

УМЕНЬШЕНИЕ ШУМА ДВИЖЕНИЯ МОРСКОГО ЭЛЕКТРОДНОГО ДАТЧИКА ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ПОЛЯ

© 2022 г. В. Г. Максименко*

*Фрязинский филиал Института радиотехники и электроники им. В.А. Котельникова РАН,
пл. Введенского, 1, Фрязино Московской обл., 141190 Российская Федерация*

**E-mail: max54@ms.ire.rssi.ru*

Поступила в редакцию 10.09.2021 г.

После доработки 14.09.2021 г.

Принята к публикации 25.09.2021 г.

Предложен метод уменьшения шума электродного датчика, предназначенного для измерения напряженности сверхнизкочастотного электрического поля в морской воде. Показано, что шум движения, обусловленный буксировкой, у датчика с секционированными вращающимися электродами может быть уменьшен на два порядка, что по сравнению с датчиком, имеющим неподвижные электроды, позволяет повысить чувствительность вплоть до значения, определяемого его тепловым шумом.

DOI: 10.31857/S0033849422020115

Электродный датчик электрического поля, представляющий собой пару электродов, расположенных на некотором расстоянии друг от друга, нашел широкое применение в геофизике при измерении напряженности низкочастотных электрических полей в океане. Он используется для изучения строения земной коры и разведки полезных ископаемых на шельфе, а также в системах радиосвязи с глубокопогруженными исследовательскими объектами в океане [1–4]. При обследовании акватории большой площади датчик буксируют за судном на кабель-тросе. При этом основной причиной, ограничивающей чувствительность электродного датчика, является специфический электродный шум, представляющий собой флуктуации потенциала электродов, возникающие вследствие движения электродов относительно жидкости. Величина шумового напряжения в выполненных нами экспериментах при движении датчика была на 10...20 дБ больше, чем в состоянии покоя [5–7]. Экспериментально и теоретически установлена связь пульсаций напряжения между электродами с пульсациями скорости жидкости относительно электродов [6–8]. Такие пульсации скорости могут возникать, например, вследствие вибраций буксирующего датчик кабель-троса, при пересечении датчиком турбулентных вихрей, возникающих в кильватерном следе буксирующего судна, и т.п. В работе [9] показано, что применение в датчике электродов, выполненных в виде двух идентичных плоских секций, вращающихся в одной плоскости вокруг общего геометрического центра, может повысить его чувствительность более

чем на порядок за счет уменьшения специфического электродного шума движения. При таком уменьшении шума движения чувствительность датчика ограничивается уже его тепловым шумом, который определяется сопротивлением датчика, следовательно, площадью двух секций электрода. Однако, как отмечалось в [9], увеличение размеров электрода сужает полосу частот, в которой осуществляется компенсация пульсаций потенциала на противоположных секциях электрода. При этом в [9] не учитывалось, что вторая секция электрода движется в турбулентном следе первой секции. Не учитывалось также, что при высокой скорости вращения турбулентность возникает и на поверхности одной секции электрода. Поэтому следует ожидать, что реальный выигрыш по уменьшению шума движения существенно меньше расчетного. Кроме того, как показано ниже, при вращении двухсекционного электрода в потоке жидкости потенциал электрода приобретает пульсацию с частотой вращения, которая является сильной помехой. Частотная фильтрация такой сильной помехи до приемлемого уровня представляет собой достаточно сложную техническую задачу.

Цель работы – создать электродный датчик с уменьшенным шумом движения и повышенной чувствительностью.

Устранение недостатков датчика, описанного в [9], и дальнейшее повышение его чувствительности достигнуты путем изменений, касающихся только электродов. Конструкция самого датчика

аналогична описанной в [10]. Для увеличения площади электрода и уменьшения теплового шума датчика секции электрода выполнены в виде диаметрально противоположных круговых секторов. Чтобы вторая секция при этом не находилась в турбулентном следе первой, секции расположены в параллельных плоскостях, перпендикулярных оси вращения. Также путем покрытия слоем диэлектрика из работы исключена область электрода, прилегающая к оси вращения, где линейная скорость точек поверхности электрода невелика. Чтобы это мало отражалось на рабочей площади электрода, исключен участок радиусом $0.3R$ (R – радиус сектора), что уменьшает площадь не более чем на 10%.

Пусть электрод, выполнен в виде двух расположенных в параллельных плоскостях диаметрально противоположных секторов 1 и 2, установленных на общей оси 3, вращающейся с угловой скоростью ω (рис. 1). В дальнейших расчетах полагаем, что электрический контакт с водой осуществляется только одной стороной электрода. Области поверхности электрода, покрытые диэлектриком и не имеющие электрического контакта с водой, на рис. 1 обозначены штриховкой. Датчик, а следовательно, и электрод, буксируется в неподвижной воде с постоянной скоростью \vec{V}_0 , вектор скорости направлен вдоль поверхности электрода (см. рис. 1). Как показано в работе [8], электродный шум движения обусловлен окислительными процессами на поверхности электрода, скорость которых зависит от скорости диффузии кислорода к поверхности электрода. Плотность потока диффузии кислорода на электрод зависит от толщины диффузионного слоя, которая модулируется скоростью набегающего на электрод пульсирующего потока. Пульсации потенциала электрода относительно воды (т.е. шум движения) пропорциональны пульсациям потока диффузии кислорода на электрод [8, 9]. Поэтому уменьшение шума движения можно оценивать по уменьшению пульсаций потока диффузии кислорода к поверхности электрода при одинаковых прочих условиях.

Скорость относительно жидкости произвольной точки M_1 поверхности электрода верхнего по рис. 1 сектора, находящейся на расстоянии r от оси вращения, определяется формулой, известной из работы [9]:

$$V = \omega r \sqrt{1 + \left(\frac{V_0}{\omega r}\right)^2 - 2 \frac{V_0}{\omega r} \sin \varphi}, \quad (1)$$

где φ – угловая координата точки M_1 , считая от вертикальной оси на рис. 1. Вектор \vec{U} на рис. 1 – это скорость точки M_1 относительно неподвижной воды при вращении электрода, по модулю

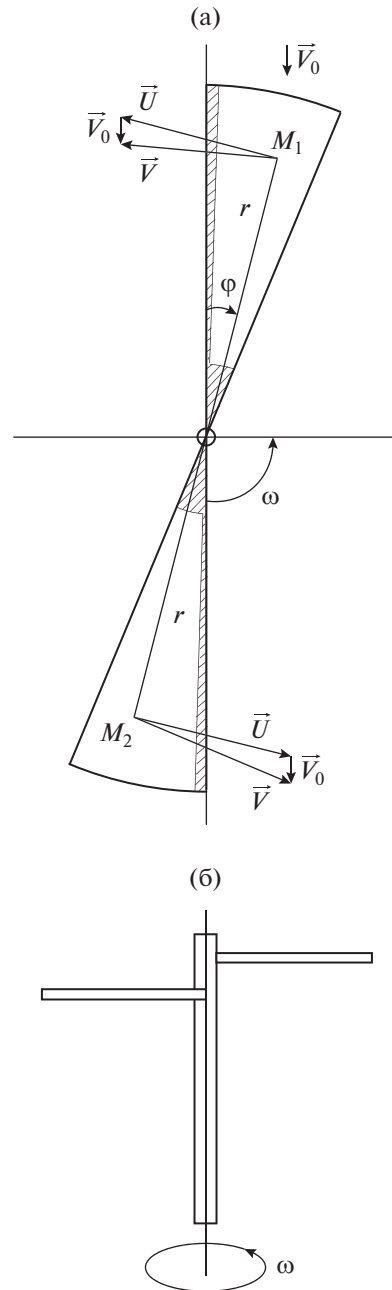


Рис. 1. Двухсекционный вращающийся электрод: вид сверху (а) и сбоку (б).

она равна ωr . Для нижнего сектора в диаметрально противоположной точке M_2 имеем

$$V = \omega r \sqrt{1 + \left(\frac{V_0}{\omega r}\right)^2 + 2 \frac{V_0}{\omega r} \sin \varphi}. \quad (2)$$

Если $\omega r \gg V_0$, то можно считать, что вектор \vec{V} перпендикулярен к радиусу r . Расстояние от края сектора до точки M_1 равно длине дуги $l = r(\varphi - \varphi_0)$, где φ_0 – угловая координата края сектора. Толщина диффузионного слоя на гладкой

полубесконечной пластинке, которая ламинарно обтекается потоком жидкости, имеющим скорость \vec{V}_0 , определяется формулой из работы [11]:

$$\delta \approx 3 \left(\frac{D}{\nu} \right)^{1/3} \sqrt{\frac{\nu l}{V_0}}, \quad (3)$$

где l – расстояние от передней кромки пластинки до точки наблюдения (в нашем случае до точки M_1), $\nu = 10^{-6} \text{ м}^2/\text{с}$ – кинематическая вязкость электролита, $D = 2.6 \times 10^{-9} \text{ м}^2/\text{с}$ – коэффициент диффузии атомов кислорода. Для электрода на рис. 1 в (3) вместо скорости \vec{V}_0 следует использовать скорость \vec{V} , которая определяется формулами (1) и (2). Плотность потока диффузии (моль/м² с) кислорода к поверхности верхнего сектора электрода с учетом (1)–(3) [11] вычисляется по формуле

$$j(r; \varphi) = \frac{Dc_0}{\delta(r; \varphi)} = \frac{Dc_0}{3} \left(\frac{\nu}{D} \right)^{1/3} \frac{\sqrt{\omega} \sqrt[4]{1 + \left(\frac{V_0}{\omega r} \right)^2 - 2 \frac{V_0}{\omega r} \sin \varphi}}{\sqrt{\varphi - \varphi_0}}, \quad (4)$$

где c_0 – концентрация кислорода в толще электролита. Типичная концентрация атомов кислорода при температуре 20°C для открытой воды равна $c_0 = 0.5 \times 10^{-3}$ моль/л. Поток диффузии (моль/с) на поверхность электрода, размер которого в направлении вектора скорости набегающего потока жидкости много больше толщины диффузионного слоя δ , можно вычислить интегрированием плотности потока j по всей площади электрода [11]. На передней кромке электрода толщина диффузионного слоя минимальна, поэтому здесь плотность потока диффузии максимальна. Целесообразно кроме области радиусом $0.3R$, прилегающей к оси вращения, исключить из работы также секторальную область электрода вблизи передней кромки с углом, равным 0.1 от угла всего сектора, чтобы это не слишком уменьшало площадь электрода.

Необходимо иметь в виду, что развитая в [11] теория конвективной диффузии к плоскому электроду в потоке жидкости, на которой основаны наши расчеты, справедлива для ламинарного обтекания электрода. У реального неподвижного плоского электрода, обтекаемого потоком воды со скоростью V_0 , на его передней кромке формируется пограничный слой, который характерен ламинарным движением жидкости. Однако по мере удаления от передней кромки толщина пограничного слоя возрастает согласно выражению

$$\delta_0 \approx 3\sqrt{\nu l/V_0} \quad (5)$$

(это на порядок больше толщины диффузионного слоя δ) и на некотором расстоянии $l_{кр}$ от передней кромки достигает такого значения, при котором число Рейнольдса

$$\text{Re} = V_0 \delta_0 / \nu \quad (6)$$

достигает критического значения $\text{Re}_{кр} = 1500$, при котором ламинарное течение переходит в турбулентное [11]. Для быстро вращающегося электрода роль скорости V_0 в (5) и (6) выполняет скорость $U = \omega r$. Пусть $\omega R = 15V_0$, тогда можно считать, что практически на всей поверхности электрода условие $\omega r \gg V_0$ выполняется. Потребуем, чтобы даже на наибольшем расстоянии $r = R$ от оси вращения электрода не возникла турбулентность. Из (5) и (6) получаем, что угловой размер сектора электрода равен

$$\varphi \leq 25 \times 10^4 \nu / \omega R^2. \quad (7)$$

Если в (7) вместо ωR подставить $15V_0$, то получим при $\nu = 10^{-6} \text{ м}^2/\text{с}$

$$\varphi \leq 1/60 V_0 R. \quad (8)$$

При $R = 0.02 \text{ м}$ и скорости потока $V_0 = 2 \text{ м/с}$ получаем $\omega = 1500 \text{ с}^{-1}$ и максимальный угол сектора 22.2° .

Пусть электрод имеет две секции с углом 22.5° , который практически равен максимальному. Вычислим поток диффузии на электрод при восьми угловых положениях: левая кромка верхнего сектора образует угол φ_0 с вертикальной осью (см. рис. 1), равный $0; \pi/8; \pi/4; 3\pi/8; \pi/2; 5\pi/8; 3\pi/4; \pi$. В общем случае поток диффузии на верхний сектор вычисляется по выражению

$$I = \frac{Dc_0}{3} \left(\frac{\nu}{D} \right)^{1/3} \sqrt{\frac{\omega}{\nu}} \times \int_{0.3R}^R \int_{\varphi_0 + \pi/80}^{\varphi_0 + \pi/8} \frac{\sqrt[4]{1 + \left(\frac{V_0}{\omega r} \right)^2 - 2 \frac{V_0}{\omega r} \sin \varphi}}{\sqrt{\varphi - \varphi_0}} r dr d\varphi. \quad (9)$$

Сделаем замену переменной: $r/R = t$. В первом положении ($\varphi_0 = 0$) получаем

$$I_1 = \frac{Dc_0}{3} \left(\frac{\nu}{D} \right)^{1/3} \sqrt{\frac{\omega R^2}{\nu}} \times \int_{0.3}^1 \int_{\pi/80}^{\pi/8} \frac{\sqrt[4]{1 + \left(\frac{V_0}{\omega R t} \right)^2 - 2 \frac{V_0}{\omega R t} \sin \varphi}}{\sqrt{\varphi}} t dt d\varphi. \quad (10)$$

Таблица 1. Значения интегралов $J_{1,2}, J_{3,4}, J_{5,6}, J_{7,8}, J_{9,10}, J_{11,12}, J_{13,14}, J_{15,16}$ и $J'_{1,2} + J'_{3,4} + J'_{5,6} + J'_{7,8} + J'_{9,10} + J'_{11,12} + J'_{13,14} + J'_{15,16}$ для восьми угловых положений электрода при $R = 0.02$ м, $\omega = 1500$ с⁻¹ и двух значениях V_0

φ_0	J при	
	$V_0 = 2$ м/с	$V_0 = 2.02$ м/с
0	$J_{1,2} = 0.78198425$	$J'_{1,2} = 0.782026855$
$\pi/8$	$J_{3,4} = 0.781112663$	$J'_{3,4} = 0.781138128$
$\pi/4$	$J_{5,6} = 0.779829179$	$J'_{5,6} = 0.779828948$
$3\pi/8$	$J_{7,8} = 0.778883646$	$J'_{7,8} = 0.778864116$
$\pi/2$	$J_{9,10} = 0.778853977$	$J'_{9,10} = 0.778833834$
$5\pi/8$	$J_{11,12} = 0.779758757$	$J'_{11,12} = 0.779757098$
$3\pi/4$	$J_{13,14} = 0.781043838$	$J'_{13,14} = 0.78106794$
π	$J_{15,16} = 0.781956183$	$J'_{15,16} = 0.781998241$

Двойной интеграл в (10) обозначим через J_1 :

$$J_1 = \int_{0.3}^1 \int_{\pi/80}^{\pi/8} \frac{\sqrt{1 + \left(\frac{V_0}{\omega R t}\right)^2 - 2 \frac{V_0}{\omega R t} \sin \varphi}}{\sqrt{\varphi}} t dt d\varphi. \quad (11)$$

Для нижней секции электрода в соответствии с (2) интеграл имеет вид

$$J_2 = \int_{0.3}^1 \int_{\pi/80}^{\pi/8} \frac{\sqrt{1 + \left(\frac{V_0}{\omega R t}\right)^2 + 2 \frac{V_0}{\omega R t} \sin \varphi}}{\sqrt{\varphi}} t dt d\varphi. \quad (12)$$

Поток диффузии кислорода на весь двухсекционный электрод (см. рис. 1) вычислим по формуле

$$\begin{aligned} I_{1,2} &= \frac{Dc_0}{3} \left(\frac{v}{D}\right)^{1/3} \sqrt{\frac{\omega}{v}} R^2 (J_1 + J_2) = \\ &= \frac{Dc_0}{3} \left(\frac{v}{D}\right)^{1/3} \sqrt{\frac{\omega}{v}} R^2 J_{1,2}. \end{aligned} \quad (13)$$

Аналогично находится поток диффузии на электрод при других значениях угла φ_0 . Значения интегралов $J_{1,2}, J_{3,4}, J_{5,6}, J_{7,8}, J_{9,10}, J_{11,12}, J_{13,14}, J_{15,16}$ для восьми угловых положений электрода, состоящего из двух секторов (см. рис. 1) при $R = 0.02$ м, $\omega = 1500$ с⁻¹ и скорости $V_0 = 2$ м/с, а также интегралов $J'_{1,2}, J'_{3,4}, J'_{5,6}, J'_{7,8}, J'_{9,10}, J'_{11,12}, J'_{13,14}, J'_{15,16}$ при скорости $V_0 = 2.02$ м/с приведены в табл. 1.

Сравнение значений, приведенных в табл. 1, показывает, что при постоянной скорости V_0 относительная пульсация потока диффузии за счет вращения электрода (она равна относительной пульсации интеграла в табл. 1) составляет 0.002, в то время как относительная пульсация потока диффузии за счет пульсации скорости V_0 , равной 1%, составляет 0.000015. Следовательно, помеха от вращения электрода примерно в 133 раза превышает пульсацию потенциала электрода, связанную с пульсациями скорости набегающего на электрод потока жидкости, о чем и говорилось в начале статьи. Для устранения этой помехи следует электрод выполнить многосекционным. Например, при угловом размере сектора 22.5° электрод должен иметь 16 секторов, расположенных в параллельных плоскостях и повернутых относительно друг друга так, чтобы в плане они составляли полный круг (рис. 2). Число секторов можно удвоить, т.е. расположить в разных плоскостях не восемь, а шестнадцать пар электродов. Это увеличивает площадь электрода и уменьшает сопротивление датчика, следовательно, приводит к уменьшению его теплового шума и к увеличению чувствительности. Определим восприимчивость электрода с 16 секторами к пульсациям скорости жидкости и выигрыш в чувствительности датчика за счет подавления шума движения по сравнению с неподвижным электродом в виде круглой пластины того же радиуса. В соответствии с табл.1 при коэффициенте диффузии $D = 2.6 \times 10^{-9}$ м²/с, кине-

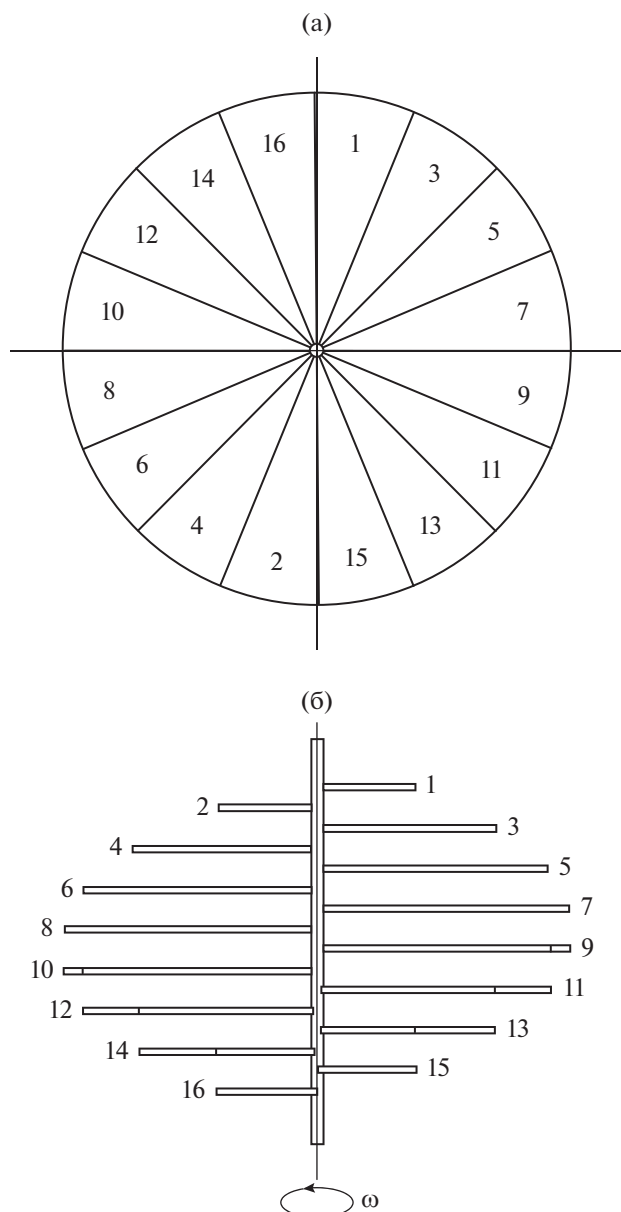


Рис. 2. Шестнадцатисекционный вращающийся электрод: вид сверху (а) и сбоку (б); 1–16 – номера секций.

матической вязкости жидкости $\nu = 10^{-6} \text{ м}^2/\text{с}$ и скорости $V_0 = 2 \text{ м/с}$ поток диффузии на вращающийся электрод будет равен

$$I_{1 \text{ вр}} = \frac{Dc_0}{3} \left(\frac{\nu}{D}\right)^{1/3} \sqrt{\frac{\omega}{\nu}} R^2 (J_{1,2} + J_{3,4} + J_{5,6} + J_{7,8} + J_{9,10} + J_{11,12} + J_{13,14} + J_{15,16}) = 2.081140831 Dc_0 \left(\frac{\nu}{D}\right)^{1/3} \sqrt{\frac{\omega}{\nu}} R^2. \quad (14)$$

При скорости $V_0 = 2.02 \text{ м/с}$ аналогично получаем

$$I_{2 \text{ вр}} = \frac{Dc_0}{3} \left(\frac{\nu}{D}\right)^{1/3} \sqrt{\frac{\omega}{\nu}} R^2 (J'_{1,2} + J'_{3,4} + J'_{5,6} + J'_{7,8} + J'_{9,10} + J'_{11,12} + J'_{13,14} + J'_{15,16}) = 2.08117172 \frac{Dc_0}{3} \left(\frac{\nu}{D}\right)^{1/3} \sqrt{\frac{\omega}{\nu}} R^2. \quad (15)$$

Изменение суммы интегралов ΔJ при изменении скорости буксировки $\Delta V_0 = 0.02 \text{ м/с}$ будет равно

$$\Delta J = (J'_{1,2} + J'_{3,4} + J'_{5,6} + J'_{7,8} + J'_{9,10} + J'_{11,12} + J'_{13,14} + J'_{15,16}) - (J_{1,2} + J_{3,4} + J_{5,6} + J_{7,8} + J_{9,10} + J_{11,12} + J_{13,14} + J_{15,16}) \approx 0.000093. \quad (16)$$

Изменение потока диффузии кислорода на вращающийся электрод за счет изменения скорости набегающего при буксировке на электрод потока жидкости на $\Delta V_0 = 0.02 \text{ м/с}$ составляет

$$\Delta I_{\text{вр}} = \Delta J \frac{Dc_0}{3} \left(\frac{\nu}{D}\right)^{1/3} \sqrt{\frac{\omega}{\nu}} R^2 \approx 0.000031 Dc_0 \left(\frac{\nu}{D}\right)^{1/3} \sqrt{\frac{\omega}{\nu}} R^2. \quad (17)$$

Изменение потока диффузии на круглый неподвижный электрод [9] имеет вид

$$\Delta I_{\text{н}} = 7.57 Dc_0 R^2 \frac{\Delta V_0}{\sqrt{\nu V_0 R}}. \quad (18)$$

Сравним (17) и (18):

$$\frac{\Delta I_{\text{н}}}{\Delta I_{\text{вр}}} = \frac{22.71}{\Delta J} \frac{\Delta V_0}{\sqrt{V_0 \omega R}} \left(\frac{D}{\nu}\right)^{1/3} = 2.442 \times 10^5 \frac{\Delta V_0}{\sqrt{V_0 \omega R}} \left(\frac{D}{\nu}\right)^{1/3}. \quad (19)$$

При $\Delta V_0 = 0.02 \text{ м/с}$ получаем $\Delta I_{\text{н}}/\Delta I_{\text{вр}} \approx 123$. То есть пульсация потока диффузии на неподвижный дисковый электрод в 123 раза больше, чем на вращающийся электрод того же радиуса и той же площади. Примерно во столько же раз уменьшается шум и движения, связанный с пульсацией скорости буксировки датчика. Тепловой шум датчика при этом лишь на 10% больше, чем у датчика с неподвижными дисковыми электродами того же радиуса. На практике такого уменьшения шума движения не требуется, поскольку чувствительность датчика ограничивается другими компонентами шума. Во-первых, тепловым шумом активного сопротивления датчика. Во-вторых, уменьшение пульсаций потенциала вращающегося электрода возможно, только если эти пульсации вызваны одной причиной. В нашем случае

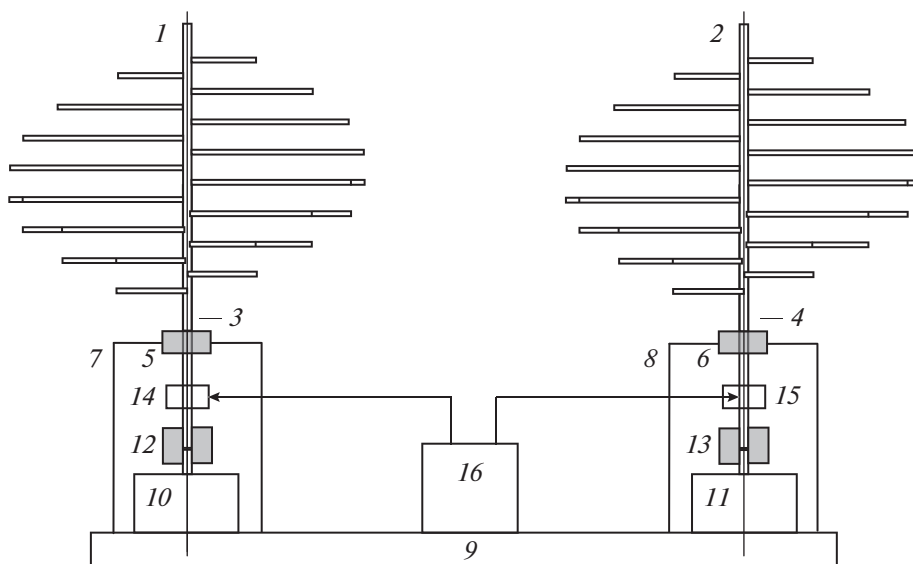


Рис. 3. Датчик электрического поля с вращающимися электродами: 1, 2 – электроды, 3, 4 – металлические оси, 5, 6 – сальники, 7, 8 – герметические корпуса, 9 – диэлектрическая платформа, 10, 11 – электромоторы, 12, 13 – диэлектрические муфты, 14, 15 – пружинные токосъемники, 16 – приемно-измерительный блок.

это пульсации скорости буксировки датчика и пульсации, связанные с пересечением датчиком крупномасштабных турбулентных вихрей. Некоррелированные пульсации не вычитаются, а складываются квадратично. Если электрический контакт с водой осуществляется не с одной, как рассмотрено в данной работе, а двумя сторонами плоского электрода, то это также уменьшает активное сопротивление датчика и величину теплового шума. При этом степень подавления пульсаций электродного потенциала, вызванных пульсациями скорости воды, не изменяется по сравнению с расчетной. Увеличение электродного шума при движении в отсутствие турбулентности у длительно выдержанных в морской воде электродов проявляется только на частотах ниже 40 Гц [8].

Датчик с вращающимися электродами схематично изображен на рис. 3. Предпочтительное направление буксировки – перпендикулярно плоскости расположения осей электродов, т.е. плоскости чертежа. Датчик содержит электроды 1 и 2, установленные на металлических осях 3 и 4. Оси через сальники 5 и 6 вставлены в герметические корпуса 7 и 8, установленные на буксируемой за корпусом диэлектрической платформе 9. Электромоторы 10 и 11 установлены внутри герметических корпусов 7, 8, которые выполнены из магнитомягкой стали, для экранирования помех от электромоторов. При этом, чтобы в меньшей степени исказить принимаемое электрическое поле, они должны иметь снаружи диэлектрическое по-

крытие. Вал каждого электродвигателя через диэлектрические муфты 12 и 13 соединен с осью 3 и 4 соответствующего электрода. Напряжение с электродов датчика с помощью пружинных токосъемников 14 и 15, установленных на осях 3 и 4, передается по изолированным соединительным проводам на приемно-измерительный блок 16, осуществляющий усиление, частотную фильтрацию и измерение выходного напряжения датчика. Для лучшего подавления помехи, которая может возникать от электродвигателей и эксцентриситета электродов, частота вращения должна быть выше максимальной частоты рабочего диапазона измеряемого переменного электрического поля.

Как следует из условия $\omega R = 15V_0$, для реализации большого выигрыша в шуме движения требуется высокая скорость вращения электродов. При уменьшении скорости вращения этот выигрыш в шуме и чувствительности перед неподвижными электродами уменьшается. Однако увеличение чувствительности датчика даже в несколько раз имеет очень большое значение, так как снижает требования к мощности сверхнизкочастотного передатчика, что может дать существенный положительный экономический и технологический эффект, с учетом того, что в настоящее время она достигает единиц мегаватт.

В данной работе показана принципиальная возможность уменьшения шума движения электродного датчика электрического поля в море при вращении электродов.

БЛАГОДАРНОСТИ

Автор выражает благодарность В.И. Каевицеру за ценные замечания, которые помогли повысить качество работы.

ФИНАНСИРОВАНИЕ РАБОТЫ

Работа выполнена в рамках государственного задания Института радиотехники и электроники им. В.А. Котельникова РАН.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Зимин Е.Ф., Кочанов Э.С.* Измерение напряженности электрических и магнитных полей в проводящих средах. М.: Энергоатомиздат, 1985.
2. *Велихов Е.П., Жамалетдинов А.А., Собчаков Л.А. и др.* // Матер. Всерос. (с междунар. участием) науч.-практич. семинара “Взаимодействие электромагнитных полей КНЧ-СНЧ диапазона с ионосферой и земной корой”. Апатиты, 2014. Т. 1. С. 63.
3. *Башкуев Ю.Б., Хаптанов В.Б.* // Матер. I Всерос. (с междунар. участием) науч.-практич. семинара “Взаимодействие электромагнитных полей КНЧ-СНЧ диапазона с ионосферой и земной корой”. Апатиты, 2015. Т. 2. С. 46.
4. *Бернштейн С.Л., Барроуз М.Л., Эванс Дж.Э. и др.* // ТИИЭР. 1974. Т. 62. № 3. С. 5.
5. *Максименко В.Г., Нарышкин В.И.* // РЭ. 2003. Т. 48. № 1. С. 70.
6. *Максименко В.Г.* // РЭ. 2017. Т. 62. № 11. С. 1.
7. *Максименко В.Г.* // Измерит. техника. 2017. № 9. С. 57.
8. *Максименко В.Г.* // РЭ. 2018. Т. 63. № 7. С. 720.
9. *Максименко В.Г.* // РЭ. 2021. Т. 66. № 5. С. 436.
10. *Максименко В.Г.* Электродный датчик напряженности электрического поля в море. Патент РФ на изобретение № 2745588. Оpubл. 29.03.2021 г. офиц. бюл. “Изобретения. Полезные модели” № 10.
11. *Левич В.Г.* Физико-химическая гидродинамика. М.: Физматлит, 1959.