Наука и Образование
МГТУ им. Н.Э. Баумана
Сетевое научное издание
ISSN 1994-0408

Наука и Образование. МГТУ им. Н.Э. Баумана. Электрон. журн. 2015. № 07. С. 254–268.

DOI: **10.7463/0715.0780965**

Представлена в редакцию: 02.06.2015
Исправлена: 17.06.2015

© МГТУ им. Н.Э. Баумана

УДК 621.317.3/4

Модуляционный датчик напряженности электрического поля в проводящей среде

Мисеюк О. И.[1,*]

[*]omiseyuk@mail.ru

[1]МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва, Россия

Рассмотрены математические модели модуляционных датчиков напряженности электрического поля в сверх низкочастотном диапазоне, расположенных на подвижных носителях. Обоснован выбор двух базовых моделей первичных преобразователей с изменением в пространстве измерительной базы: с «изменяющейся» базой и с «вращающейся» базой. Особенностью предложенных моделей при вертикальном зондировании является минимальное значение помех, связанных с вращением измерительных электродов в магнитном поле Земли, и гидродинамических помех. Получены соотношения конструктивных размеров модели первичного преобразователя с «вращающейся» базой, обеспечивающей передачу максимальной мощности в нагрузку для всех положений внешнего электрода и контактного отверстия.

Ключевые слова: электрод, первичный преобразователь, датчик напряженности электрического поля, изме-рительная база, модель первичного преобразователя

Сложная и специфическая проблема исследования электрических полей океана определяет поиск методов и средств решения поставленной задачи. Датчики для исследования электрических полей морской среды должны измерять напряженность электрических полей, величины которых составляют от сотых долей до единиц-десятков микровольт на метр [1] в диапазоне частот от нуля до десятков - сотен Герц. Эти величины определяют требования к порогу чувствительности измерительных устройств. Для перекрытия частотного диапазона измеряемых полей, требуется, как правило, набор измерительных устройств, имеющих оптимальную структуру для измерения в указанном диапазоне. Потребность проведения измерений на больших акваториях и глубинах океана ставит задачу создания измерителей электрического поля, которые либо устанавливаются на скоростных подвижных носителях, либо выполняются в виде зондов, исследующих вертикальную или горизонтальную структуру электрического поля океана. Это в обоих случаях ведет к усложнению измерительных устройств и самого процесса измерения.

Перечисленные выше требования к датчикам напряженности электрического поля в морской среде определяют большое разнообразие изготовленных, проектируемых и гипотетических устройств измерения слабых электрических полей океана. Их

классификация и подробный анализ основных свойств, приведенные в [2-10], позволяют акцентировать внимание на следующих положениях:

- измерение слабых сверхнизкочастотных и постоянных электрических полей, практически исключающие традиционные контактные электродные датчики из-за собственной э д с электродов и ее дрейфа, привели к созданию модуляционных датчиков (с модуляцией неэлектрического происхождения) либо с периодическим изменением размеров измерительных баз, либо с изменением в пространстве (и следовательно, во времени) положения измерительной базы первичных преобразователей, что позволяет более эффективно выделить и измерить промодулированный сигнал из немодулированных шумов;

- усложнение конструкции данного типа датчиков требует более тщательного анализа базовых конструкций первичных преобразователей, назначения датчиков и их универсальности;

- многие вопросы, связанные с применением электродных первичных преобразователей, достаточно изучены и широко представлены в литературе: это касается, например, схемы замещения двухэлектродного датчика с неизменной измерительной базой, вопросов согласования измерительных электродных цепей с цепями обработки и управления и пр.;

- часть выводов, касающихся датчиков напряженности электрического поля, нуждаются в уточнении и требуют более тщательных исследований, а вопросы, связанные с построением модуляционных датчиков не нашли широкого освещения в литературе из-за своей новизны.

1. Математические модели модуляционных датчиков. Помехи электромагнитного происхождения

Дополним известное выражение для напряжения u, снимаемого с движущегося в однородной морской воде электродного датчика, записанного [1] в виде

$$u(t) = \int_l \left[\frac{\vec{J}}{\sigma} + \left(\vec{V}_д - \vec{V}_в\right) \times \vec{B}\right] \overrightarrow{dl}, \qquad (1)$$

где $\vec{J}$ – вектор плотности тока в воде;

σ – удельная электропроводность морской воды;

$\vec{V}_д$ – скорость движения датчика;

$\vec{V}_в$ – скорость движения воды;

$\vec{B}$ - индукция магнитного поля Земли;

$\overrightarrow{dl}$ - элемент длины датчика,

выражением для датчика, совершающего помимо поступательного вращательное движение,

$$\vec{V}_д = + \overrightarrow{\Omega} \times \vec{l} \qquad (2)$$

где $\vec{V}_0$ - скорость поступательного движения датчика;

$\vec{\Omega}$ - угловая скорость вращения;

$\vec{l}$ - измерительная база датчика.

Предполагается, что все скорости много меньше скорости света и релятивистские поправки незначительны. Подставляя (2) в (1), получаем

$$u(t) = \int_l \left[\frac{\vec{J}}{\sigma} + \left(\vec{V}_д - \vec{V}_в\right) \times \vec{B} + \left(\vec{\Omega} \times \vec{l}\right) \times \vec{B}\right] \vec{dl}, \quad (3)$$

Или с учетом того, что

$$\left(\vec{\Omega} \times \vec{l}\right) \times \vec{B} = \vec{l}\left(\vec{\Omega} \cdot \vec{B}\right) - \vec{\Omega}\left(\vec{l} \cdot \vec{B}\right), \quad (4)$$

выражение запишется в виде

$$u(t) = \int_l \left[\frac{\vec{J}}{\sigma} + \left(\vec{V}_д - \vec{V}_в\right) \times \vec{B} + \vec{l}\left(\vec{\Omega} \cdot \vec{B}\right) - \vec{\Omega}\left(\vec{l} \cdot \vec{B}\right)\right] \vec{dl}. \quad (5)$$

Выражение (5) позволяет проанализировать помехи, появляющиеся при сложном движении датчика в морской воде, и обосновать требования к датчикам напряженности электрического поля в сверх низкочастотном диапазоне сигналов.

Введем систему координат x, y, z с соответствующими единичными векторами $\vec{i}$, $\vec{j}$, $\vec{k}$, совпадающими с координатами магнитного поля Земли (Юг, Восток, верх). Тогда вектор магнитной индукции $\vec{B}$ магнитного поля Земли будет иметь составляющие B_x, $0, B_z$; вектор напряженности электрического поля морской среды – соответственно $E_x = J_x/\sigma$, $E_y = J_y/\sigma$, $E_z = J_z/\sigma$ и вектора скорости соответственно V_x, V_y, V_z. Составляющая напряжения на измерительных электродах $u(t) = \int_l \frac{\vec{J}}{\sigma}\vec{dl}$ является полезным сигналом и позволяет измерить напряженность электрического поля в морской воде. Составляющая $u(t) = \int_l \left[(V_0 - V_в) \times \vec{B}\right]\vec{dl}$ - это сигнал помехи, для уменьшения влияния которой следует уменьшить линейные размеры базы электродных датчиков, стабилизировать скорость движения датчиков в случае измерений с подвижного носителя. Слагаемые подынтегрального выражения по координатным осям представим в следующем виде:

$$E^1_{пx}dx = (V_0 - V_в)_y B_z dx;$$
$$E^1_{пy}dy = [(V_0 - V_в)_z B_x - (V_0 - V_в)_x B_z]dy, \quad (6)$$
$$E^1_{пz}dz = -(V_0 - V_в)_y B_x dz,$$

где $\vec{E}^1_п$ - вектор эквивалентного поля помех, соответствующий рассматриваемой составляющей. Анализ выражений (6) показывает, что помеха, обусловленная относительным движением датчика и воды, полностью исчезает в двух случаях:

1. при $V_0 - V_в = 0$, что просто выполняется, например, для вертикального зонда в автономном режиме или горизонтального зонда с нулевой плавучестью в заданном слое воды;

2. в случае, когда датчик не имеет составляющей измерительной базы в рассматриваемом направлении, например, для датчика с компланарно расположенными в горизонтальной плоскости электродами $E^1_{пz}dz$ =0 т.к. $dz = 0$.

Составляющие, связанные с вращением измерительной базы датчика в пространстве, также дают сигнал помех при измерении электрического поля в море, что обусловлено перемещением датчика в магнитном поле Земли.

Рассмотрим основную схему движения датчика с двумя симметрично расположенными относительно оси вращения электродами, представленную на рис.1.

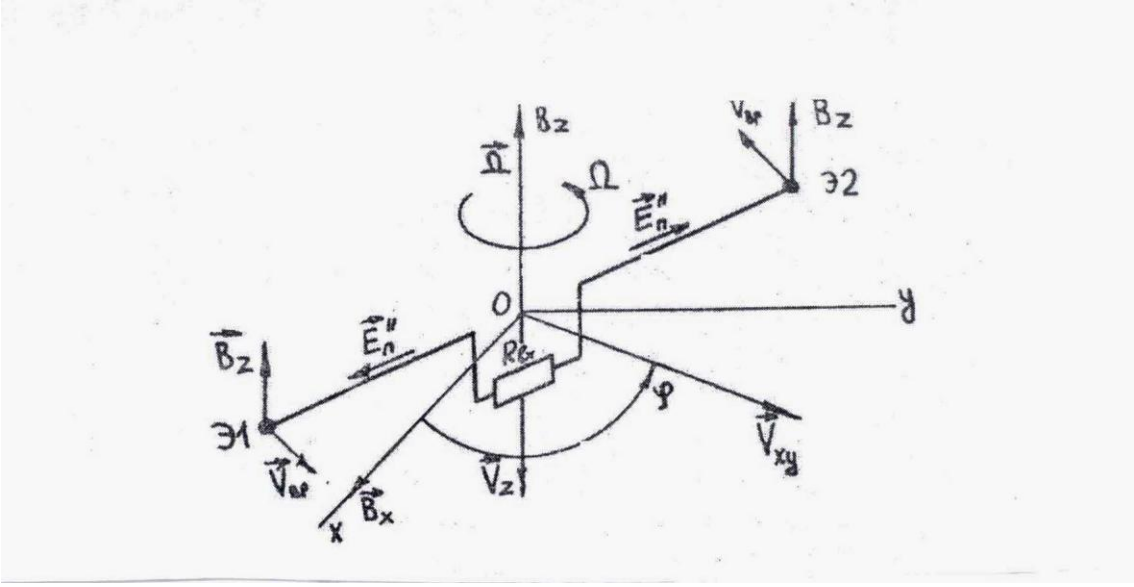


Рис.1. Схема движения датчика с двумя симметрично расположенными относительно оси вращения электродами

Электроды вращаются в горизонтальной плоскости (плоскости x0y) с постоянной угловой скоростью Ω вокруг вертикальной оси, проходящей через центр датчика. Вращательное движение измерительной базы датчика в магнитном поле Земли будет создавать в соответствии с выражением $\vec{E}_{\text{п}}^{II} = \vec{V}_{\text{вр}} \times \vec{B}_z$ (здесь $\vec{E}_{\text{п}}^{II}$ – вектор эквивалентного поля помех) напряженность электрического поля в каждой половине измерительной базы с направлениями в соответствии с рис.1. Это означает, что разность потенциалов между электродами, равная линейному интегралу от напряженности поля $\vec{E}_{\text{п}}^{II}$ по направлению $\vec{dl}$, рана нулю. Однако помеха с частотой модуляции может иметь место для данного датчика в том случае, если датчик будет иметь составляющие скорости поступательного движения в плоскости x0y ($\vec{V}_{xy} = \vec{V}_{0xy} - \vec{V}_{\text{в}xy}$) и по направлению z ($\vec{V}_z = \vec{V}_{oz} - \vec{V}_{\text{в}z}$). Тогда в соответствии с (6) , будем иметь

$$u(t) = V_{xy} \sin\varphi B_z \, l \cos\Omega t + \left(V_z B_x - V_{xy} \cos\varphi \, B_z\right) l \sin\Omega t, \qquad (7)$$

где $V_{xy} \sin\varphi$ - составляющая поступательной скорости по оси *y*;

$V_{xy} \cos\varphi$ - составляющая поступательной скорости по оси *x;*

φ - угол между направлением вектора скорости $\vec{V}_{xy}$ и осью *x*;

t- время (t = 0, когда $\vec{l}$ совпадает с осью *x)*.

Уменьшение влияния помех данного вида может быть реализовано соответствующими схемными решениями или учетом их при последующей обработке и анализе. Большее затруднение вызывает создание конструкции рассматриваемого датчика,

т.к. устранение скользящих контактов представляется возможным лишь в автономных устройствах, применение которых, особенно при первичных испытаниях датчиков и исследовательских работах не всегда оправдано.

Рассмотрим поэтому схему датчика с одним вращающимся электродом, второй электрод расположен на оси вращения. Расписывая подынтегральное выражение

$$u = \int [(\vec{\Omega} \cdot \vec{B})\vec{l} - (\vec{l} \cdot \vec{B})\vec{\Omega}]\, \overrightarrow{dl},$$

по координатным осям, получим

$$u(t) = \int \left[\left(\Omega B \cos\left(\widehat{\vec{\Omega}\vec{B}}\right) x - lB \cos\left(\widehat{\vec{l}\vec{B}}\right) \Omega_x\right) dx + \left(\Omega B \cos\left(\widehat{\vec{\Omega}\vec{B}}\right) y - lB \cos\left(\widehat{\vec{l}\vec{B}}\right) \Omega_y\right) dy + \left(\Omega B \cos\left(\widehat{\vec{\Omega}\vec{B}}\right) z - lB \cos\left(\widehat{\vec{l}\vec{B}}\right) \Omega_z\right) dz\right] \quad (8)$$

Для случаев а, б, в, г (рис.2) соответственно

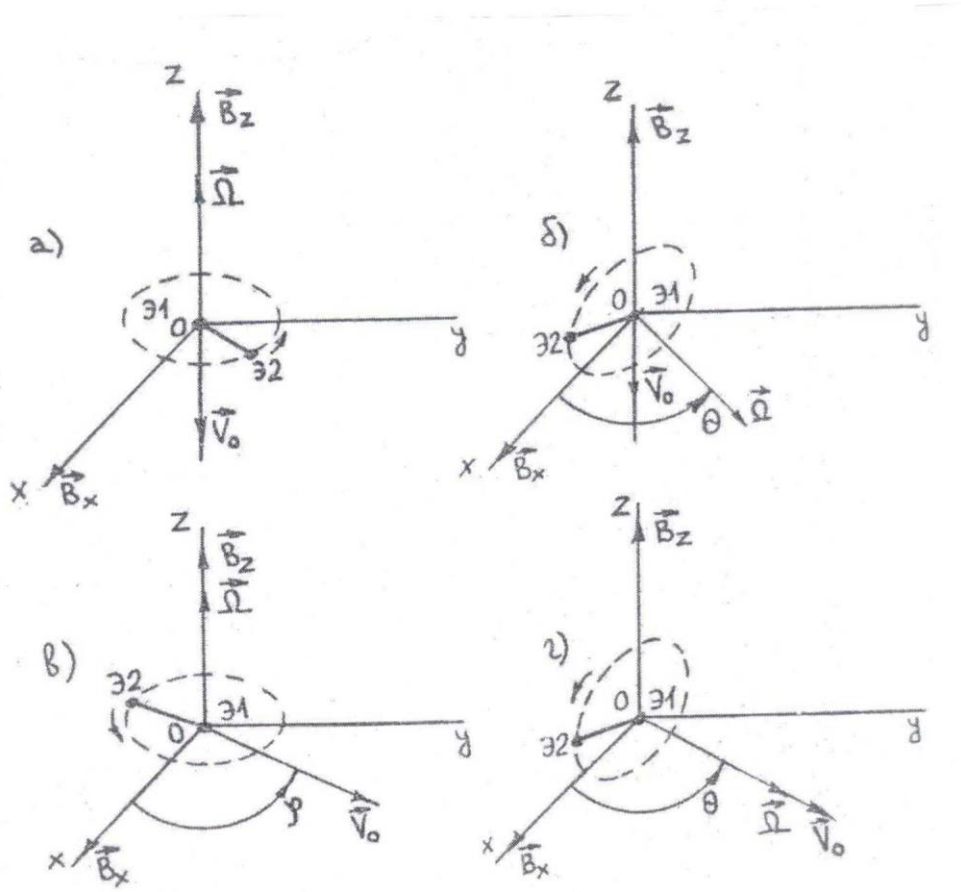


Рис.2 Схемы движения датчика с одним вращающимся электродом, второй электрод расположен на оси вращения

а) составляющие векторов $\overrightarrow{B}\ (B_x, 0, B_z)$, $\vec{\Omega}(0,0,\Omega)$, $\vec{l}(l\cos\Omega t, l\sin\Omega t, 0)$, $\vec{V}_0\ (0,0,-V_0)$,

$$u(t) = \Omega B_z \int [xdx + ydy] \quad = \Omega B_z \int_0^{l\cos\Omega t} xdx + \Omega B_z \int_0^{l\sin\Omega t} ydy = \frac{B_z \Omega l^2}{2} (cos^2\Omega t + sin^2\Omega t) == \frac{B_z \Omega l^2}{2} \quad (9а)$$

или с учетом вертикального движения датчика

$$u(t) = \frac{B_z \Omega l^2}{2} + B_x V_0 l \cos\left(\Omega t - \frac{\pi}{4}\right); \quad (9б)$$

б) составляющие векторов $\vec{B}$

$(B_x, 0, B_z)$, $\vec{\Omega}(\Omega\cos\theta, \Omega\sin\theta, 0)$; $\vec{l}(l\sin\theta\sin\Omega t, l\cos\theta\sin\Omega t, l\cos\Omega t)$, $\vec{V}_0(0,0,-V_0)$

где θ - угол между осью x и вектором $\vec{\Omega}$ (рис.2б)

$$u(t) =$$

$$\int\left[\Omega\cos\theta B_x\vec{l} - (B_x l\sin\theta\sin\Omega t + l\cos\Omega t B_z)\vec{\Omega}\right]\vec{dl} = \frac{\Omega B_x l^2}{2}\cos\theta(1 - 2\sin^2\Omega t\sin^2\theta) -$$

$$- {\Omega l^2 B_z}/{4}\sin 2\theta\sin 2\Omega t \quad (10а)$$

или с учетом вертикального движения датчика

$$u(t) = \frac{\Omega l^2}{2} B_x\cos\theta(1 - 2\sin^2\theta\sin^2\Omega t) - \frac{\Omega l^2}{4} B_z\sin 2\theta\sin 2\Omega t - V_0 B_x l\cos\theta\sin\Omega t; \quad (10б)$$

в) составляющие векторов $\vec{B}$

$$(B_x, 0, B_z), \vec{\Omega}\,(0,0,\Omega), (l\cos\Omega t, l\sin\Omega t, 0), \vec{V}_0\,(V_0\cos\varphi, V_0\sin\varphi, 0),$$

где φ –угол между осью x и вектором $\vec{V}_0$,

$$u(t) = \int \Omega B\vec{l}\,\vec{dl} = {\Omega l^2 B_z}/{2} \quad (11а)$$

или с учетом горизонтального движения датчика

$$u(t) = {\Omega l^2 B_z}/{2} + V_0 l B_z\sin(\Omega t + \varphi)\,; \quad (11б)$$

г) составляющие векторов $\vec{B}$

$$(B_x, 0, B_z), \vec{\Omega}\,(\Omega\cos\theta\,, \Omega\sin\theta, 0), \vec{l}(l\sin\theta\sin\Omega t, l\cos\theta\sin\Omega t, l\cos\Omega t),$$

$$\vec{V}_0(V_0\cos\theta, V_0\sin\theta, 0)$$

$$u(t) = {\Omega l^2 B_x}/{2}\cos\theta(1 - 2\sin^2\theta\sin^2\Omega t) - {\Omega l^2 B_z}/{4}\sin 2\theta\sin 2\Omega t \quad (12а)$$

или с учетом горизонтального движения датчика

$$u(t) = {\Omega l^2 B_x}/{2}\cos\theta(1 - 2\sin^2\theta\sin^2\Omega t) - {\Omega l^2 B_z}/{4}\sin 2\theta\sin 2\Omega t + V_0 l B_z\sin\Omega t -$$

$$-V_0 l B_x\sin\theta\cos\Omega t. \quad (12б)$$

Анализ выражений (9-12) позволяет выявить основные помехи, связанные с вращением электродного датчика с базой l в магнитном поле Земли. Оценим, например, погрешности, создаваемые постоянной и переменной составляющими выражения (9б). При $\Omega = 2\pi\frac{1}{\text{сек}}$ B_x=0,2· 10^{-4}Тл, B_z=0,5· 10^{-4}Тл, l = 0,5 м и V_0=1${}^{\text{м}}/_{\text{с}}$ для постоянной составляющей напряжения на выходе датчика в режиме холостого хода имеем

$$\frac{B_z\Omega l^2}{2} = \frac{2\pi\cdot 0{,}25\cdot 10^{-2}\cdot 0{,}5\cdot 10^{-4}}{2} = 0{,}4\ мкВ$$

а для максимального значения переменной составляющей

$$B_x V_0 l = 0{,}2\cdot 10^{-4}\cdot 1\cdot 0{,}5 = 10\text{мкВ}.$$

Очевидно, что помехи постоянных и переменных составляющих в выражениях (10-12) имеют тот же порядок, что и приведенные значения, и, кроме того, имеют порядок напряжений, снимаемых с электродов датчика при измерении электрического поля напряженностью в доли-единицы мкВ/м (при E=1 мкВ/м и l=0,5м El=0,5 мкВ). С учетом того, что частота изменения помехи совпадает с частотой модуляции измеряемого сигнала, их разделение может представлять сложную задачу.

Анализ выражений (9-12) позволяет выделить как наиболее перспективную для применения в реальных разработках схему, представленную на рис.2а. Действительно, схема обработки сигналов датчика позволяет легко избавиться от постоянной составляющей помехи, применяя на входе либо согласующие трансформаторы, либо избирательные усилители. Наиболее серьезной проблемой остается помеха $B_x V_0 l \cos\left(\Omega t - \frac{\pi}{4}\right)$, для уменьшения влияния которой возможны различные конструктивные и схемные решения.

Во всех остальных схемах рис.2 помимо постоянных составляющих и помех с частотой Ω появляются дополнительные помехи, связанные как с двумя составляющими магнитного поля Земли, так и с углом θ, который в процессе измерения может менять свою величину во времени. Необходимо также иметь в виду, что горизонтальная скорость перемещения датчика $\vec{V}_0$ (рис.2в,г) будет являться функцией либо горизонтальных течений (для датчиков в автономных режимах), либо скорости носителя (для датчиков, установленных на подвижных носителях). Таким образом, для измерения напряженности электрических полей в сверхнизкочастотном диапазоне наиболее перспективным представляется применение модуляционных датчиков в автономных или неавтономных устройствах вертикального зондирования. При этом необходимо иметь в виду, что механическая модуляция в таких устройствах не будет требовать, как правило, дополнительных источников энергии для приводов, а осуществление самой модуляции не обязательно должно быть связано с вращением электродов в пространстве.

2. Базовые модели первичных преобразователей с изменением в пространстве измерительной базы

Стремление уменьшить помехи, связанные с вращением измерительных электродов в магнитном поле Земли, а также желание упростить конструкцию (избежать скользящих контактов, связанных с вращающимися электродами) и снизить гидродинамические помехи, возникающие при движении датчика в морской среде, привело к разработке первичных преобразователей с механической модуляцией - гидромодуляционных преобразователей .с «изменяющейся» и «вращающейся» измерительной базой[2].

Рассмотрим две модели первичных преобразователей датчика, каждая из которых содержит (рис.3) соединенный с механическим приводом диэлектрический корпус 1, выполненный в виде цилиндра с высотой много меньшей радиуса основания, и два измерительных электрода. Один из них – внутренний электрод 2 – выполнен в виде

плоского проводящего диска или кольца и установлен неподвижно внутри корпуса. Второй электрод 3 установлен с внешней стороны корпуса вблизи основания. В основании на его периферии выполнено контактное отверстие 4 на расстоянии от оси вращения, равном радиусу внутреннего электрода.

Для первичного преобразователя, представленного на рис. 3 а) и б), который можно назвать с «изменяющейся» измерительной базой, внешний электрод 3 установлен неподвижно на том же расстоянии от оси вращения, что и контактное отверстие. Его форма и размеры также совпадают с формой и размерами контактного отверстия.

Первичный преобразователь, представленный на рис.3 в) и г), который будем называть с «вращающейся» измерительной базой, имеет аналогичную конструкцию и отличается тем, что второй электрод 3 установлен неподвижно с внешней стороны корпуса напротив центра основания.

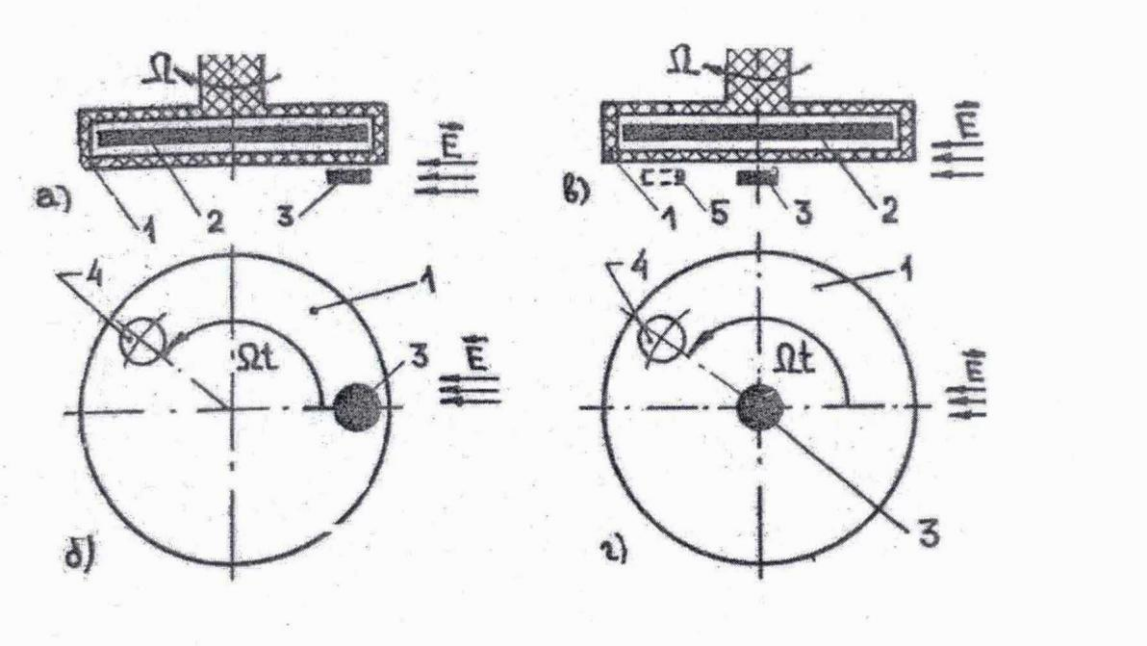


Рис.3 Модели первичного преобразователя

Процесс преобразования информации рассматриваемыми моделями заключается в том, что под действием внешнего электрического поля между электродами возникает разность потенциалов. Причем для внутренних электродов воспроизводятся электрические потенциалы, соответствующие их значениям в точках расположения контактных отверстий. При этом потенциал внешнего электрода будет равен среднему значению потенциалов точек поверхности электрода и, следовательно, потенциалу центра электрода. Аналогичные допущения следует принять и для контактных отверстий, которые выступают в базовых моделях как мнимые электроды. В этом случае напряжение на измерительных электродах в режиме холостого хода не зависит от формы внешних электродов и контактных отверстий и определяется соотношением $u_{xx} = \int_l \vec{E}\,\vec{dl}$, в котором

$$\vec{E} = E_x\vec{i} + E_y\vec{j},\ \alpha = arctg\,{}^{E_y}\!/_{E_x},\ \vec{l} = r(1-\cos\Omega t)\vec{i} + \mathrm{r}\sin\Omega t\vec{j},$$

где r – радиус, равный расстоянию от центра основания базовых моделей до центра контактного отверстия. Эти соотношения позволяют получить следующие выражения для эквивалентной измерительной базы $l_{\text{экв}}$ и напряжения на измерительных электродах в режиме холостого хода u_{xx} для рассматриваемых базовых моделей (рис.3):

а) для модели с «изменяющейся» измерительной базой

$$l_{\text{экв}}^{\text{изм}}(t) = r(1-\cos\Omega\, t).$$

$$u_{xx}(t) = rE[\cos\alpha - \cos(\Omega t - \alpha)]; \qquad (13)$$

где α - угол между направлением вектора напряженности электрического поля и осью x,

б) для модели с «вращающейся» измерительной базой

$$l_{\text{экв}}^{\text{вр}} = r\cos\Omega t,$$

$$u_{xx}(t) = rE\cos(\Omega t - \alpha)\ . \qquad (14)$$

Для более точного анализа рассматриваемых преобразователей следует обратиться к их схеме замещения.

В качестве схемы замещения модуляционного датчика выбрана (рис.4) общепринятая эквивалентная схема замещения двухэлектродного потенциального датчика [3] с дополнительно введенными элементами: $\bar{u}_{\text{гд}}$ – источник, характеризующий среднеквадратичное значение шумов, связанных с гидродинамическими эффектами вращения диэлектрического корпуса; $\bar{u}_{\text{эм}}$- источник, характеризующий среднеквадратичное значение помех электромагнитного происхождения.

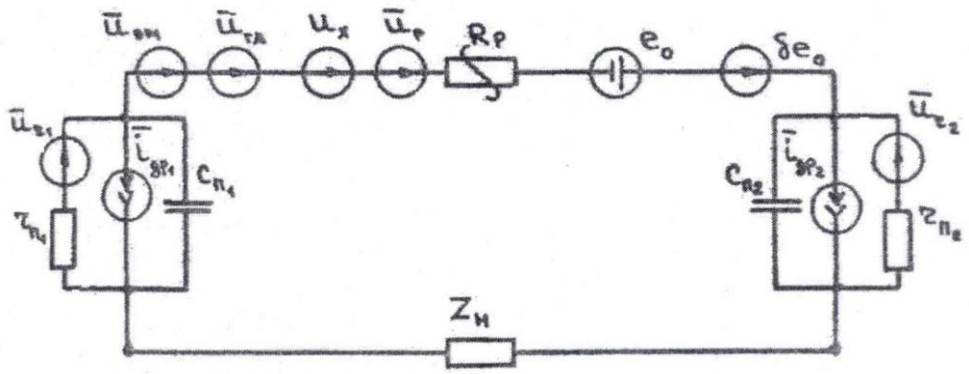


Рис.4 Схема замещения модуляционного датчика

Остальные элементы схемы те же что и в [3]. Одним из основных параметров схемы замещения является сопротивление растекания между электродами по электролиту R_p.

В общем случае его величину можно считать зависящей от взаимного положения измерительного электрода и контактного отверстия. Представим полную величину сопротивления растекания между электродами для базовых моделей в виде суммы двух составляющих:

$$R_p = R_p^{`} + R_p^{``} \quad (15)$$

где $R_p^{`}$ - сопротивление растекания участка: внешний электрод 3 – воображаемый внешний электрод 5 (рис. 3в) с формой и размерами, совпадающими с формой и размерами внешнего электрода (контактного отверстия); $R_p^{``}$- сопротивление растекания участка: внешний воображаемый электрод - контактное отверстие - внутренний электрод. Величина последнего сопротивления постоянна для обеих моделей и легко может быть вычислена (по крайней мере, по максимальному значению, как сопротивление цилиндра морской воды). Величина $R_p^{`}$ постоянна для модели с «вращающейся» измерительной базой из-за симметричного по всем направлениям расположения внешнего электрода и контактного отверстия. Напротив, для модели с «изменяющейся» измерительной базой величина этого сопротивления растекания меняется синхронно с изменением эквивалентной базы (13), т.е. в соответствии с выражением

$$R_{p\,\text{из}}^{`} = R_{p0}^{`}(1 - k\cos\Omega t), \quad (16)$$

где $R_{p\,\text{из}}^{`} = R_{p0}^{`}$ при $\cos\Omega t = 0$, а $k \leq 1$.

Переменная величина сопротивления растекания может служить причиной возникновения тепловых шумов, промодулированных частотой вращения, и не позволяет обеспечить передачу максимальной мощности от первичного преобразователя в нагрузку, так как выполнение известного равенства внутреннего сопротивления источника сигнала и сопротивления нагрузки (в данном случае $R_p = R_\text{н}$) имеет место лишь при одном мгновенном положении внешнего электрода и контактного отверстия. Это уменьшает отношение сигнал/шум преобразователя с «изменяющейся» базой по сравнению с преобразователем с «вращающейся» базой, в котором равенство $R_p = R_\text{н}$ может быть выполнено для всех относительных положений внешнего электрода и контактного отверстия, что определяет преимущество модели с «вращающейся» измерительной базой.

Оптимизация конструктивных параметров базовой модели первичного преобразователя

Для датчика с «вращающейся» измерительной базой определим оптимальные соотношения для его конструктивных размеров. В качестве критерия оптимизации выберем величину максимальной мощности, отдаваемой датчиком в согласованную нагрузку

$$P_c = \frac{1}{4}\frac{U_x^2}{R_p} = \frac{1}{4}\frac{E_0^2 r^2 cos^2\Omega t}{R_p} = \frac{1}{4}E_0^2 cos^2\Omega t\frac{r^2}{R_p} \quad (17)$$

Как следует из (17), мощность в согласованной нагрузке пропорциональна отношению:

$$F = \frac{r^2}{R_p} \to max \quad (18)$$

Следует отметить также, что условие (18) совпадает с условием максимального отношения сигнал/шум первичного преобразователя датчика:

$$\frac{U_x^2}{U_{шд}^2} = \frac{E_0^2 r^2 cos^2 \Omega t}{4\, kTR_д \Delta f} = \frac{E_0^2 cos^2 \Omega t}{4kT\Delta f} F \to max \qquad (19)$$

где $kT\Delta f$- произведение постоянной Больцмана, температуры в градусах Кельвина и полосы пропускания измерительного канала.

Решение краевой задачи для определения сопротивления растекания реальной конструкции первичного преобразователя является довольно сложным и трудоемким и, вследствие негладких граничных поверхностей, получение аналитического выражения для сопротивления растекания крайне затруднительно. Выберем идеализированную расчетную модель первичного преобразователя, представленную на рис.5.

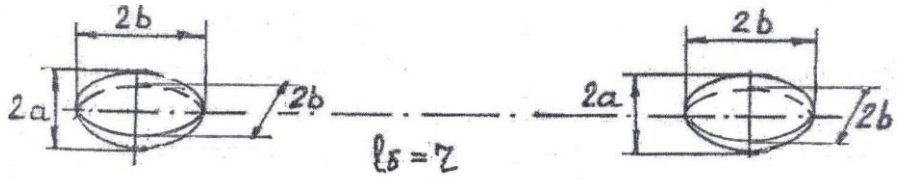


Рис.5 Расчетная модель первичного преобразователя

Расчетная модель представляет собой систему двух сфероидальных электродов с размерами радиуса электрода равного b, расположенных на расстоянии $l_б = r$. Электроды расположены в одной плоскости в однородной проводящей среде с удельной электропроводностью σ.

Если допустить, что измеряемое поле также однородно, толщина электродов мала $(a \to 0)$ и смещение электродов по вертикали друг относительно друга отсутствует, то из [3] следует, что

$$R_p^1 = \frac{arc\cos\frac{a}{b} - \frac{\sqrt{b^2-a^2}}{r}}{2\pi\sigma\sqrt{b^2-a^2}} \qquad (20a)$$

или при a=0

$$R_p^1 = \frac{1{,}57 - {}^{b}/_{r}}{2\pi\sigma b} \qquad (20b)$$

Критерий F будет равен

$$F = 2\pi\sigma r^3 \frac{{}^{b}/_{r}}{1{,}57 - {}^{b}/_{r}} \qquad (21)$$

Максимум Fсоответствует максимуму ${}^{b}/_{r}$ для физически реализуемой модели первичного преобразователя. Так для $5b \le r$ $F = E_{max}$ при ${}^{b}/_{r} \approx 0{,}2$.

Методом средних потенциалов был также произведен расчет емкости системы двух электродов указанной выше модели. На основании существующей аналогии между емкостью и электрической проводимостью двух тел: $\frac{1}{R} = \frac{\sigma}{2}$C были получены значения сопротивления растекания, точно совпадающие со значениями, полученными по аппроксимирующим формулам (20). Рассмотренный первичный преобразователь датчика

с «вращающейся» измерительной базой для измерения напряженности электрического поля в проводящей среде был защищен авторским свидетельством [2] и прошел апробацию в натурных испытаниях.

Выводы

Анализ некоторых свойств среды, устройств для измерения напряженности электрических полей в проводящей (морской) среде и условий их взаимодействия позволяет сделать вывод о перспективности разработки датчиков напряженности электрического поля с механической модуляцией измерительной базы для измерений сверх низкочастотных и постоянных электрических полей морей и океанов.

Предложены базовые модели первичного преобразователя с «вращающейся» и с «изменяющейся» измерительной базой. Обосновано преимущество модели с «вращающейся» измерительной базой, для которой условие передачи максимума мощности в нагрузку выполняется для всех относительных положений внешнего электрода и контактного отверстия, что, следовательно, увеличивает отношение сигнал/ шум преобразователя.

Для модели с «вращающейся» измерительной базой определены оптимальные с точки зрения максимума мощности, отдаваемой в согласованную нагрузку, соотношения ее конструктивных размеров: так для $5b \leq l_б$ ${}^{b}/_{l_б} \approx 0{,}2$.

В дальнейшем предполагается провести анализ шумов гидродинамического и электромагнитного происхождения предложенных моделей, что позволит выбрать схему обработки сигналов первичных преобразователей модуляционных датчиков.

Список литературы

1. Акиндинов В.В., Нарышкин В.И., Рязанцев А.М. Электромагнитные поля в морской воде (обзор) // Радиотехника и электроника. 1976. Т. 21, вып. 5. С. 913-944.
2. Астахов Ю.А., Кочанов Э.С., Мисеюк О.И., Плаксин И.И., Салмин А.В. Устройство для измерения вектора напряженности электрического поля в проводящей среде: а. с. 1511726 СССР. 1989. Бюл. № 36.
3. Зимин Е.Ф., Кочанов Э.С. Измерение параметров электрических и магнитных полей в проводящих средах. М.: Энергоатомиздат, 1985. 256 с.
4. Зимин Е.Ф., Каспарян В.Г., Кочанов Э.С., Мирзоян Г.А. Метод измерения электрического поля в море в СНЧ- диапазоне с учетом шумов первичного преобразователя // Геомагнетизм и аэрономия. 1984. Т. 24, № 4. С. 662-666.
5. 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.

6. 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.
7. Зимин Е.Ф., Мисеюк О.И. Датчик напряженности электрического поля (варианты): пат. 2122223 РФ. 1998. Бюл. № 32.
8. Зимин Е.Ф., Кудин В.Н. Математические модели первичных преобразователей датчиков электрического поля в проводящих средах // Межвуз. сб. ст. Т. 44. М.: МЭИ, 1984. С. 48-54.
9. Smorodin B.L., Taraut A.V. Charge propagation in a low-conducting liquid under modulated electric field // IEEE International Conference on Dielectric Liquids (ICDL 2008). IEEE Publ., 2008. P. 1-4. DOI: 10.1109/ICDL.2008.4622515
10. Techaumnat B., Takuma T. Analysis of the electric field and force in an arrangement of a conducting sphere and a plane electrode with a dielectric barrier // IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation. 2006. Vol. 13, is. 2. P. 336-344. DOI: 10.1109/TDEI.2006.1624278

Science & Education of the Bauman MSTU
Electronic journal
ISSN 1994-0408

Science and Education of the Bauman MSTU, 2015, no. 07, pp. 254–268.

DOI: **10.7463/0715.0780965**

Received: 02.06.2015
Revised: 17.06.2015

© Bauman Moscow State Technical Unversity

Modulation Electric Field Intensity Sensor in a Conductive Medium

O.I. Miseyk[1,*]

[*] omiseyuk@mail.ru

[1]Bauman Moscow State Technical University, Moscow, Russia

Keywords: electrode, transducer, electric field intensity sensor, measuring base, model of the primary converter

The requirement to conduct measurements across the big water areas and in the ocean depths arises a problem of creating devices to measure an electric field, being either set on the high-speed mobile carriers, or implemented as the sounders, which investigate a vertical or horizontal structure of the electric field of ocean. Manufactured, designed, and hypothetical devices for measuring poor electric fields of the ocean were analyzed. The analysis allowed us to prove that there is a need in creation of modulation sensors (with modulation of a non-electric origin) either with periodically changing capabilities of measuring bases, or with space-changing (and therefore, time-changing) position of measuring base of primary converters, as the most effective in terms of allocation and measurement of the modulated signal from unmodulated noise.

The paper considers the mathematical models of modulation sensors of electric field intensity in the ultralow-frequency range, which are set on the mobile carriers. It justifies a choice of two basic models of primary converters with a change of the measuring base in space, i.e. with the "changing" base and with the "rotating" base. A feature of the offered models with vertical sounding is the minimum value of noise because of rotation of measuring electrodes in a magnetic field of Earth, and hydrodynamic noise. The paper shows that noise caused by the relative movement of sensor and water completely disappears in two cases:

1. for a vertical sounder in the autonomous mode or a horizontal sounder with zero buoyancy in the specified shape of water;

2. in a case when the sensor has no component of measuring base in the considered area, for example, for the sensor with in-line array of electrodes located in the horizontal plane.

The paper proves advantage of the model with "rotating" measuring base, which provides the maximum power transfer from the primary converter to loading for all relative positions of an external electrode and contact orifice. For the sensor with "rotating" measuring base, it defines optimum, in terms of a maximum, power transferred to the matched loading, and ratios of its constructive sizes.

References

1. Akindinov V.V., Naryshkin V.I., Ryazantsev A.M. Electromagnetic fields in seawater (review). *Radiotekhnika i elektronika = Communications Technology and Electronics*, 1976, vol. 21, is. 5, pp. 913-944. (in Russian).
2. Astakhov Yu.A., Kochanov E.S., Miseyuk O.I., Plaksin I.I., Salmin A.V. *Ustroistvo dlya izmereniya vektora napryazhennosti elektricheskogo polya v provodyashchei srede* [The device for measuring electric field intensity vector in a conducting medium]. Inventor's certificate USSR, no. 1511726, 1989. (in Russian).
3. Zimin E.F., Kochanov E.S. *Izmerenie parametrov elektricheskikh i magnitnykh polei v provodyashchikh sredakh* [Measurement of parameters of electric and magnetic fields in conducting media]. Moscow, Energoatomizdat Publ., 1985. 256 p. (in Russian).
4. Zimin E.F., Kasparyan V.G., Kochanov E.S., Mirzoyan G.A. Method of measuring electric field in sea in VLF - range taking into account noise of primary converter. *Geomagnetizm i aeronomiya*, 1984, vol. 24, no. 4, pp. 662-666. (in Russian).
5. Zimin E.F., Miseyuk O.I., Plaksin I.I., Sobisevich A.L. *Datchik vektora napryazhennosti elektricheskogo polya v provodyashchei srede* [Sensor of electric field intensity vector in a conducting medium]. Inventor's certificate RF, no. 2012894, 1995. (in Russian).
6. Zimin E.F., Miseyuk O.I., Plaksin I.I. Calculating electrode system parameters of electric field intensity multicomponent sensors for conductive media. *Vestnik MGTU im. N.E. Baumana. Ser. Estestvennye nauki = Herald of the Bauman Moscow State Technical University. Ser. Natural science*, 1998, no. 1, pp. 79-86. (in Russian).
7. Zimin E.F., Miseyuk O.I. *Datchik napryazhennosti elektricheskogo polya (varianty)* [Electric field sensor (options)]. Patent RF, no. 2122223, 1998. (in Russian).
8. Zimin E.F., Kudin V.N. Mathematical models of primary converters of the electric field sensor in conducting media. *Mezhvuz. sb. st. T. 44* [Intercollege collection of articles. Vol. 44]. Moscow, MEI Publ., 1984, pp. 48-54. (in Russian).
9. Smorodin B.L., Taraut A.V. Charge propagation in a low-conducting liquid under modulated electric field. *IEEE International Conference on Dielectric Liquids (ICDL 2008)*. IEEE Publ., 2008, pp. 1-4. DOI: 10.1109/ICDL.2008.4622515
10. Techaumnat B., Takuma T. Analysis of the electric field and force in an arrangement of a conducting sphere and a plane electrode with a dielectric barrier. *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation*, 2006, vol. 13, is. 2, pp. 336-344. DOI: 10.1109/TDEI.2006.1624278