

ЭЛЕКТРОНИКА, ФОТОНИКА, ПРИБОРОСТРОЕНИЕ И СВЯЗЬ

УДК 621.317.328
DOI: 10.25206/1813-8225-2022-182-93-101

С. В. БИРЮКОВ¹
Л. В. ТЮКИНА¹
А. В. ТЮКИН²

¹Омский государственный
технический университет,
г. Омск

²Сибирский государственный
автомобильно-дорожный университет,
г. Омск

ИЗМЕРИТЕЛЬНЫЕ ЦЕПИ СДВОЕННЫХ ЭЛЕКТРОИНДУКЦИОННЫХ СФЕРИЧЕСКИХ ДАТЧИКОВ НАПРЯЖЕННОСТИ ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ПОЛЯ ЗАМКНУТОЙ КОНФИГУРАЦИИ

Для контроля уровней электрических полей, необходимы датчики напряженности электрического поля. В настоящее время для этих целей наиболее перспективными являются сдвоенные электроиндукционные датчики, представляющие собой конструктивное объединение двух двойных датчиков в одно целое. Известны два типа сдвоенных датчиков с накладными и составными чувствительными элементами. Выходными сигналами таких датчиков являются такие электрические параметры, как заряд, ток и напряжение. Как показали исследования, наибольшим преимуществом обладает электрический заряд. Для снятия заряда с датчика рекомендовано использовать в качестве первичной измерительной цепи интегратор тока (усилитель заряда). Вторичные измерительные цепи рассмотренных в работе сдвоенных датчиков служат для усреднения сигналов двойных датчиков с целью снижения погрешности от неоднородности ЭП и формирования выходного сигнала пропорционального напряженности поля. В работе установлено, что датчики с накладными и составными чувствительными элементами позволяют воспринимать на-

пряженность неоднородного ЭП с погрешностью, не превышающей +4,6 % в пространственном диапазоне измерений $0 \leq a \leq 1$. В работе также определены чувствительности двух типов сдвоенных датчиков напряженности электрического поля.

Ключевые слова: напряженность электрического поля, датчик напряженности электрического поля, одинарный датчик, двойной датчик, сдвоенный датчик, первичные измерительные цепи датчиков, погрешность от неоднородности поля, чувствительность датчика.

Введение. Измерение параметров электрических полей (ЭП) возникает во многих областях науки и техники, таких как электроэнергетика, приборостроение, машиностроение, в электронной и радиотехнической промышленности. Большинство известных методов и средств измерений параметров низкочастотных ЭП основано на явлении электростатической индукции. Датчики, основанные на явлении электростатической индукции, называются электроиндукционными. Известные электроиндукционные сферические датчики двойного типа имеют предельно возможную погрешность восприятия напряженности электрического поля (НЭП) от 5 % до 20 % [1–4]. В настоящее время на смену известным датчикам приходят электроиндукционные сферические датчики нового поколения, к которым отнесены датчики сдвоенного типа [5–7]. В отличие от двойных датчиков, имеющих в своем составе два одинарных, сдвоенные датчики состоят из двух двойных. При этом новый метод измерений НЭП сдвоенным датчиком [8, 9] отличается от метода измерений двойным датчиком. Особенность нового метода измерений НЭП сдвоенным датчиком заключается в одновременном измерении НЭП E_1 и E_2 двойными датчиками, входящими в состав сдвоенного датчика и определении искомого значения напряженности ЭП как среднее значение из них $E = (E_1 + E_2)/2$. При реализации нового метода измерений требуется новый алгоритм обработки сигналов сдвоенного датчика, а следовательно, новые измерительные цепи и алгоритмы их градуировки.

В связи с этим разработка измерительных цепей и алгоритмов градуировки сдвоенных сферических датчиков НЭП является целью данной работы.

Постановка задачи. В связи с вышесказанным необходимо решить следующие задачи:

- 1) исследовать существующие двойные электроиндукционные сферические датчики НЭП и их выходные сигналы и измерительные цепи;
- 2) на основании проведенных исследований предложить создание новых измерительных цепей и алгоритмы градуировки сдвоенных сферических датчиков НЭП;
- 3) оценить погрешности сдвоенных датчиков с новыми измерительными цепями и их чувствительность.

Теория. Для построения средств измерения напряженности низкочастотных ЭП используются электроиндукционные датчики, на чувствительных элементах которых индуцируются электрические заряды, пропорциональные НЭП. Естественными выходными сигналами датчика является электрический заряд $q(t)$, индуцированный на чувствительном элементе, электрический ток короткого замыкания $i_{кз}(t)$ (ток электрического смещения) и напряжение холостого хода $u_{хх}(t)$ (разность потенциалов) между проводящим основанием датчика и его чувствительным элементом. Непосредственное снятие с датчика естественных выходных сигналов затруднено, по-

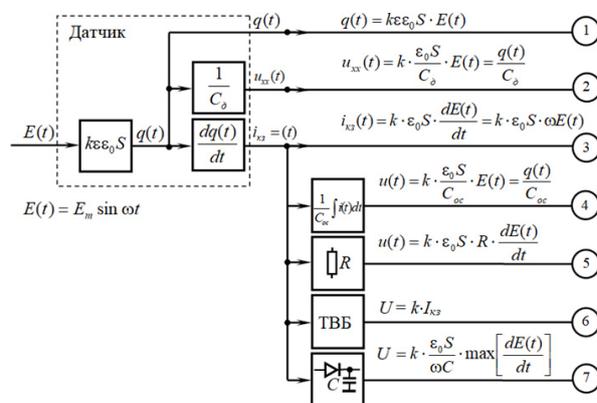


Рис. 1. Структурная схема датчика и его входных измерительных цепей

этому прибегают к преобразованию этих сигналов в удобно снимаемые сигналы с помощью входных измерительных цепей. Цепочка возможных преобразований электрических зарядов датчика в его выходные сигналы представлена в виде структурной схемы на рис. 1.

Такое многообразие возможных выходных сигналов датчика затрудняет правильный их выбор. Проанализируем естественные выходные сигналы датчика и дадим рекомендации по выбору каждого из них.

Первичным выходным сигналом датчика является индуцированный полем электрический заряд (выход 1, см. рис. 1)

$$q(t) = k\epsilon\epsilon_0 S \cdot E(t), \quad (1)$$

где k — коэффициент, определяемый формой и размерами чувствительного элемента датчика; S — площадь чувствительного элемента; ϵ и ϵ_0 — диэлектрическая проницаемость среды и диэлектрическая постоянная соответственно; $E(t)$ — измеряемая напряженность ЭП.

Вторичными выходными сигналами датчика являются напряжение холостого хода $u_{хх}$ и электрический ток короткого замыкания $i_{кз}$ (выходы 2 и 3, см. рис. 1). Напряжение $u_{хх}$ (разность потенциалов) формируется между чувствительным элементом и сферическим корпусом датчика и определяется выражением

$$u_{хх}(t) = k \cdot \frac{\epsilon_0 S}{C_g} \cdot E(t) = \frac{q(t)}{C_g}, \quad (2)$$

где C_g — электрическая емкость между чувствительным элементом и сферическим корпусом датчика. Электрический ток короткого замыкания $i_{кз}$ формируется при замыкании чувствительного элемента датчика на его корпус

$$i_{кс}(t) = k \cdot \varepsilon_0 S \cdot \frac{dE(t)}{dt} = k \cdot \varepsilon_0 S \cdot \omega E(t). \quad (3)$$

К выходным сигналам электроиндукционно-го датчика, определяемым выражениями (1)–(3), необходимо предъявить два требования. Первое требование определяется особенностями конструктивного исполнения сферического датчика, заключающимися в том, что его чувствительные элементы должны быть эквипотенциальны с корпусом (режим к.з.), а сам датчик представлять единую эквипотенциальную сферическую поверхность. Такой датчик относится к датчикам замкнутого типа. Второе требование определяется метрологическими особенностями выходных сигналов датчика (1)–(3), в состав которых должно входить как можно меньше источников погрешности.

Из анализа выражений (1)–(3) следует, что электрический заряд $q(t)$ и напряжение $u_{xx}(t)$ пропорциональны напряженности ЭП $E(t)$ и могут быть использованы для его измерения. Электрический заряд $q(t)$ не привязан к выполнению требований, предъявляемых к датчику. Использование напряжения $u_{xx}(t)$ в качестве выходного сигнала датчика нарушает оба требования, предъявляемые к датчику. Первое требование нарушается использованием для снятия $u_{xx}(t)$ с датчика входных цепей с большим входным импедансом, что исключает эквипотенциальность чувствительных элементов и корпуса датчика, а второе — зависимостью $u_{xx}(t)$ от емкости C_g (см. выражение 2) между чувствительным элементом и корпусом датчика с технологическим разбросом до $\pm 20\%$. В свою очередь, электрический ток $i_{кс}(t)$ пропорционален скорости измерения напряженности ЭП $dE(t)/dt$ и при гармоническом изменении $E(t)$ может быть также использован для его измерения. Однако токовый выходной сигнал датчика позволяет выполнить первое требование, предъявляемое к датчику, т.к. при его измерении требуются устройства с малым входным импедансом, но не позволяет выполнить второе требование, поскольку в выходном токовом сигнале (3) присутствует круговая частота изменения ЭП ω . В промышленных электротехнических системах (ЛЭП, подстанции) частота поля не постоянна. Она может изменяться в пределах до $\pm (1...5)$ Гц [10], а это будет приводить к дополнительной погрешности измерения.

Из проведенного анализа следует, что электрический заряд из-за своей независимости от емкости чувствительных элементов относительно корпуса датчика и частоты поля, с метрологической точки зрения, наиболее подходит в качестве выходного сигнала датчика. Кроме того, электрический заряд, в отличие от тока, не взвешен с номером гармоник, поэтому его использование для измерения НЭП будет давать более точный результат. Однако непосредственное измерение электрического заряда с чувствительных элементов датчика технически проблематично. Эту проблему можно решить интегрированием электрического тока $i_{кс}(t)$ с помощью интегратора тока [11–15] и получить напряжение $u(t)$, пропорциональное электрическому заряду $q(t)$ (выход 4, см. рис. 1)

$$u(t) = k \cdot \frac{\varepsilon_0 S}{C_{oc}} \cdot E(t) = \frac{q(t)}{C_{oc}}, \quad (4)$$

где C_{oc} — емкость обратной связи интегратора тока.

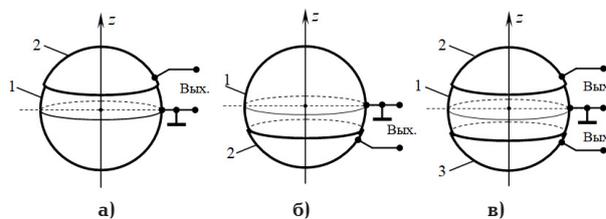


Рис. 2. Электроиндукционные сферические датчики: а) одинарный, с верхним расположением чувствительного элемента; б) одинарный, с нижним расположением чувствительного элемента; в) двойной, с верхним и нижним расположением чувствительных элементов

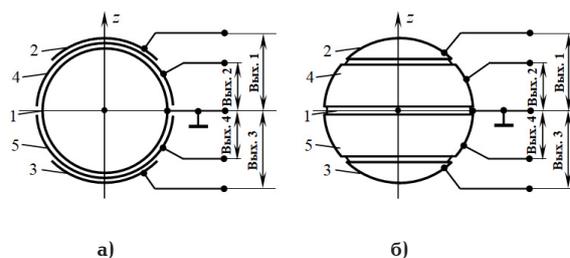


Рис. 3. Сдвоенные электроиндукционные сферические датчики:

- а) датчик с накладными чувствительными элементами;
б) датчик с составными чувствительными элементами

Интеграторы тока (усилители заряда) обладают малым входным импедансом, что способствует удовлетворению первого требования (обеспечение режима к.з.), предъявляемого к входным цепям датчика. Кроме этого, сигнал выходного напряжения $u(t)$ интегратора тока не зависит от частоты ЭП и емкости C_g датчика, определяющих дополнительную погрешность, что обеспечивает удовлетворение второго требования к входным цепям датчика. Следовательно, интегратор тока будет являться согласующим звеном (первичной входной измерительной цепью) между чувствительными элементами датчика и электрической схемой обработки его сигналов.

Продолжая анализировать структурную схему датчика и его входных измерительных цепей (см. рис. 1), можно заключить, что сигналы с выходов 5–7 структурной схемы являются производными от сигналов с выходов 1–4 и описаны в работах [16–18], поэтому здесь мы на них не останавливаемся.

Одинарные, двойные и сдвоенные электроиндукционные сферические однокоординатные датчики замкнутой конфигурации. Конструктивно датчики состоят из проводящего сферического основания 1 (рис. 2 и рис. 3), служащего общей шиной для измерительных цепей и четырех чувствительных элементов 2–5, изолированных друг от друга и от сферического основания.

Одинарные, двойные и сдвоенные датчики относятся к датчикам разных типов. Так, одинарные датчики относятся к датчикам первого типа, двойные — к датчикам второго типа, а сдвоенные датчики — к датчикам третьего типа. Сдвоенные датчики были предложены авторами статьи и отнесены к датчикам нового типа.

Одинарные датчики (см. рис. 2а, б) имеют на одной координатной оси по одному чувствительному элементу 2. У них вторым чувствительным элемен-

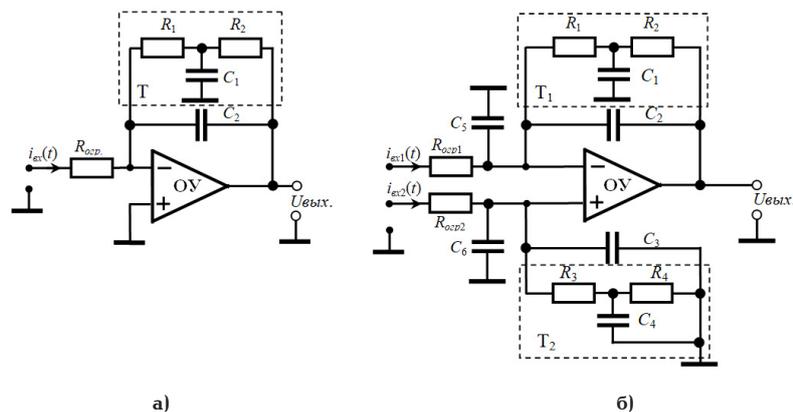


Рис. 4. Одинарный (а) и дифференциальный (б) интеграторы тока (усилитель заряда)

том служит проводящее сферическое основание 1. Такие датчики асимметричны и не позволяют исключить из выходного сигнала синфазную составляющую помехи, что приводит к дополнительной погрешности. Двойные датчики (см. рис. 2в) состоят из двух одинарных и имеют на одной координатной оси два диаметрально расположенных чувствительных элемента 2 и 3. Они симметричны относительно основания 1 и позволяют в дифференциальном включении значительно уменьшить синфазную составляющую помехи в выходном сигнале. Сдвоенные датчики (см. рис. 3а, б) состоят из двух двойных датчиков, расположенных на одной координатной оси и объединённых в единое целое. Так, на рис. 3а представлен первый вид сдвоенного датчика с накладными чувствительными элементами, первый двойной датчик которого состоит из элементов 2 и 3, а второй двойной датчик из элементов 4 и 5. На рис. 3б представлен второй вид сдвоенного датчика с составными чувствительными элементами, у которого первый двойной датчик состоит из элементов 2 и 3, а второй двойной датчик — из элементов (2+4) и (3+5).

Чувствительные элементы обоих видов датчиков выполняются в общем случае в форме сферических сегментов (элементы 2 и 3 на рис. 2 и рис. 3), а в частном — в форме полусфер (элементы 4 и 5 на рис. 3а) или их частей — сферических слоев (элементы 4 и 5 на рис. 3, б).

Толщина чувствительных элементов и расстояние между их слоями и проводящим сферическим основанием датчика составляет менее 0,1 мм. Сферическое основание и чувствительные элементы выполняются из проводящих материалов с высокой электропроводностью, таких как серебро, медь и др.

Первичные измерительные цепи одинарных и двойных датчиков. Из теории следует целесообразность использования в качестве первичной измерительной цепи электроиндукционного датчика интегратор тока (усилитель заряда), формирующий на своем выходе напряжение пропорциональное индуцированному электрическому заряду (см. выражение 4), а следовательно, и измеряемой напряженности ЭП $E(t)$. Для снятия индуцированного электрического заряда с каждого чувствительного элемента одинарного датчика можно использовать активный интегратор тока с одним входом [11–15], представленный на рис. 4а.

Основным элементом интегратора тока является емкость обратной связи операционного усилителя

(ОУ) $C_{oc} = C_2$, все остальные элементы служат для стабильной работы ОУ по постоянному току. Так, Т-образная цепочка, состоящая из элементов R_1 , R_2 ($R_1 = R_2 > 1$ МОм) и C_1 ($C_1 > 0,05$ мкФ), обеспечивает режим работы ОУ по постоянному току, а ограничивающее сопротивление $R_{огр} > 100$ кОм обеспечивает защиту входной цепи ОУ по току. Для снятия разности индуцированных зарядов с чувствительных элементов, расположенных на одной координатной оси двойного датчика, целесообразно использовать активный интегратор тока с двумя входами [14] в дифференциальном включении, представленный на рис. 4б.

Назначение элементов интегратора тока с двумя входами аналогично предыдущему интегратору. В качестве интегрирующих емкостей здесь используются емкости $C_2 = C_3$. А Т-образные цепочки T_1 и T_2 имеют одинаковые и равные по значению элементы. Емкости C_5 и C_6 служат для исключения технологического разброса емкостей датчика, образованных между чувствительными элементами и корпусом датчика [19].

Вторичные измерительные цепи сдвоенных датчиков. Поскольку сдвоенные датчики состоят из двух двойных, то их первичные измерительные цепи могут быть составлены из двух одинарных интеграторов тока (см. рис. 4а) и сумматора или могут быть использованы дифференциальные интеграторы тока (см. рис. 4б).

Вторичные измерительные цепи сдвоенного датчика предназначены для дальнейшего преобразования выходных сигналов двойных датчиков и доведения их, руководствуясь новым методом измерений [8, 9], до единого выходного сигнала сдвоенного датчика, пропорционального измеряемой напряженности ЭП. Исходя из конструктивных решений, описанных выше, сдвоенных датчиков, (см. рис. 3а, б) их вторичные измерительные цепи будут незначительно отличаться алгоритмом работы. Поэтому разделим вторичные измерительные цепи на две группы.

Первая группа вторичных измерительных цепей. Алгоритм работы вторичной измерительной цепи сдвоенного датчика, представленного на рис. 3а (первый вид сдвоенного датчика) [7], реализован структурной схемой измерительной цепи, представленной на рис. 5.

Работа устройства со сдвоенным датчиком, построенного по структурной схеме, представленной на рис. 5, отличается от работы аналогичных

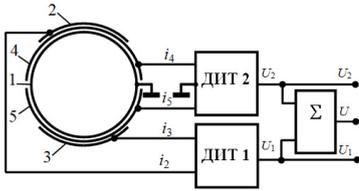


Рис. 5. Структурная схема вторичной измерительной цепи сдвоенного датчика первого вида

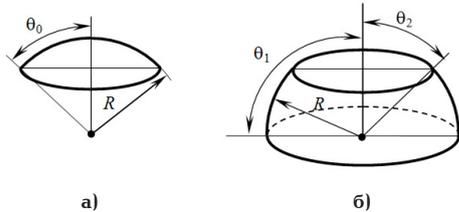


Рис. 6. Формы чувствительных элементов: а) сферический сегмент; б) сферический слой

устройств с двойными датчиками, поэтому в данной статье рассмотрим их работу подробнее.

Для удобства рассмотрения работы устройства представим на рис. 6 формы чувствительных элементов сдвоенного датчика и обозначим их угловые размеры и далее примем, что ЭП однородно и изменяется по закону

$$E_0(t) = E_m \sin \omega t. \quad (5)$$

Под действием этого поля на чувствительных элементах сдвоенного датчика, выполненных в форме сферического сегмента, индуцируются изменяющиеся во времени электрические заряды, определяемые выражением

$$q(t) = \mp 3\pi \epsilon R^2 \sin^2 \theta_0 \cdot E_0(t), \quad (6)$$

где в выражении (6) «-» и «+» соответствуют зарядам, индуцированным на верхнем и нижнем чувствительном элементе датчика (рис. 5) при направлении ЭП на верхний чувствительный элемент; ϵ — диэлектрическая проницаемость среды, в которую помещают датчик; R — радиус сферического основания датчика; θ_0 — угловой размер сферического сегмента ($0 < \theta_0 \leq 90^\circ$).

Изменяющиеся во времени электрические заряды создают электрические токи короткого замыкания между чувствительными элементами и проводящим основанием датчика, определяемые выражением

$$i_{кз}(t) = \frac{dq(t)}{dt}. \quad (7)$$

Величины этих токов, согласно выражению (6), будут определяться выражением

$$i_{2,3,4,5}(t) = \mp 3\pi \epsilon \omega \cdot R^2 \sin^2 \theta_0 \cdot E_0(t), \quad (8)$$

где i_2 и i_3 — соответствуют токам второго и третьего чувствительного элемента ($\theta_0 < 90^\circ$), а i_4 и i_5 — соответствуют токам четвертого и пятого чувствительного элемента ($\theta_0 = 90^\circ$); ω — угловая частота из-

мерения ЭП; $E_0(t) = E_m \cos \omega t$, т.е. электрические токи повернуты по фазе на 90° по отношению к зарядам.

Выражение (8) справедливо для однородного поля. Однако реальные поля в большей части неоднородны, поэтому выражение (8) должно быть умножено на коэффициент, определяемый параметрами неоднородного поля. С учетом сказанного для датчика, находящегося в неоднородном поле, можно записать

$$i_{2,3,4,5}(t) = \mp 3k_{2,3} \pi \epsilon \omega R^2 \sin^2 \theta_0 \cdot E_0(t), \quad (9)$$

где $k_{2,4} = 1 + \delta_{2,4}$ и $k_{3,5} = 1 + \delta_{3,5}$ — коэффициенты для чувствительных элементов 2 и 3, 4 и 5; Эти коэффициенты определяются параметрами поля и конструктивными параметрами датчика; δ_2, δ_3 ($\theta_0 < 90^\circ$) и δ_4, δ_5 ($\theta_0 = 90^\circ$) — погрешности одинарных датчиков, вызванные неоднородностью ЭП, соответствующие верхнему и нижнему чувствительным элементам.

Целесообразнее всего рассматривать поведение датчика в сильно неоднородном поле. Таким полем, удобным для моделирования, может являться ЭП точечного заряда, позволяющего моделировать поля от однородного до сильно неоднородного. При рассмотрении одинарных датчиков в таком поле погрешности δ_2, δ_3 и δ_4, δ_5 от неоднородности поля будут определяться выражениями [20]:

$$\delta_{2,3} = \left[\frac{\frac{1+a}{2a^2 \sin^2 \frac{\theta_0}{2}} \cdot \left(1 - \frac{1-a}{\sqrt{1-2a \cos \theta_0 + a^2}} \right) - \frac{1}{a}}{3 \cos^2 \frac{\theta_0}{2}} - 1 \right] \cdot 100; \quad (10)$$

$$\delta_{4,5} = \left[\frac{\frac{1-a}{2a^2 \sin^2 \frac{\theta_0}{2}} \cdot \left(1 - \frac{1+a}{\sqrt{1+2a \cos \theta_0 + a^2}} \right) + \frac{1}{a}}{3 \cos^2 \frac{\theta_0}{2}} - 1 \right] \cdot 100. \quad (11)$$

Для двойных датчиков, входящих в состав сдвоенного датчика, погрешности $\delta_{2,3}$ и $\delta_{4,5}$ от неоднородности поля будут определяться выражениями [20]

датчик по рис. 3а:

— для диаметрально противоположных чувствительных элементов 2, 3 ($\theta_0 \geq 45^\circ$ — сферический сегмент) и 4, 5 ($\theta_0 \leq 90^\circ$ — полусфера)

$$\delta_{2,3,4,5} = \left[\frac{\frac{1}{3a^2 \sin^2 \theta_0} \times \left(2 - \frac{1-a^2}{\sqrt{1-2a \cos \theta_0 + a^2}} - \frac{1-a^2}{\sqrt{1+2a \cos \theta_0 + a^2}} \right) - 1}{\times} \right] \cdot 100. \quad (12)$$

Электрические токи i_2, i_3 и i_4, i_5 , генерируемые однородным ЭП на выходах сдвоенного датчика и определяемые выражениями (8), попарно посту-

пают на соответствующие входы первого и второго дифференциальных интеграторов тока (ДИТ), на выходах которых формируются напряжения $U_1(t)$ и $U_2(t)$, пропорциональные напряженности $E_0(t)$ ЭП,

$$U_1(t) = \frac{1}{C_{oc1}} \int \Delta i_1(t) dt = \frac{1}{C_{oc1}} \int [i_2(t) - i_3(t)] dt = \frac{6\pi\epsilon R^2 \sin^2 \theta_0}{C_{oc1}} \cdot E_0(t) = G_1 \cdot E_0(t); \quad (13)$$

$$U_2(t) = \frac{1}{C_{oc2}} \int \Delta i_2(t) dt = \frac{1}{C_{oc2}} \int [i_4(t) - i_5(t)] dt = \frac{6\pi\epsilon R^2 \sin^2 \theta_0}{C_{oc2}} \cdot E_0(t) = G_2 \cdot E_0(t), \quad (14)$$

где $U_1(t)$ и $U_2(t)$ — выходные напряжения первого и второго двойных датчиков, входящих в состав сдвоенного датчика; G_1 и G_2 — чувствительности первого и второго двойных датчиков, определяемые конструктивными параметрами датчика и параметрами ДИТ. В соответствии с используемым методом измерений НЭП по среднему значению [8, 9] выходные напряжения $U_1(t)$ и $U_2(t)$ ДИТ суммируются сумматором Σ с коэффициентом суммирования $1/2$. Тогда выходное напряжение сумматора Σ , а следовательно, и сдвоенного датчика, определится как

$$U(t) = \frac{1}{2} [U_1(t) + U_2(t)] = \frac{G_1 + G_2}{2} \cdot E_0(t). \quad (15)$$

Для нормального функционирования сдвоенного датчика в неоднородном поле необходимо, чтобы в однородном поле выполнялось условие $U_1(t) = U_2(t)$ при одной и той же напряженности $E_0(t)$. Для этого необходимо произвести регулировку чувствительностей G_1 (если $G_1 < G_2$) или G_2 (если $G_2 < G_1$) сдвоенного датчика в однородном поле при одной и той же напряженности $E_0(t)$. Этим добиваются на выходах первого и второго дифференциальных интеграторов тока ДИТ 1 и ДИТ 2 равенства напряжений $U_1(t) = U_2(t)$. В этом случае будет выполняться условие $G_1 = G_2 = G$, где $G = \frac{G_1 + G_2}{2} = G_1 = G_2$. Тогда выходное напряжение $U(t)$ измерительной цепи сдвоенного датчика, определяемое выражением (15), будет равно

$$U(t) = G \cdot E_0(t). \quad (16)$$

В результате выходное напряжение $U(t)$ измерительной цепи сдвоенного датчика будет пропорционально среднему значению НЭП $E(t) = [E_1(t) + E_2(t)]/2$, между значениями $E_1(t)$ и $E_2(t)$, измеренными первым и вторым двойными датчиками, входящими в состав сдвоенного датчика.

Алгоритм нахождения НЭП по среднему значению напряженности, определенных одновременно двумя двойными датчиками, входящими в состав сдвоенного датчика, позволяет значительно уменьшить погрешность измеряемой напряженности неоднородного ЭП. Теоретическое обоснование используемого алгоритма обработки сигналов сдвоенного датчика сводится к тому, что двойные датчики в его составе имеют противоположные по знаку погрешности от неоднородности ЭП. Так, НЭП $E_1(t)$, измеряемая двойным датчиком с чувствительными элементами 2-3, имеет положительную погрешность,

а напряженность $E_2(t)$, измеряемая двойным датчиком с чувствительными элементами 4-5, имеет отрицательную погрешность. С учетом этого для $E_1(t)$ и $E_2(t)$ можно записать как

$$E_1(t) = E_0(t)(1 + |\delta_{2,3}|) \text{ и } E_2(t) = E_0(t)(1 - |\delta_{4,5}|). \quad (17)$$

Тогда среднее значение НЭП определится как

$$E(t) = \frac{E_1(t) + E_2(t)}{2} = \frac{E_0(t)(1 + |\delta_{2,3}|) + E_0(t)(1 - |\delta_{4,5}|)}{2} = E_0(t) \left(1 + \frac{|\delta_{2,3}| - |\delta_{4,5}|}{2} \right) = E_0(t)(1 + \delta), \quad (18)$$

где погрешность сдвоенного датчика

$$\delta = \frac{|\delta_{2,3}| - |\delta_{4,5}|}{2}. \quad (19)$$

Таким образом, используемый алгоритм обработки сигналов двойных датчиков сводит погрешность сдвоенного датчика к погрешности, равной половине разности погрешностей двойных датчиков.

Вторая группа вторичных измерительных цепей. Рассмотрим алгоритм работы вторичной измерительной цепи сдвоенного датчика (рис. 3б). Датчик состоит из двух пар элементов 2, 3 и 4, 5 соответственно. Элементы первой пары являются чувствительными элементами 2, 3, выполненными в форме сферических сегментов, а элементы второй пары 4, 5, выполненные в форме сферического слоя, входят в состав второй пары составных чувствительных элементов 2+4 и 3+5. Такой датчик представляет собой датчик с составными чувствительными элементами [6].

Структурная схема вторичной измерительной цепи сдвоенного датчика с составными чувствительными элементами представлена на рис. 7.

Вторичная измерительная цепь со сдвоенным датчиком с составными чувствительными элементами, построенная по структурной схеме рис. 7, отличается от вторичных измерительных цепей, построенных по структурной схеме рис. 5 дополнительным сумматором 2, объединяющим заряды с чувствительных элементов 2, 4 и 3, 5. В этом случае чувствительные элементы 2, 4 и 3, 5 объединяются из составных частей и будут представлять собой единое целое. Вкратце рассмотрим работу устройства, построенного по структурной схеме рис. 7.

Под действием однородного ЭП на чувствительных элементах сдвоенного датчика индуцируются изменяющиеся во времени электрические заряды, определяемые:

— для чувствительных элементов 2 и 3 в форме сферического сегмента выражением (8)

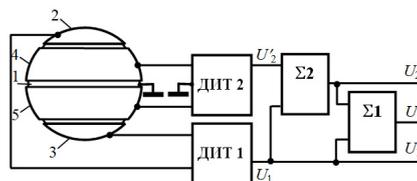


Рис. 7. Структурная схема вторичной измерительной цепи сдвоенного датчика с составными чувствительными элементами

— для чувствительных элементов 4 и 5 в форме сферического слоя

$$q(t) = \mp 3\pi\epsilon R^2 \sin(\theta_1 - \theta_2) \cdot \sin(\theta_1 + \theta_2) \cdot E_0(t), \quad (20)$$

где в выражении (20) «-» и «+» — соответствуют зарядам, индуцированным на верхнем и нижнем чувствительном элементе датчика (см. рис. 7) при направлении ЭП на верхний чувствительный элемент; ϵ — диэлектрическая проницаемость, в которую помещают датчик; R — радиус сферического основания датчика; θ_1 и θ_2 — внешний и внутренний угловые размеры сферического слоя (см. рис. 6).

Изменяющиеся во времени электрические заряды (20) создают электрические токи короткого замыкания (7) между чувствительными элементами и проводящим основанием датчика. Величины этих токов, согласно выражению (6), будут определяться

— для чувствительных элементов 2 и 3 в форме сферического сегмента выражением (8);

— для чувствительных элементов 4 и 5 в форме сферического слоя

$$i_{4,5}(t) = \mp 3\pi\epsilon R^2 \sin(\theta_1 - \theta_2) \cdot \sin(\theta_1 + \theta_2) \cdot E_0(t). \quad (21)$$

$$\delta_4 = \left[\frac{\frac{(1-a^2)}{2a \sin \frac{\theta_1 - \theta_2}{2} \cdot \sin \frac{\theta_1 + \theta_2}{2}}{3 \cos \frac{\theta_1 - \theta_2}{2} \cdot \cos \frac{\theta_1 + \theta_2}{2}} \cdot \left(\frac{1}{\sqrt{1-2a \cos \theta_2 + a^2}} - \frac{1}{\sqrt{1-2a \cos \theta_1 + a^2}} \right) - \frac{1}{a}}{-1} \right] \cdot 100; \quad (24)$$

$$\delta_5 = \left[\frac{\frac{(1-a^2)}{2a \sin \frac{\theta_1 - \theta_2}{2} \cdot \sin \frac{\theta_1 + \theta_2}{2}}{3 \cos \frac{\theta_1 - \theta_2}{2} \cdot \cos \frac{\theta_1 + \theta_2}{2}} \cdot \left(\frac{1}{\sqrt{1+2a \cos \theta_2 + a^2}} - \frac{1}{\sqrt{1+2a \cos \theta_1 + a^2}} \right) + \frac{1}{a}}{-1} \right] \cdot 100, \quad (25)$$

где в формулах (24) и (25) $a=R/d$ — коэффициент, определяющий степень неоднородности ЭП; R — радиус сферического основания датчика; d — расстояние от центра сферического основания датчика до источника поля.

Для двойных датчиков, входящих в состав сдвоенного датчика, погрешности $\delta_{2,3}$ и $\delta_{4,5}$ от неоднородности поля будут определяться выражениями [20]

сдвоенный датчик по рис. 3б:

— для первого двойного датчика, состоящего из чувствительных элементов 2 и 3, выполненных в форме сферического сегмента с угловым размером $\theta_0 \leq 45^\circ$, погрешность от неоднородности поля определяется

$$\delta_{4,5} = \left[\frac{1-a^2}{3a^2 \sin(\theta_1 - \theta_2) \sin(\theta_1 + \theta_2)} \cdot \left(\frac{\frac{1}{\sqrt{1-2a \cos \theta_2 + a^2}} + \frac{1}{\sqrt{1+2a \cos \theta_2 + a^2}}}{-\frac{1}{\sqrt{1-2a \cos \theta_1 + a^2}} - \frac{1}{\sqrt{1+2a \cos \theta_1 + a^2}}} \right) - 1 \right] \cdot 100. \quad (27)$$

Тогда для второго двойного датчика, состоящего из составных чувствительных элементов 2+4

и 3+5, погрешность от неоднородности поля определяется

и 3+5, погрешность от неоднородности поля определяется

и 3+5, погрешность от неоднородности поля определяется

$$i_{2,3}(t) = \mp 3k_{2,3}\pi\epsilon\omega R^2 \sin^2 \theta_0 \cdot E_0(t); \quad (22)$$

— для чувствительных элементов в форме сферического сегмента

$$i_{4,5}(t) = \mp 3k_{4,5}\pi\epsilon R^2 \sin(\theta_1 - \theta_2) \cdot \sin(\theta_1 + \theta_2) \cdot E_0(t), \quad (23)$$

где $k_2=1+\delta_2$ и $k_3=1+\delta_3$ — коэффициенты для чувствительных элементов 2 и 3; $k_4=1+\delta_4$ и $k_5=1+\delta_5$ — коэффициенты для чувствительных элементов 4 и 5; δ_2, δ_3 — погрешности от неоднородности поля, определяемые выражениями (10) и (11); δ_4, δ_5 — погрешности от неоднородности поля для чувствительных элементов 4 и 5 в форме сферического слоя определяются выражениями

$$\delta_{2,3} = \left[\frac{\frac{1}{3a^2 \sin^2 \theta_0} \times \left(2 - \frac{1-a^2}{\sqrt{1-2a \cos \theta_0 + a^2}} - \frac{1-a^2}{\sqrt{1+2a \cos \theta_0 + a^2}} \right)}{-1} \right] \cdot 100; \quad (26)$$

— для диаметрально противоположных чувствительных элементов 4 и 5 в форме сферического слоя $\theta_1 \leq 90^\circ$ и $\theta_2 \geq 45^\circ$ погрешность от неоднородности поля определяется

$$\delta_{2+4,3+5} = \frac{\delta_{2,3} + \delta_{4,5}}{2} = \left[\frac{1}{3a^2 \sin^2 \theta_1} \cdot \left(2 - \frac{1-a^2}{\sqrt{1-2a \cos \theta_1 + a^2}} - \frac{1-a^2}{\sqrt{1+2a \cos \theta_1 + a^2}} \right) - 1 \right] \cdot 100. \quad (28)$$

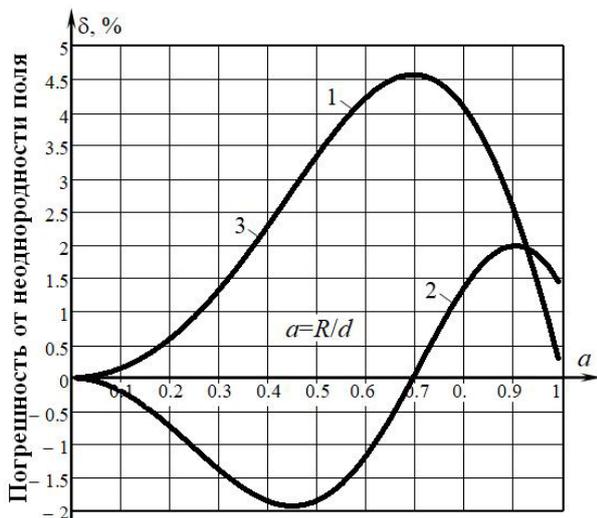


Рис. 8. Графики погрешностей трех видов сдвоенных датчиков: графики 1 и 3 — первый и третий вид датчика; график 2 — второй вид датчика

Оценка погрешностей и чувствительности сдвоенных датчиков с новыми измерительными цепями. Для оценки погрешностей сдвоенных датчиков от неоднородности ЭП воспользуемся выражениями погрешности сдвоенного датчика (19) и двойных датчиков (12) и (28), входящих в состав сдвоенного датчика.

Из анализа графиков погрешностей, представленных на рис. 8, следует, что сдвоенные датчики с накладными и составными чувствительными элементами, относящиеся соответственно к первому (график 1) и третьему (график 3) виду, имеют одинаковые максимальные погрешности, достигающие +4,6 % в максимально возможном пространственном диапазоне измерения $0 < \alpha \leq 1$. При этом угловые размеры накладных чувствительных элементов 2 и 3 датчика составляли $\theta_0 = 45^\circ$, а у 4 и 5 — $\theta_0 = 90^\circ$ и составных чувствительных элементов 2+4 и 3+5 датчика составляли — у элементов 2 и 3 $\theta_0 = 45^\circ$, а у элементов 4 и 5 $\theta_1 = 90^\circ$ и $\theta_2 \leq 45^\circ$.

Оценим чувствительности двух видов сдвоенных датчиков. В общем случае их чувствительность определится из выражения (23)

$$G = \frac{dU(t)}{dE(t)}. \quad (29)$$

С учетом того, что $G = G_1 = G_2$, где G_1 и G_2 — чувствительности первого и второго двойных датчиков, входящих в состав сдвоенного датчика. Т.к. у первого и второго вида датчиков (с накладными и составными чувствительными элементами) изначально чувствительность второго двойного датчика $G_2 > G_1$, а чувствительность первого двойного датчика G_1 только выравнивается с чувствительностью G_2 градуировкой, то за их результирующую чувствительность G в общем случае, исходя из выражения (13), можно принять

$$G = \frac{6\pi\epsilon R^2 \sin^2 \theta_1}{C_{\text{ос.}}}, \quad (30)$$

где $\theta_1 \approx 90^\circ$ — угловой размер чувствительных элементов второго двойного датчика.

Результаты исследований. Проведенные исследования выходных сигналов одинарных и двойных электроиндукционных датчиков НЭП показали, что естественными выходными сигналами датчиков могут выступать электрический заряд, электрический ток короткого замыкания и напряжение холостого хода. Однако, с метрологической точки зрения, наиболее подходящим выходным сигналом датчиков замкнутого типа является индуцированный ЭП на его чувствительных элементах электрический заряд. Снятие электрического заряда с чувствительных элементов обеспечивает, во-первых, их замкнутость на проводящее основание датчика, а во-вторых, исключает зависимость электрического заряда от частоты ЭП и его взвешенность, при наличии гармоник в ЭП, с номером гармоники. Снять электрический заряд с чувствительных элементов датчика возможно только с помощью интегратора тока (усилителя заряда), обеспечивающего за счет малого входного сопротивления замкнутость чувствительных элементов на проводящее основание и пропорциональность выходного напряжения индуцированному электрическому заряду (рис. 1, выход 4).

Интеграторы тока также пригодны в качестве первичных измерительных цепей для снятия электрических зарядов сдвоенных датчиков НЭП. Вторичные измерительные цепи сдвоенных датчиков служат для усреднения сигналов двойных датчиков с целью снижения погрешности от неоднородности ЭП и формирования выходного сигнала пропорционального напряженности поля.

Установлены сдвоенные датчики НЭП двух типов, к которым отнесены датчики с накладными и составными чувствительными элементами. Датчики с накладными и составными чувствительными элементами позволяют воспринимать напряженность неоднородного ЭП с погрешностью, не превышающей +4,6 %, при этом для всех типов датчиков в пространственном диапазоне измерений составляет $0 \leq \alpha \leq 1$. Это означает, что расстояние d от центра датчика до источника поля ограничено только радиусом сферического основания датчика, т.е. $d \approx R$.

Определены чувствительности двух типов сдвоенных датчиков НЭП.

Выводы и заключения. Из результатов проведенных исследований следует:

1) выявлены два типа сдвоенных датчиков: датчики с накладными и составными чувствительными элементами. Датчики с накладными и составными чувствительными элементами обладают максимальной возможной погрешностью от неоднородности ЭП, не превышающей +4,6 % во всем пространственном диапазоне измерения;

2) из всех возможных выходных сигналов сдвоенных датчиков, с метрологической точки зрения, целесообразнее всего выбирать в качестве выходного сигнала электрический заряд, снятие которого обеспечивает замкнутость чувствительных элементов на проводящее основание датчика и исключает зависимость электрического заряда от частоты ЭП и его взвешенность, при наличии гармоник в ЭП, с номером гармоники;

3) предложены вторичные измерительные цепи сдвоенных датчиков, усредняющие их выходные сигналы с целью реализации метода измерения, снижающего погрешность от неоднородности ЭП, и формирования выходного сигнала, пропорционального напряженности поля.

4) получены выражения для чувствительностей всех типов двоянных датчиков.

В заключение следует отметить, что методы измерения НЭП с применением двоянных датчиков напряженности являются перспективными и открывают новое направление в области измерений электрических полей.

Библиографический список

1. Датчики напряженности электростатического поля EP-600. Руководства, инструкции, описание для «Narda PMM EP-600, EP-601, EP-602, EP-603, EP-604 датчики напряженности поля». URL: <https://newpribor.ru/catalog/isyvatelnoe-oborudovanie/probniki-polya/narda-pmm-ep-600-ep601-ep-602.html> (дата обращения: 05.08.2019).
2. Берент Г. Н., Плейс И. Р. Датчик электрического поля // Приборы для научных исследований. 1971. № 6. С. 141–142.
3. Eggert S., Goltz S. NFM-1 ein aperiodisches Nahfeld — Stärkemessgerät für Messungen an Hochfrequenzarbeitsplätze // Radio Fernsehen Elektronik. 1976. Vol. 25 (15). S. 488–490.
4. Baicry M., Le Prado M. Device for measuring an electric field in a conducting medium and method of calibrating such a device. US patent 10107845; filed February 17th, 2016; published August 18th, 2016.
5. Бирюков С. В. Сдвоенные сферические датчики напряженности низкочастотных электрических полей нового поколения // Омский научный вестник. 2021. № 5 (179). С. 62–67. DOI: 10.25206/1813-8225-2021-179-62-67.
6. Пат. № 207464 U1 Российская Федерация, МПК G01R 29/12. Устройство для измерения напряженности электрического поля со сдвоенным датчиком / Бирюков С. В., Тюкина Л. В., Эйсмонт Н. Г. № 202111582; заявл. 23.04.21; опубл. 28.10.21, Бюл. 31.
7. Пат. № 207465 U1 Российская Федерация, МПК G 01 R 29/12. Устройство для измерения напряженности электрического поля со сдвоенным датчиком / Бирюков С. В., Тюкина Л. В., Данышина В. В. № 202111599; заявл. 23.04.21; опубл. 28.10.21, Бюл. 31.
8. Бирюков С. В., Тюкина Л. В., Тюкин А. В. Метод измерения напряженности неоднородных электрических полей по среднему значению // Омский научный вестник. 2021. № 4 (178). С. 67–74. DOI: 10.25206/1813-8225-2021-178-67-74.
9. Пат. № 2733100 С1 Российская Федерация, МПК G 01 R 29/12. Способ измерения напряженности электрического поля повышенной точности / Бирюков С. В., Глуховеря Е. Г. № 20201088479; заявл. 27.02.20; опубл. 29.09.20. Бюл. 28.
10. ГОСТ 32144. Электрическая энергия. Совместимость технических средств электромагнитная. Нормы качества электрической энергии в системах электроснабжения. Введ. 2014–07–01. Москва: Стандартинформ, 2014. 22 с.
11. Ревич Ю. В. Электроника шаг за шагом. Москва: ДМК Пресс, 2021. 260 с. ISBN 978-5-97060-919-4.
12. Гутников В. С. Интегральная электроника в измерительных устройствах. Ленинград: Энергоатомиздат. Ленингр. отд-е, 1988. 304 с.
13. Misakian M., Kotter F. R, Kahler R. L. Miniature ELF Electric Field Probe // Instruments for scientific research. 1978. Vol. 49 (7). P. 933–935. DOI: 10.1063/1.1135497.
14. Пат. № 17225 U1 Российская Федерация, МПК G 01 R 29/08. Устройство для измерения напряженности электрического поля / Бирюков С. В. № 2000122564/20; заявл. 31.08.00; опубл. 20.03.01. Бюл. 8.
15. Xiao D., Ma Q., Yutong Xie Y. [et al.]. A Power-Frequency Electric Field Sensor for Portable Measurement // Sensors (Basel). 2018. Vol. 18 (4). 1053. DOI: 10.3390/s18041053.
16. Chauzy S., Magnes P. Mise au point d'un mesureur de champ électrique alternatif 50 // Rev. Gen. Elec. 1988. № 7. P. 27–38.
17. Морозов Ю. А., Иванов В. А., Трушин Г. Б. Прибор для измерения напряженности электрического поля гармоник 300, 600,...2400 // Охрана труда в промышленности. Москва, 1980. С. 137–141.
18. Мелехов М. Е. Измерительная антенна с запоминающим устройством // Измерительная техника. 1975. № 1. С. 81–82.
19. Бирюков С. В. Измерение напряженности электрических полей в диэлектрических средах электроиндукционными датчиками. Методы и средства измерений: моногр. Омск: Изд-во ОмГТУ, 2011. 196 с.
20. Бирюков С. В. Теория и практика построения электроиндукционных датчиков потенциала и напряженности электрического поля // Омский научный вестник. 2000. Вып. 11. С. 89–93.

БИРЮКОВ Сергей Владимирович, доктор технических наук, профессор (Россия), профессор кафедры физики Омского государственного технического университета (ОмГТУ), г. Омск.
 SPIN-код: 9384-0078
 ORCID: 0000-0002-1362-9911
 AuthorID (SCOPUS): 7006438919
 Адрес для переписки: sbiryukov154@mail.ru
ТЮКИНА Людмила Владимировна, соискатель кафедры физики ОмГТУ, г. Омск.
ТЮКИН Александр Владимирович, кандидат технических наук, доцент кафедры «Физика и математика» Сибирского государственного автомобильно-дорожного университета, г. Омск.
 SPIN-код: 4516-7742
 AuthorID (РИНЦ): 775886
 ORCID: 0000-0002-7316-3797
 AuthorID (SCOPUS): 57203100232

Для цитирования

Бирюков С. В., Тюкина Л. В., Тюкин А. В. Измерительные цепи двоянных электроиндукционных сферических датчиков напряженности электрического поля замкнутой конфигурации // Омский научный вестник. 2022. № 2 (182). С. 93–101. DOI: 10.25206/1813-8225-2022-182-93-101.

Статья поступила в редакцию 15.02.2022 г.
 © С. В. Бирюков, Л. В. Тюкина, А. В. Тюкин