НАУКА и ОБРАЗОВАНИЕ

Эл № ФС77 - 4 8211. Государственная регистрация №042 1200025. ISSN 1994-0408

электронный научно-технический журнал

Электродные системы многокомпонентных датчиков напряженности геоэлектрического поля для подвижных носителей

05, май 2014 DOI: 10.7463/0514.0710552 Мисеюк О. И.¹, Собисевич А. Л.² УДК 621.317.3/4

> ¹Россия, МГТУ им. Баумана ²Институт физики Земли им. О.Ю. Шмидта РАН <u>omisevuk@mail.ru</u> <u>alex@ifz.ru</u>

Внедрение комплексных исследований геодинамической активности сейсмоопасных регионов геоэлектрическими методами, информационные возможности которых достаточно обширны и далеко не полностью используются, сдерживается отсутствием средств измерения параметров геоэлектрического поля в различных средах в широком диапазоне частот. При разработке средств измерения основная трудность заключается в выборе и расчете первичного преобразователя (ПП) датчика электрического поля (ЭП). Проектирование ПП дополнительно усложняется следующими эксплуатационными требованиями:

- для исследования больших пространств ПП устанавливается на подвижном носителе;

- неизвестное положение носителя в исследуемом векторном ЭП требует измерения двух или трех компонент напряженности ЭП;

- при использовании многокомпонентных ПП необходимо обеспечить геометрическую и электрическую идентичность каналов и исключить их взаимное влияние.

Основной целью проектирования датчика ЭП является обеспечение высокой чувствительности при ограниченных габаритах ПП, то есть достижение максимально возможного соотношения мощностей полезного сигнала и суммы внутренних шумов и внешних помех в рабочей полосе частот при соблюдении ограничений на размеры ПП. С этих позиций далее будут рассмотрены некоторые из аспектов проектирования равномерно перемещаемых в проводящих средах датчиков переменного ЭП для диапазона частот от единиц Герц до десятков килогерц. Отсутствие средств измерения и, как следствие, натурных исследований электромагнитных предвестников землетрясений [1, 2] предопределило выбор частотного диапазона и вмещающей среды ПП. Изучение геоэлектрических предвестников землетрясений в широком диапазоне частот, кроме самостоятельного значения, необходимо для выявления новых методов выделения полезного сигнала, отличающихся от традиционных, учитывающих только его амплитудное значение [2]. Это в свою очередь, позволит получить дополнительную информацию о физической природе источников и механизме формирования полезного сигнала [1,2]. Проведение таких исследований в проводящих средах, в частности, на акваториях морей и океанов или пресноводных бассейнах суши позволит также реализовать ряд дополнительных преимуществ. Среди них: сгущение силовых линий ЭП вблизи береговой черты, так называемый "береговой эффект усиления поля"; снижение влияния помехонесущих факторов, таких как вариации температуры, электропроводности и т.п. Несмотря на то, что дальнейшее изложение ведется применительно к электродным системам, перемещающимся в водной среде, результаты работы применимы и для датчиков ЭП в ионосфере, а при использовании аналогии между электрической проводимостью и емкостью - для измерений в атмосфере.

Наиболее чувствительным ПП переменного ЭП является контактная электродная система [3, 4]. Схему замещения такой системы независимо от типа и конструкции, можно представить относительно выходных зажимов эквивалентным активным двухполюсником с нагрузкой Z, Активный двухполюсник состоит из внутреннего (выходного) сопротивления Z_{d} , соединенного либо последовательно с источником ЭДС, равной напряжению холостого хода ПП - \dot{V}_x , либо параллельно с источником тока короткого замыкания $\dot{I}_k = \dot{V}_x/Z_q$ (рис. 1). На рисунке 1 показаны основные факторы, влияющие на значения элементов схемы замещения ПП.



Рис. 1. Основные факторы, влияющие на значения элементов эквивалентной схемы первичного преобразователя.

http://technomag.bmstu.ru/doc/710552.html

Основным классификационным признаком электродных датчиков является их разделение на интегральные и локальные. В первом случае выходной сигнал ПП пропорционален интегралу от напряженности ЭП по линии измерительной базы датчика, а во втором - напряженности исходного ЭП в точке центра ПП:

$$\dot{U}_{x} = l_{\mathfrak{B}} \dot{E}_{0} = Z_{\mathfrak{A}} \dot{I}_{\kappa} = \tilde{S}_{\mathfrak{B}} \sigma \dot{E}_{0} Z_{\mathfrak{A}}, \tag{1}$$

где l_{2} - эквивалентная база (длина) ПП или его коэффициент преобразования, \dot{E}_{0} - напряженность исходной компоненты воздействующего однородного ЭП, \dot{U}_{x} - напряжение холостого тока первичного преобразователя; \tilde{S}_{2} - коэффициент преобразования ПП, модуль этого коэффициента $-|\tilde{S}_{2}| = l_{2}/\sigma Z_{d} = S_{2}$ - эквивалентная площадь ПП, плотность тока $j = \kappa a j = \sigma \dot{E}_{0}$; \dot{I}_{k} -- ток короткого замыкания, σ - удельная электрическая проводимость среды.

Однако однородное поле является лишь удобной математической моделью, физически реализуемой лишь при калибровке датчиков, поэтому линейные зависимости (1) практически соблюдаются только для двух случаев: ПП имеет бесконечно малые размеры, так называемый точечный датчик; напряженность геоэлектрического поля - постоянна в объеме осреднения (области измерения) датчика. Первый из них не реализуется технически любой реальный ПП имеет конечные размеры, и только второй случай представляет практических интерес после конкретизации понятия области измерения.

Из анализа решений задач теории поля по расчету искажения поля в присутствии проводящих и диэлектрических тел следует, что искажения исходного ЭП при внесении в него локального ПП сосредоточены внутри сферы, диаметр которой не превышает 3...8 габаритных размеров ПП. За габаритный размер *l* принимается размер ПП по оси чувствительности (вдоль силовых линий), если в этом направлении преобладают материалы с высокой проводимостью (металл), или перпендикулярный оси чувствительности размер ПП, если в этом направлении сосредоточены непроницаемые материалы (диэлектрические экраны).

Исходя из принципа взаимности, можно заключить, что если ПП не искажает ЭП за пределами радиуса в (1,5...4)l, то \dot{U}_x и \dot{I}_k не зависят от напряженности поля вне этой области. Поэтому понятия областей искажения и измерения (осреднения) локального ПП эквивалентны и для практических расчетов их диаметр можно принять равным

$$d_0 \approx 5l. \tag{2}$$

В этих пределах пространственная и временная изменчивость ЭП, неоднородность вмещающей среды по σ не должны превышать единиц процентов, тогда ПП можно считать локальным, для которого связь между активными элементами схемы замещения и напряженностью исходного поля соответствует (1). Если в качестве источника пространственной неоднородности ЭП с масштабом 2а рассмотреть диполь с плечом 2a, то требуемая неоднородность ЭП в объеме измерения будет обеспечена при соотношении

$$\frac{d_0}{a} = \frac{5l}{a} = 0.1 \div 0.2; \text{ или } l \le (1 \div 2)10^{-2} \cdot 2a \tag{3}$$

Временная изменчивость ЭП не влияет на результаты измерений, если в области (2) амплитуды исходного поля различаются не более чем на (1...3)%, а сдвиги фаз не превышают (1...3) градуса. Эти условия соблюдаются, если для самой короткой λ_{min} волны (высокой частоты f_{max}) в спектре исследуемого ЭП выполнены соотношения

$$\frac{d_o}{\lambda_{\min}} = \frac{5l}{\lambda_{\min}} \le (1 \div 5) \cdot 10^{-2},
l \le (2 \div 10) \cdot 10^{-3} \cdot \lambda_{\min} = (4 \div 20) \cdot 10^{-3} \sqrt{\pi / f_{\max} \sigma \mu_o}.$$
(4)

Для определения элементов эквивалентной схемы (рис.1) в общем случае необходимо решить две задачи теории поля (обычно проще задачи для \dot{l}_k и $Z_{d,}$), а $\dot{U}_X=Z_d \cdot \dot{l}_k$ с существенно смешанными граничными условиями для комплексного потенциала, который вводится для учета влияния импеданса двойного поляризационного слоя (ДС) на границах контакта электродов с окружающей средой. Сложность и объем вычислений дополнительно увеличиваются из-за необходимости определения \dot{l}_k и Z_d как функций влияющих факторов (рис.1). Поскольку, только располагая функциональными зависимостями \dot{l}_k и Z_d , можно поставить и решить задачи по оптимизации ПП для достижения максимальных коэффициентов преобразования, чувствительности и т.п. Эффективный метод решения таких задач основывается на использовании математических моделей элементов схемы замещения ПП [5]. Для всех практических задач в [5] обосновано применение физически наглядных и достаточно точных выражений:

$$Z_{\mathcal{A}} \approx R_p + 2Z_{\Pi}; \ \dot{I}_k = I_k \cdot \tilde{k}_{\vartheta} = I_k (1 + 2Z_{\Pi}G_p)^{-1},$$
 (5)

где $R_p = {}^1/G_p$ - сопротивление растекания между электродами; Z_n - импеданс ДС электрода; \tilde{k}_3 - коэффициент экранирования электродов; I_k - ток короткого замыкания при отсутствии ДС.

В (5) влияние ДС учитывается аналитически, а краевые задачи теории поля по расчету R_p и I_k решаются для действительного потенциала с граничными условиями 1-ого рода. Эти решения более просты, а для многих случаев и достаточно известны. Из (5) легко получить требование к импедансу ДС, обосновывающее выбор конструкции и технологии изготовления электрода. Если допустимо относительное уменьшение $|\dot{I}_k|$ на малую величину δ , то есть $|\tilde{K}_3| = 1 - \delta$, то из (5) получим

$$\operatorname{Re}Z_{\Pi} \leq \delta \cdot R_{p}; \quad r_{\Pi} \leq \delta \cdot R_{p} (1 + \omega_{min}^{2} \cdot \tau_{\Pi}^{2})$$
(6)

где $\tau_{n} = r_{n}C_{n}$ - постоянная времени ДС, представляемого схемой Гельмгольца в виде конденсатора с емкостью C_{n} и параллельного резистора утечки с сопротивлением r_{n} .

Заданием на любые исследования ЭП с подвижных носителей накладываются вытекающие из (3,4) ограничения на габариты ПП, которые могут дополнительно усиливаться по условиям эксперимента. При такой постановке неизбежен вопрос об оптимальном соотношении размеров ПП. Любая оптимизационная задача требует обоснования критерия оптимизации, за который для локальных ПП следует принять[3]:

$$F = \frac{l_{\Im}^2}{R_{\Lambda}} = \frac{U_{\chi}^2}{E_0^2 R_{\Lambda}} = \frac{U_{\chi}}{E_0^2} I_k = \sigma^2 S_{\Im}^2 R_{\Lambda} \to max,$$
(7)

где $R_{\rm g} = ReZ_{\rm g}$ - действительная часть внутреннего сопротивления ПП, которая при соблюдении (6) близка к R_p . Максимум (7) соответствует максимумам мощности в согласованной нагрузке, коэффициента преобразования и выходного напряжения на конечном сопротивлении, соотношения сигнал/шум самого ПП и согласованного с ним по шумам предусилителя. Сопоставление величин F для различных ПП позволяет объективно выбрать лучший тип и конструкцию датчика, обосновать целесообразность различных усовершенствований. Критерий (7) позволяет оптимизировать не только контактные ПП, но и любые другие пассивные датчики ЭП, так в [6] его использование позволило существенно улучшить параметры бесконтактных трансформаторных датчиков.

Рассмотренные требования и соотношения (1...7) справедливы для всех типов датчиков ЭП в проводящих средах. Устанавливаемые на подвижных носителях многокомпонентные электродные системы должны удовлетворять и ряду специфических условий. Основными из них являются:

1) исключение взаимного влияния каналов многоэлектродной системы, что обеспечивается электрической симметрией эквивалентной схемы системы, которая определяется геометрической симметрией конструкции;

 минимизация различий физико-химических условий на поверхностях контакта с окружающей средой всех образующих систему электродов, что достигается идентичностью конструкций электродов и их положением относительно воздействующих полей и потоков, то есть отсутствием затенения одного электрода другим;

3) уменьшение числа используемых электродов при заданном числе регистрируемых компонент ЭП, что упрощает выполнение не только экономических и эксплуатационных требований, но и двух предыдущих.

С учетом этого, для двухкомпонентного ПП электроды должны располагаться в вершинах плоской фигуры в виде квадрата или равностороннего треугольника (рисунок 2 а, б).





Здесь и далее рассматриваются сферические электроды диаметром 2a, так как такая форма наиболее технологична и упрощает выполнение условия 2. Конструкция (рисунок 2а) имеет четыре различные оси чувствительности (ортогональные стороны и диагонали квадрата), но условие 1 - электрическая симметрия выполняется только для осей, совпадающих с диагоналями. В этом случае сигнал каждого из каналов несет информацию только об одной компоненте вектора напряженности: курсовой или траверзной (E_x или E_y соответственно), что упрощает построение аппаратурной части измерителя. Однако, при размещении электродной системы (рисунок 2а) на подвижном носителе хотя бы один электрод будет попадать в след другого (затеняться). Электродная система (рисунок 2б) имеет три оси симметрии, вместо двух необходимых. Минимально возможное число используемых электродов равно числу компонент плюс единица. При совпадении вектора скорости с биссектрисой любого из углов ни один из электродов не затеняет другие. Таким образом, эта конструкция наиболее полно отвечает всем требованиям. Но расположение осей чувствительности ПП не ортогонально, а под углом 60°, приводит к некоторому усложнению аппаратуры обработки при формировании сигналов, пропорциональных *E_x* и. Е_v. Теоретически, если входные сопротивления канальных предусилителей, являющихся нагрузкой электродной системы, бесконечны, то необходимую информацию можно получить с двух измерительных каналов, не нарушая симметрию электродной системы. При конечных входных сопротивлениях и использовании двух каналов из-за их шунтирующего действия электрическая симметрия электродной системы будет нарушена. Поэтому к незадействованной паре электродов следует подключить нагрузку эквивалентную входному сопротивлению предусилителя. Можно использовать и три предусилителя, при этом появится возможность дублировать результаты изменений одной из компонент (например *E*_v (рис. 2)). Избыточная информация позволит судить о симметрии электродной системы, идентичности предусилителей и выполнении условий локальности (3,4), то есть однородности ЭП в объеме измерений ПП по компоненте E_{y} . Дополнительным, но в некоторых случаях решающим достоинством конструкции (рисунок 2б) по сравнению с конструкцией (рисунок 2а) являются меньшие площадь контура и габаритный размер в направлении движения электродной системы.



Рис. 3. Трехкоординатные симметричные электродные системы.

Очевидно, что при необходимости измерения всех трех компонент вектора напряженности следует перейти от симметричных фигур на плоскости к правильным выпуклым многогранникам в виде октаэдра или тетраэдра (рисунок 3а, б).

Повторив сравнения, аналогичные предыдущему случаю, легко убедиться, что достоинства неортогональной симметричной электродной системы (рисунок 3б) по сравнению с ортогональной (рисунок 3a) для пространственного случая только усилятся. Так выигрыш за счет числа используемых электродов достигнет двух, уменьшаются требуемые для размещения не только линейные размеры и площадь, но и объем. Использование избыточной информации позволяет судить об объемной однородности исследуемого поля, идентичности предусилителей и симметрии электродной системы. Если последнее установлено, то не переключая входов предусилителей, только подключив параллельно одному из них источник калибровочного тока, можно определить изотропность и однородность вмещающей среды в объеме измерения электродной системы. Практическая реализация перечисленных достоинств требует разработки инженерных методов расчета элементов схемы замещения многоэлектродного ПП, что позволит разрабатывать варианты аппаратурной реализации.

В качестве примера на рис. 4 приведена развернутая эквивалентная схема ПП (рис. 2б), где выводы электродов 1,2,3, к которым подключаются входы предусилителей, показаны в виде соответствующих клемм.



Рис. 4. Эквивалентная схема электродной системы ПП (рис.2б)

Клеммы через импедансы ДС - Z_{ni} соединены с окружающей средой, т.е. узлы 1', 2', 3' на схеме (рис. 4) соответствуют внешним границам ДС соответствующих электродов в реальных условиях. Между этими границами включены частичные взаимные проводимости электродов g_{ij} . А между каждой из границ и общей (бесконечно удаленной) точкой включены ветви, состоящие из последовательно соединенных частичной собственной проводимости электрода g_{ii} и источника ЭДС, равного потенциалу электрода V_i относительно общей точки. Будем считать, что условие (6) выполнено и влиянием импеданса ДС можно пренебречь. Если (6) не соблюдается, то используя математические модели (5), влияние импеданса ДС можно учесть аналитически, определив Z_n по эмпирическим формулам и экспериментальным параметрам ДС [3]. Не нарушая общности выводов, для сокращения записей примем, что электродная система размещена в изотропной однородной среде с действительной усредненной удельной электрической проводимостью σ . Для п идентичных сферических электродов, равномерно распределенных по окружности или сфере, то есть находящихся в *n* вершинах правильных многоугольников или многогранников, все частичные собственные проводимости будут одинаковы и их можно определить по формуле:

$$g_{ii} \approx 4\pi \alpha a / \left(1 + \sum_{i \neq j=1}^{n} a / l_{ij} \right),$$
(8)

где l_{ij} - расстояние между центрами **i**-го и **j**-го электродов. Интересующие нас симметричные электродные системы имеют $n \ge 4$ и равные расстояния между электродами. Обозначив относительный радиус электрода $m = \frac{a}{l}$ из (8) получим:

$$g_{ii} \approx 4\pi\sigma a / [1 + (n-1)m] \tag{9}$$

Сохранив все обозначения для частичных взаимных проводимостей рассматриваемых электродных систем, можно записать:

$$g_{ij} \approx 4\pi\sigma am / [1 + (n-2)m - (n-1)m^2]$$
(10)

Размещаемые на подвижных носителях электродные системы из условий обтекания и отсутствия затененности электродов имеют m < 0.25, то есть зазор между сферами превышает их диаметр. При этом условии погрешность формул (9,10) не превышает 3%, и они вполне могут использоваться в инженерных расчетах. В частности, для внутренней (выходной) проводимости источника сигнала по отношению к входу предусилителя с бесконечно большим входным сопротивлением, подключенным между любой парой электродов симметричной системы, с учетом (9,10) будем иметь:

$$G_{\text{Bbix}} = G_n = G_p = \frac{1}{2} \left(g_{ii} + ng_{ij} \right) \approx \frac{2\pi\sigma a}{1-m} \tag{11}$$

Для n=2, то есть для обычного двухэлектродного однокомпонентного ПП, полученное приближенное выражение (11) известно [3]. При m \leq 0.3 и n=2 приближение (11) дает результат, заниженный не более, чем на 2% по сравнению с точным решением. Это косвенно подтверждает приемлемую для практических расчетов точность формул (9...11) для любых n \geq 4.

Если требуется учесть влияние импеданса ДС на сопротивление источника сигнала для предусилителя, то в соответствии с (5,11) получим:

$$Z_{\mathcal{A}} \approx \frac{1}{G_p} + 2Z_n \approx \frac{1-m}{2\pi\sigma a} + 2Z_n \tag{12}$$

где Z_n - импеданс ДС одного электрода.

Если подключаемые к каждой паре электродов предусилители имеют не нулевую, а конечную, в общем случае, комплексную входную проводимость $Y_{\rm BX}$, которую необходимо учитывать при расчете сопротивления источника сигнала, то вместо (11) следует использовать:

$$Y_{_{6bix}} = Y_g = \frac{1}{2} \left(g_{ii} + ng_{ij} \right) + \left(\frac{n}{2} - 1 \right) Y_{_{6x}} \approx \frac{2\pi\sigma a}{1 - m} + \left(\frac{n}{2} - 1 \right) Y_{_{6x}}$$
(13)

Отсюда следует, что внутренняя проводимость источника сигнала при n=2 останется неизменной, для n = 3 увеличится на $0.5Y_{\rm BX}$, а при n = 4 увеличится еще на $0.5Y_{\rm BX}$. Из (11...13) легко получить выражение для внутренней проводимости источника сигнала в самом общем случае, когда необходимо учитывать импеданс ДС и шунтирующее действие предусилителей других каналов симметричных электродных систем:

$$Y_{\rm Bbix} = Y_g = \frac{2\pi\sigma a}{1 - m + 4\pi\sigma a Z_n} + \left(\frac{n}{2} - 1\right) Y_{\rm Bx}$$
(14)

Кроме рассмотренного подключения предусилителей с симметричными входами между каждой парой электродов симметричной системы, когда входы предусилителей параллельны каждой из частичных взаимных проводимостей, теоретически возможно подключение предусилителей звездой, когда сигнальный вывод несимметричного входа каждого предусилителя подключен к одному из электродов, а общие выводы всех предусилителей образуют узел - приборную "землю". Однако здесь такое соединение подробно не рассматривается как не имеющее практического смысла. При n=3 соединение входов предусилителей звездой не имеет никаких преимуществ перед соединением треугольником. При n=4 соединение звездой требует 4 предусилителя вместо 6, но в обоих случаях можно использовать и по 3 предусилителя, так что реально экономия сведется к двум эквивалентам их входных сопротивлений.

Недостатки соединения входов предусилителей звездой более существенны. Прежде всего - это значительное увеличение сопротивления источника сигнала для каждого из предусилителей, так как вход рассматриваемого предусилителя оказывается соединенным с электродной системой через лучи остальных входов предусилителей. Из-за этого возрастают собственные шумы в каждом из измерительных каналов и ухудшается их чувствительность. Этот недостаток можно уменьшить, но не устранить при использовании предусилителей с низким входным сопротивлением (предусилителей, управляемых током). Однако в любом случае реальная чувствительность будет значительно хуже для соединения звездой из-за несимметрии входных зажимов предусилителя относительно приборной "земли" (общей точки). Из-за этого увеличится влияние помех, прежде всего помехи за счет разности потенциалов "земель" ПП и регистрирующей аппаратуры, которая обычно удалена от ПП. Таким образом, для практической реализации можно рекомендовать только соединение симметричных входов предусилителей многоугольником. При этом полученных формул (8...14) вполне достаточно для определения пассивного элемента схемы замещения ПП - его выходного сопротивления при любых соотношениях сопротивления растекания, импеданса ДС и входного сопротивления предусилителя.

Впервые сформулированный в виде выражения (11) вывод о равенстве проводимостей (сопротивлений) растекания между электродами любой пары, образующих симметричную многоэлектродную систему вне зависимости от числа электродов 2≤n≤4, примечателен не только в теоретическом плане, но имеет существенное практическое значение при проектировании ПП. Использование (11) для расчета пассивного элемента схемы замещения ПП - его внутреннего сопротивления уже рассмотрено в различных случаях (11...14). Определим теперь активный элемент схемы замещения - напряжение холостого хода. Рассмотрим одну из компонент напряженности исследуемого поля E_0 , совпадающую по направлению с одной из измерительных баз, например 1-2 (рис. 4). Тогда с учетом (1) для любого симметричного ПП выражение U_x можно записать следующим образом

$$U_x = l_3 E_0 = (U_1 - U_2) \frac{g_{ii}}{2G_p} = (U_1 - U_2) \frac{1 - m}{1 + (n - 1)m}$$
(15)

Из физических соображений ясно, что $(U_1 - U_2)$ прямо пропорционально $lE_0f(m)$, где l - размер геометрической базы, а f(m) - пока неизвестная функция относительных размеров ПП. Поскольку из (11) следует, что при n > 2 появление лежащих на эквипотенциали дополнительных электродов в симметричной системе не изменяет интегрального параметра G_p то можно предположить и неизменность функции f(m) для всех симметричных электродных систем, то есть вместо (15) записать:

$$U_{\chi} = l_{\mathfrak{z}} E_o = l E_o f(m) \frac{1-m}{1+(n-1)m}$$
(16)

Откуда для соотношения измерительной и геометрической баз получим:

$$\frac{l_3}{l} = f(m) \frac{1-m}{1+(n-1)m}$$
(17)

Для однокомпонентного ПП в виде двух сферических электродов известны [3] как точные, так и приближенные выражения отношения $l_{3/l}$. Сопоставив их и (17), легко определить одно из приближенных выражений для:

$$f(m)\approx (1+m).$$

Подставив последнее в (17), для коэффициента преобразования ПП по напряжению - его эквивалентной базы, получим:

$$l_{9} \approx l \frac{(1-m)(1+m)^{2}}{1+(n-1)m}$$
(18)

Используя (18), легко определить не только активный элемент схемы замещения ПП, но и с учетом (7) поставить и решить различные варианты оптимизационных задач. Так при пренебрежимо малом влиянии импеданса ДС и ограничении на максимальный габарит ПП, который должен находиться внутри воображаемой сферы диаметром D, с учетом (7,11,18) имеем:

$$F = l_{9}^{2}G_{p} = 2\pi\sigma a l^{2} \frac{(1-m)(1+m)^{4}}{[1+(n-1)m]^{2}} \to max$$

Учтем, что (l + 2a) = D = const, и, обозначив новую переменную $\eta = a/D$, то есть $m = a/l = a/(D - 2a) = \eta/(1 - \eta)$, после несложных преобразований вместо последнего выражения получим:

$$F = 2\pi\sigma D^{3} \frac{\eta (1-3\eta)(1-\eta)^{4}}{(1-2\eta)[1+(n-3)\eta]^{2}} \to max$$
(19)

Исследование (19) на экстремум дает следующие оптимальные значения относительных размеров электродов при различном их числе в симметричной системе:

$$\eta_{opt}(n=2) \approx 0.1758; \ \eta_{opt}(n=3) \approx 0.1413; \ \eta_{opt}(n=4) \approx 0.1194$$

 $m_{opt}(n = 2) \approx 0,271; m_{opt}(n = 3) \approx 0,197; m_{opt}(n = 4) \approx 0,157$



Рис. 5. Симметричная система электродов, расположенных в вершинах правильного тэтраэдра.

Первый из результатов (20) при n=2 отличается от известного [3], полученного решением полевой задачи в строгой постановке, не более чем на 0,5%, что еще раз подтверждает достаточную точность предложенных расчетных соотношений. Следует отметить, что максимум (19) при n=3 и 4 выражен не резко. Если допустить уменьшение критерия оптимизации всего на 10%, то геометрическая база оптимального ПП должна превышать радиус его электродов в 5.1, 8.9 и 11.3 раза при n=2, 3 и 4 соответственно. Таким образом, при n=3 геометрическая база ПП должна превышать радиус сферического электрода в (7...10) раз, а при n=4 это соотношение равно (9...13).

В заключении рассмотрим некоторые из вопросов аппаратурной реализации измерения компонентов вектора напряженности ЭП. На рисунке 5 изображены в прямоугольной системе координат X (курсовая), Y (траверзная), Z (вертикальная) вектор напряженности \vec{E} , его компоненты E_x, E_y, E_z и многоэлементная симметричная система электродов 1...4, расположенных в вершинах тетраэдра. Для напряжений между шестью возможными парами электродов можно соответственно записать

$$U_{12} = E_x l_3 sin(60^\circ) - E_y l_3 sin(30^\circ) = \frac{l_3}{2} \left(\sqrt{3} E_x - E_y \right);$$

$$U_{32} = E_x l_3 sin(60^\circ) + E_y l_3 sin(30^\circ) = \frac{l_3}{2} \left(\sqrt{3} E_x + E_y \right);$$

$$U_{31} = E_y l_3;$$
(21)

$$U_{14} = \frac{l_3}{2} \left(E_x \frac{1}{\sqrt{3}} - E_y + E_z \sqrt{6} \right);$$

$$U_{24} = \frac{l_3}{\sqrt{3}} \left(-E_x - E_z \sqrt{2} \right);$$

$$U_{34} = l_3 \left(E_x \frac{\sqrt{3}}{6} + E_y \frac{1}{2} + E_z \frac{\sqrt{6}}{3} \right).$$

Шесть выражений (21) дают возможность использовать различные варианты алгоритма по выделению трех сигналов, каждый из которых пропорционален одной из компонент [7,8,9.]. Функциональная схема аппаратурной реализации одного из них приведена на рисунке 6.



Рис. 6. Функциональная схема аппаратурной реализации алгоритма по выделению сигналов, пропорциональных компонентам напряженности ЭП, принимаемых системой, изображенной на рис.5

Здесь используются 1,2 и 5-ый сигналы (21), из которых формируют три выходных сигнала, пропорциональных компонентам исследуемого ЭП, в соответствии с выражениями:

$$E_{x} = (U_{12} + U_{32})/\sqrt{3} l_{3};$$

$$E_{y} = (U_{32} - U_{12})/l_{3};$$

$$E_{z} = 3U_{24}/\sqrt{6} l_{3} + (U_{12} + U_{32})/\sqrt{6} l_{3}.$$
(22)

В схеме (рисунок 6) использовано минимальное количество предусилителей - 3, а три свободных пары электродов нагружены эквивалентами входных сопротивлений предусилителей $R_{\text{вх31}} = R_{\text{вх14}} = R_{\text{вх34}}$ для сохранения симметрии электродной системы. Однако, в зависимости от конкретных условий постановки эксперимента по исследованию ЭП, простейший в аппаратурном оформлении измерительный комплекс может не быть одновременно и лучшим. Кроме уже рассматривавшихся достоинств систем с избыточной информацией, в которых используются все сигналы (21), что позволяет судить об однородности исследуемых среды и ЭП, симметрии измерительной системы, идентичности каналов и т.п., такие системы позволяют исключить влияние на результаты измерений некоторых помехонесущих полей. В частности, при наличии электромагнитных индукционных помех, за счет переменного магнитного поля, в таких системах можно формировать сигнал, пропорциональный индуцированному напряжению $U = -\frac{\partial \Phi}{\partial t}$, располагая которым можно судить о помехонесущем переменном магнитном поле и скомпенсировать или учесть помехи от этого поля в каналах измерения компонент напряженности исследуемого ЭП.

Выводы

Приведенные результаты позволяют спроектировать симметричные многокомпонентные электродные системы для исследования переменных ЭП, расположенных на подвижных носителях.

Сформулированы требования к импедансу двойного поляризационного слоя, обосновывающие выбор оптимальной конструкции и технологии изготовления измерительных электродов. Разработаны инженерные методы расчета элементов схемы замещения многоэлектродного ПП.

На основании анализа алгоритмов обработки сигнала ПП разработана схема их аппаратурной реализации применительно к конкретным условиям эксперимента, обеспечивающая наилучшую реальную чувствительность и уменьшающая влияние помех.

Практическое использование таких исследований позволит получить более полную и достоверную информацию о пространственно-временных аномалиях геоэлектрического поля, что, в свою очередь, необходимо для исследования явлений и процессов, являющихся источниками таких аномалий.

Список литературы

- Гохберг М.Б., Гуфельд И.Л., Липеровский В.А. Современное состояние исследований электромагнитных предвестников землетрясений // Сб. научных трудов ИФЗ АН СССР: Дискретные свойства геофизической среды. М.: Наука, 1989. С. 97-109.
- Ремизов Л.Т. Регистрация изменений естественного ЭМП в периоды времени, предшествующие землетрясениям (обзор работ с 1964 по 1990 гг.) // Радиотехника и электроника. 1991. Т. 36, вып. 6. С.1041-1080.
- 3. Зимин Е.Ф., Кочанов Э.С. Измерение параметров электрических и магнитных полей в проводящих средах. М.: Энергоатомиздат, 1985. 256 с.

- 4. Кочанов Э.С., Зимин Е.Ф. Измерение электрического поля токов проводимости в сверхнизкочастотном диапазоне (обзор) // Радиотехника и электроника. 1982. Т. 27, вып.7. С. 1249-1267.
- 5. Зимин Е.Ф., Кудин В.Н. Математические модели первичных преобразователей датчиков электрического поля в проводящих средах // Межвуз. сб. Т. 44. М.: МЭИ, 1984. С. 48-54.
- 6. Зимин Е.Ф. Анализ и расчет бесконтактных трансформаторных датчиков // Техническая электродинамика. 1985. Вып. 6. С. 27-34.
- 7. Кудин В.Н., Зимин Е.Ф., Коробков О.В., Клемин Е.А. Трехкомпонентный датчик электрического поля в проводящей среде: a.c. 1048440 СССР. 1983, Бюл. № 38.
- 8. Зимин Е.Ф., Клемин Е.А., Коробков О.В., Кудин В.Н. Датчик электрического поля токов проводимости: a.c. 1125577 СССР. 1984, Бюл. № 43.
- 9. Зимин Е.Ф., Мисеюк О.И., Плаксин И.И., Собисевич А.Л. Датчик вектора напряженности электрического поля в проводящей среде: а.с. 2012894 РФ. 1995, Бюл. № 9.
- Зимин Е.Ф., Мисеюк О.И., Плаксин И.И. Расчет параметров электродных систем многокомпонентных датчиков напряженности электрического поля для проводящих сред // Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Сер. Естественные науки. 1998. № 1. С. 79-86.
- 11. Зимин Е.Ф., Мисеюк О.И. Датчик напряженности электрического поля (варианты): пат. 2122223 РФ. 1998, Бюл. № 32.
- 12. Собисевич Л.Е., Канониди К.Х., Собисевич А.Л. Ультранизкочастотные электромагнитные возмущения, возникающие перед сильными сейсмическими событиями // Доклады Академии Наук. 2009. Т. 429, № 5. С. 668-672.
- 13. Собисевич А.Л. Избранные задачи математической геофизики и вулканологии: монография. М.: ИФЗ РАН, 2011. 464 с.
- 14. Fraser-Smith A.C. Ultralow-Frequency Magnetic Fields Preceding Large Earthquakes // Eos, Transactions American Geophysical Union. 2008. Vol. 89, no. 23. P. 211. DOI: <u>10.1029/2008EO230007</u>
- 15. Собисевич А.Л., Канониди К.Х., Собисевич Л.Е., Мисеюк О.И. Ультранизкочастотные волновые формы геомагнитных возмущений в вариациях магнитного поля Земли на этапах подготовки и развития Турецкого(08.03.2010 г.) и Северокавказского (19.01.2011г.) землетрясений // Доклады Академии Наук .2013. Т. 449, № 1. С. 93-96. DOI: <u>10.7868/S0869565213070219</u>

SCIENCE and EDUCATION

EL Nº FS77 - 48211. Nº0421200025. ISSN 1994-0408

electronic scientific and technical journal

Multi-component electrode systems in geo-electric field intensity sensors for moving carriers.

05, May 2014 DOI: 10.7463/0514.0710552

O.I. Miseyk¹, A. L. Sobisevich²

¹Bauman Moscow State Technical University, 105005, Moscow, Russian Federation ²Federal State Institution of Science Institute of Physics of the Earth . O. Schmidt RAS, 123995, Moscow, Russian Federation <u>omisevuk@mail.ru</u> <u>alex@ifz.ru</u>

As an object of research, the electromagnetic field represents a set of parameters characterizing its electric and magnetic components. Methods and gages to measure the magnetic component of the Earth electromagnetic field are developed more explicitly than those for the electric one while an increasing need to measure the latter becomes of current importance when investigating the geodynamic activity in seismically dangerous regions by geo-electric methods. The experimental study of electric component of electromagnetic field in conducting media concerns the vector fields possessing E electric intensity. Generally, this is a three-dimensional field. The paper considers two- and three- component electrode systems in contact sensors of electric field intensity. The design of electrode systems most optimally meets requirements for devices to be set on mobile platforms for specific needs. It offers some designing aspects of evenly moved in conducting media sensors of alternating electric field for the frequencies in the range from units of Hz to tens of kHz. The feature of electrode systems is that the number of electrodes outnumbers the registered components of the electric field vector by one. Thus, nearly identical flow conditions in the vicinity of electrodes, geometric symmetry of the electrode system, and electric symmetry of measuring channels and, consequently, with no mutual influence of measuring channels at each other are provided. Using the task solutions of field theory the equivalent circuit parameters of primary converter of electrode sensor versus its geometrical sizes are defined. Optimum ratios of the geometrical sizes of primary converter are obtained. The offered criterion of optimization provides a maximum coefficient of transformation and sensitivity of measuring system. The paper considers an option of hardware implementation to measure the components of electric field intensity vector. The given results allow us to design symmetric multicomponent electrode systems for research of alternating electric fields, develop a circuit of their hardware implementation as applied to specific conditions of experiment. Practical research of such studies will allow to have more complete and reliable information about time-space anomalies of geoelectric field that, in turn, is necessary for research of the phenomena and the processes, from which such anomalies arise.

Publications with keywords: <u>electrode</u>, <u>primary converter</u>, <u>electric field intensity sensor</u>, <u>the</u> <u>equivalent circuit elements</u>, <u>conversion factor</u>, <u>the sensitivity of the transducer</u>, <u>the electrical</u> <u>conductivity of the medium</u> Publications with words: <u>electrode</u>, <u>primary converter</u>, <u>electric field intensity sensor</u>, <u>the</u> <u>equivalent circuit elements</u>, <u>conversion factor</u>, <u>the sensitivity of the transducer</u>, <u>the electrical</u> conductivity of the medium

References

- Gokhberg M.B., Gufel'd I.L., Liperovskiy V.A. [Current state of research of electromagnetic precursors of earthquakes]. *Sb. nauchnykh trudov IFZ AN SSSR: Diskretnye svoystva geofizicheskoy sredy* [Collection of scientific works of IPE USSR Academy of Sciences: Discrete properties of the geophysical environment]. Moscow, Nauka Publ., 1989, pp. 97-109. (in Russian).
- Remizov L.T. [Registration of changes of natural EMF in time periods preceding earthquakes (overview from 1964 to 1990)]. *Radiotekhnika i elektronika*, 1991, vol. 36, no. 6, pp. 1041-1080. (in Russian).
- 3. Zimin E.F., Kochanov E.S. *Izmerenie parametrov elektricheskikh i magnitnykh poley v provodyashchikh sredakh* [Measurement of parameters of electric and magnetic fields in conducting media]. Moscow, Energoatomizdat Publ., 1985. 256 p. (in Russian).
- Kochanov E.S., Zimin E.F. [Measurement of electric field of conduction currents in the ultralow-frequency range (review)]. *Radiotekhnika i elektronika*, 1982, vol. 27, no.7, pp. 1249-1267. (in Russian).
- Zimin E.F., Kudin V.N. [Mathematical models of primary converters of electric field sensors in conducting media]. *Mezhvuz. sb. T. 44* [Interuniversity coll. Vol. 44]. Moscow, MEI Publ., 1984, pp. 48-54. (in Russian).
- 6. Zimin E.F. [Analysis and calculation of contactless transformer sensors]. *Tekhnicheskaya elektrodinamika*, 1985, no. 6, pp. 27-34. (in Russian).
- Kudin V.N., Zimin E.F., Korobkov O.V., Klemin E.A. *Trekhkomponentnyy datchik* elektricheskogo polya v provodyashchey srede [Three-component sensor of electric field in a conductive medium]. Author's certificate USSR, no. 1048440. 1983. (in Russian).

- Zimin E.F., Klemin E.A., Korobkov O.V., Kudin V.N. *Datchik elektricheskogo polya tokov provodimosti* [Sensor of electric field of conduction currents]. Author's certificate USSR, no. 1125577.1984. (in Russian).
- 9. Zimin E.F., Miseyuk O.I., Plaksin I.I., Sobisevich A.L. *Datchik vektora napryazhennosti elektricheskogo polya v provodyashchey srede* [Sensor of vector of electric field intensity in a conductive medium]. Author's certificate RF, no. 2012894. 1995. (in Russian).
- Zimin E.F., Miseyuk O.I., Plaksin I.I. [Calculation of the electrode systems of multicomponent sensors of the electric field intencity for conductive media]. *Vestnik MGTU im. N.E. Baumana. Ser. Estestvennye nauki Bulletin of the Bauman MSTU. Ser. Natural Sciences*, 1998, no. 1, pp. 79-86. (in Russian).
- 11. Zimin E.F., Miseyuk O.I. *Datchik napryazhennosti elektricheskogo polya (varianty)* [Sensor of electric field intensity (options)]. Author's certificate RF, no. 2122223. 1998. (in Russian).
- Sobisevich L.E., Kanonidi K.Kh., Sobisevich A.L. [Ultra low-frequency electromagnetic disturbances appearing before strong seismic events]. *Doklady Akademii Nauk*, 2009, vol. 429, no. 5, pp. 668-672. (Russ. ed.: *Doklady Earth Sciences*, 2009, vol. 429, iss. 2, pp. 1549-1552. DOI: <u>10.1134/S1028334X09090281</u>).
- Sobisevich A.L. *Izbrannye zadachi matematicheskoy geofiziki i vulkanologii* [Selected problems of mathematical geophysics and volcanology]. Moscow, IPE USSR Academy of Sciences Publ., 2011. 464 p. (in Russian).
- Fraser-Smith A.C. Ultralow-Frequency Magnetic Fields Preceding Large Earthquakes. *Eos, Transactions American Geophysical Union*, 2008, vol. 89, no. 23, pp. 211. DOI: 10.1029/2008EO230007
- 15. Sobisevich A.L., Kanonidi K.Kh., Sobisevich L.E., Miseyuk O.I. [Geomagnetic disturbances in the geomagnetic field's variations at stages of preparation and implementation of the Elazig (March 8, 2010) and M 5.3 (January 19, 2011) earthquakes in Turkey]. Doklady Akademii Nauk, 2013, vol. 449, no. 1, pp. 93-96. DOI: 10.7868/S0869565213070219 (Russ. ed.: 2013, vol. 449, DOI: Doklady Earth Sciences, iss. 1, 324-327. pp. 10.1134/S1028334X13030069).