Benenson W., Harris J. W., Stöcker H. [et al.]. Handbook of Physics. New York [etc.]: Springer, 2002. 1181 p. ISBN 0-387-95269-1. (In Engl.).

BIRYUKOV Sergey Vladimirovich, Doctor of Technical Sciences, Professor, Professor of Physics Department, Omsk State Technical University, Omsk.
SPIN-code: 9384-0078
ORCID: 0000-0002-1362-9911
AuthorID (SCOPUS): 7006438919
Correspondence address: sbiryukov154@mail.ru

For citations

Biryukov S. V. Study of electroinductive disk sensor of electric field strength // *Omsk Scientific Bulletin*. 2023. No. 2 (186). P. 134–139. DOI: 10.25206/1813-8225-2023-186-134-139.

Received January 09, 2023.

© S. V. Biryukov