

УДК 537.811

КОМПЕНСАЦИЯ ШУМА ДВИЖЕНИЯ МОРСКОГО ЭЛЕКТРОДНОГО ДАТЧИКА ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ПОЛЯ

В. Г. Максименко

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

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

Поступила в редакцию 10.04.2024 г.

После доработки 10.04.2024 г.

Принята к публикации 24.04.2024 г.

Показана возможность компенсации составляющей шума электродного датчика, вызванной пульсациями скорости жидкости относительно электродов датчика электромагнитного поля, и возможность повышения чувствительности приемного устройства в несколько раз. Предложена схема устройства для приема и измерения низкочастотного электрического поля в море, в которой осуществлена указанная компенсация.

Ключевые слова: электродный датчик, электродный шум, пульсации скорости жидкости, коэффициент корреляции

DOI: 10.31857/S0033849424110104, **EDN:** HNYOSQ

ВВЕДЕНИЕ

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 глубоко погруженными исследовательскими объектами в океане [1–3]. 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 ранее экспериментах при движении датчика была на 10...20 дБ больше, чем в состоянии покоя [4, 5]. Экспериментально и теоретически установлена связь пульсаций напряжения между электродами с пульсациями скорости жидкости относительно электродов [6]. 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 [7] показана возможность компенсации шума движения при использовании корреляционной связи между напряжением шума движения электродного датчика и пульсациями скорости потока жидкости. Однако практическая реализация такой компенсации достаточно сложна, так как для получения компенсирующего напряжения в приемном устройстве используют специальные датчики скорости, которые установлены рядом с электродами.

Цель статьи — показать возможность компенсации шума более простыми техническими средствами.

1. ТЕОРЕТИЧЕСКОЕ ОБОСНОВАНИЕ

Ранее нами было показано [8], что за счет правильного выбора размеров и места расположения электродов датчика на плоской диэлектрической пластине-обтекателе достигается уменьшение шума движения до 10 раз по сравнению с расположением электродов на передней кромке пластины-обтекателя. Это свойство открывает возможность применения второго электродного датчика для получения компенсирующего напряжения.

Пусть пара электродов, образующих первый датчик, расположена непосредственно у передней кромки обтекателя. Пусть также на поверхности

обтекателя на некотором расстоянии от передней кромки обтекателя (рис.1) расположена вторая пара электродов, идентичная первой, образующая второй датчик. Среднеквадратическое значение напряжения шума движения у первого датчика в k раз больше, чем у второго, при этом оба напряжения коррелированы, поскольку они созданы одним и тем же пульсирующим потоком жидкости. Напряжение, создаваемое на обоих парах электродов измеряемым электрическим полем, одинаково, поскольку одинаково расстояние между электродами датчика.

Пусть $x(t)$ — напряжение шума первого датчика, $y(t)$ — напряжение шума второго датчика, а r_{xy} — коэффициент корреляции между $x(t)$ и $y(t)$. Средние значения $x(t)$ и $y(t)$ равны нулю, а среднеквадратические отклонения σ_x и σ_y мы уравниваем. Среднеквадратическое отклонение разности $x(t) - y(t)$ имеет вид

$$\begin{aligned}\sigma_{x-y} &= \sqrt{(x-y)^2} = \\ &= \sqrt{x^2 \left(1 - 2\frac{xy}{x^2} + \frac{y^2}{x^2}\right)} = \sigma_x \sqrt{1 - 2\frac{R_{xy}}{\sigma_x^2} + \frac{\sigma_y^2}{\sigma_x^2}},\end{aligned}\quad (1)$$

где $R_{xy} = \overline{xy}$ — ковариация двух случайных процессов. Так как $\sigma_x = \sigma_y$, коэффициент корреляции $r_{xy} = R_{xy}/\sigma_x\sigma_y$, то формулу (1) можно записать в виде

$$\sigma_{x-y} = \sigma_x \sqrt{2(1 - r_{xy})}.\quad (2)$$

При высокой корреляции двух случайных процессов $x(t)$ и $y(t)$ и одинаковых среднеквадратических отклонениях возможно получить $\sigma_{x-y} \ll \sigma_x$

при вычитании этих процессов.

В работе [7] показано, что при коэффициенте корреляции, равном 0.9, вычитание напряжения датчика скорости из электродного шума позволило уменьшить среднеквадратическое отклонение напряжения шума в 2.3 раза, что совпадает со значением, которое дает формула (2). Можно ожидать высокой корреляции и между флуктуациями потенциала двух рядом расположенных в одном потоке электродов. Это дает основание полагать, что при вычитании шумовых напряжений с двух рядом расположенных пар электродов разностное напряжение будет иметь значительно меньшее среднеквадратическое отклонение, чем большее из них, принадлежащее первому датчику с электродами, который расположен на передней кромке пластины. Однако если полученное при этом напряжение шума больше, чем напряжение, полученное со второй пары электродов, т.е. меньшее из вычитаемых, то такое вычитание не имеет смыс-

ла. Получить выигрыш в отношении сигнал—шум можно только при высокой степени корреляции шумовых напряжений.

В соответствии с [8] и рис. 1 отношение k шумовых напряжений первого и второго датчика определяется формулой

$$k = 2\sqrt{l_1 / d + 1},\quad (3)$$

где l_1 — расстояние от передней кромки пластины до передней границы электрода, d — ширина электрода. При $l_1 \gg d$

$$k \approx 2\sqrt{l_1 / d}.\quad (4)$$

При удалении узкого электрода ($d \ll l_1$) от передней кромки пластины чувствительность его к пульсациям скорости жидкости уменьшается пропорционально $\sqrt{l_1}$.

После уравнивания и вычитания шумовых напряжений отношение сигнал—шум увеличивается в N раз, где

$$N = (k - 1) / k\sqrt{2(1 - r_{xy})}.\quad (5)$$

При коэффициенте корреляции $r_{xy} = 0.9$ получаем увеличение отношения сигнал—шум в $2.24(1 - 1/k)$ раз. Следовательно, увеличение отношения сигнал—шум достигается уже при $k \geq 2$. При $k = 3$ получаем $N = 1.5$.

Устройство для приема и измерения низкочастотного электромагнитного поля в море, в котором используется компенсация шума движения, схематично изображено на рис. 1 и 2 (вид сбоку на буксируемую часть). Устройство состоит из буксируемой диэлектрической платформы-обтекателя ПО, первого и второго усилителей У1 и У2, блока вычитания БВ, блока обработки информации БИ и четырех электродов Э1...Э4.

Диэлектрическая платформа имеет форму клина с затупленными концами (см. рис. 2). Как известно [9], пограничный слой на поверхности обтекаемого жидкостью тела имеет склонность к отрыву, особенно при наличии неровностей на обтекаемой поверхности. При отрыве пограничного слоя пульсации скорости у поверхности электрода становятся значительно больше. Там же показано, что отрыва пограничного слоя не происходит, если толщина обтекаемого тела увеличивается по направлению вектора скорости потока. Поэтому диэлектрическую платформу следует выполнить в виде клина с углом при вершине 5...10 град. Переднюю и заднюю кромку клина целесообразно затупить в целях безопасности и для улучшения гидродинамического качества. Одинаковые плоские металлические электроды Э3

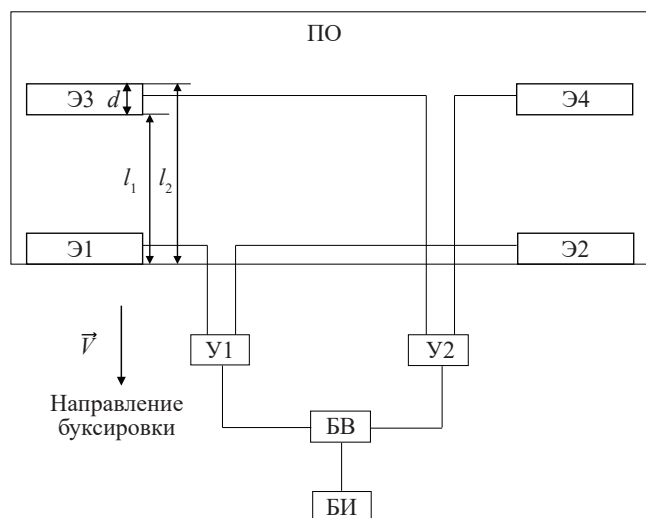


Рис. 1. Устройство для приема и измерения низкочастотного электрического поля в море: Э1... Э4 — электроды, ПО — диэлектрическая платформа-обтекатель, У1 — усилитель, У2 — регулируемый усилитель, БВ — блок вычитания, БИ — блок обработки информации. Стрелкой показано направление буксировки.

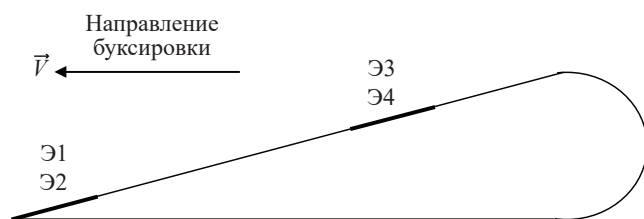


Рис. 2. Схема буксируемой диэлектрической платформы с электродами (вид сбоку).

и Э4 в форме прямоугольника заподлицо встроены в плоскую поверхность платформы. Передние и задние стороны электродов (относительно направления буксировки) параллельны передней кромке платформы и расположены на равных расстояниях от ее передней кромки. Электроды Э1 и Э2 также идентичны и имеют прямоугольную форму. Они заподлицо встроены в плоскую поверхность диэлектрической платформы таким образом, что их передняя по ходу движения граница совпадает с передней кромкой платформы. Электроды Э1 и Э2 образуют первый электродный датчик, а электроды Э3 и Э4 — второй электродный датчик. Первый электродный датчик через усилитель У1 соединен с первым входом блока вычитания БВ, а второй электродный датчик через регулируемый усилитель У2 соединен со вторым входом блока вычитания БВ, выход которого подключен к блоку обработки информации БИ.

Устройство работает следующим образом. Платформа ПО буксируется с помощью ка-

бель-троса влево (в соответствии с рис. 2) за судном на некоторой глубине от поверхности моря. Электрическая компонента электромагнитной волны, распространяющейся от поверхности моря вниз, создает в морской воде токи проводимости. Разность потенциалов, создаваемая в воде токами проводимости, с помощью электродов первого и второго датчика передается по кабель-тросу на расположенное на борту буксирующего судна приемное устройство, включающее в себя усилители, блок вычитания и блок обработки и отображения информации, где выделяется из помех и измеряется. Пульсации скорости буксировки создают специфическую помеху — электродный шум движения. Как показано автором [7], пульсации потенциала электрода, обтекаемого пульсирующим потоком воды, имеют высокую степень корреляции с пульсациями скорости потока. В работе автора [6] также показано, что электродный шум движения определяется флуктуациями потока диффузии кислорода на поверхность электрода. При этом скорость диффузии уменьшается при увеличении толщины диффузионного слоя жидкости у поверхности электрода, следовательно, при увеличении расстояния от электрода до передней кромки платформы-обтекателя. Пульсации скорости потока воды создают на паре электродов Э3 и Э4, удаленной от передней кромки обтекателя ПО, существенно меньшее напряжение шума движения, чем на паре электродов Э1 и Э2, расположенной непосредственно вблизи передней кромки. Оба эти напряжения имеют высокую степень корреляции, что позволяет осуществить их компенсацию путем вычитания при уравнивании среднеквадратических значений. Обозначим $U_{ш}$ напряжение шума движения, получаемое от электродов Э3 и Э4. Тогда напряжение шума движения, получаемое от электродов Э1 и Э2, расположенных у передней кромки платформы, равно $kU_{ш}$, где $k > 1$. В лабораторных экспериментах, выполненных автором, значение k достигало 3. Его можно увеличить путем увеличения расстояния от передней кромки платформы до передней и задней границ электродов Э1 и Э2, однако при этом, очевидно, будет уменьшаться корреляция между шумовым напряжением первого и второго датчиков. Напряжение сигнала U_c , получаемое от первого и второго датчиков, одинаково, поскольку одинаково расстояние между электродами Э1 и Э2 первого датчика и между электродами Э3 и Э4 второго датчика. После уравнивания среднеквадратического значения напряжения шума, поступающего с первого и второго датчиков, с помощью усилителей У1, У2 (коэффициент усиления усилителя У2 регулируется) напряжения сигнала на выходе усилителей У1, У2 тоже отличаются в k раз. Поэтому после вычитания при $k = 10$ получим на выходе блока вычитания напряжение сигнала $0.9KU_c$ (K — коэффициент усиления усилителя 7). При коэффициенте

корреляции 0.9 между напряжением шума с первого и второго датчиков после вычитания оно станет меньше в 2.3 раза, т.е. равным $0.435KU_{\text{ш}}$. В результате на входе блока обработки информации отношение сигнал—шум повысится примерно в два раза. Следует располагать электроды Э1 и Э3, а также Э2 и Э4 друг за другом в одном потоке, что повышает коэффициент корреляции между шумовым напряжением первого и второго датчиков, следовательно, увеличивает выигрыш в отношении сигнал—шум.

2. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ЧАСТЬ

Выполнен лабораторный эксперимент, подтверждающий правильность предположения о высокой степени корреляции между пульсациями потенциала двух электродов, находящихся в одном потоке жидкости, как, например, электродов Э1, Э3 и Э2, Э4 (см. рис. 1). Лабораторная установка, использованная в эксперименте, описана в [8]. Схема измерительной ячейки показана на рис. 3.

Исследуемые электроды 1 и 2, выполненные в виде отрезков титановой проволоки диаметром 1 мм, встроены в диэлектрический цилиндр 3 диаметром 11 мм, отлитый из эпоксидной смолы. Вместе с цилиндром 3 они образуют электродный блок, который установлен на корпусе ячейки 4, изготовленном из органического стекла. Шлифованные торцы отрезков титановой проволоки, которые и являются собственно измерительными электродами, встроены заподлицо в плоскую торцевую площадку диэлектрического цилиндра (см. рис. 3), на которую набегает пульсирующий поток раствора NaCl с концентрацией 4.5 г/л, имитирующего морскую воду. Первый электрод 1 находится вблизи переднего края площадки на расстоянии 4 мм от инжектора. Второй электрод 2 на 10 мм отодвинут от первого по направлению потока и располагается у противоположного края площадки. Среднюю скорость потока жидкости не измеряли, но по косвенным оценкам она составляла около 0.2 м/с. Скорость имела контролируемую пульсацию с частотой 22.8 Гц. Помимо специально созданной пульсации скорости существуют и случайные пульсации, обусловленные турбулентностью потока. Направление вектора пульсации скорости в турбулентных вихрях произвольное, поэтому для них корреляция на электродах 1 и 2 отсутствует. Одновременно записаны две секундные реализации шумового напряжения: между электродами 1, 8 и 2, 8.

В результате обработки этих реализаций получены спектры шумового напряжения, которые на частоте 22.8 Гц имеют пик, причем в спектре напряжения с электрода 1 он на 7.7 дБ ($k = 2.427$) больше, чем в спектре напряжения с электрода 2. На рис. 4 показаны: спектр напряжения с электро-

да 1, после умножения его на коэффициент 0.412 для уравнивания высоты пиков на частоте 22.8 Гц (кривая 1), спектр напряжения с электрода 2 (кривая 2) и спектр шумового напряжения, полученного после их вычитания (кривая 3).

Как видно из рис. 4, кривые 1 и 2 вблизи частоты 22.8 Гц совпадают. Высота пика в спектре разностного напряжения (кривая 3) на частоте пульсации скорости 22.8 Гц в 3.07 раза ниже, чем в спектре напряжения с электрода 2 (кривая 2). Во столько же раз стала меньше и высота пика на второй гармонике пульсации скорости.

3. ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Результаты эксперимента свидетельствуют о возможности частичной компенсации шума движения описанным способом. Коэффициент

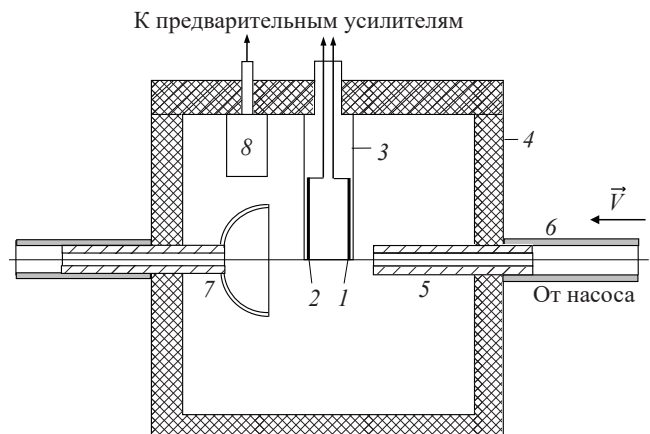


Рис. 3. Схема измерительной ячейки с электродами: 1, 2 — первый и второй электроды, 3 — диэлектрический цилиндр, 4 — корпус ячейки, 5 — инжектор, 6 — трубопровод, 7 — уловитель потока, 8 — опорный электрод.

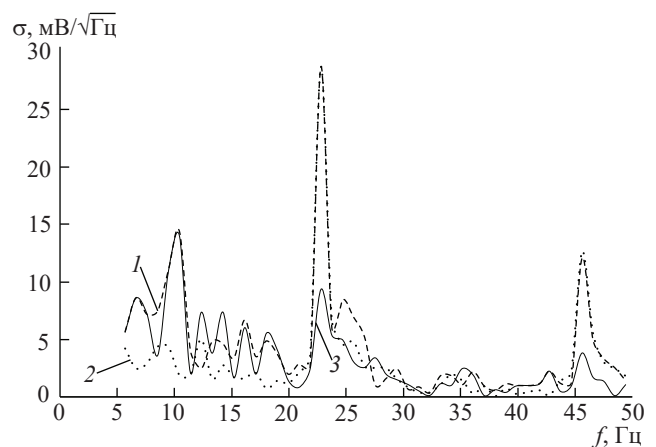


Рис. 4. Спектры шумового напряжения: 1 — между электродами 1 и 8, 2 — между электродами 2 и 8, 3 — спектр разностного напряжения.

корреляции между двумя шумовыми напряжениям на частоте 22.8 Гц в соответствии с (2) близок к 0.95. Следует иметь в виду, что эта оценка относится не к шумовым напряжениям во всей полосе пропускания усилителей, а к пульсациям потенциала в весьма узкой полосе в окрестностях частоты 22.8 Гц. Принимаемый сигнал обычно тоже является весьма узкополосным. Оценим повышение отношения сигнал/шум после такой компенсации. Вычитание напряжений, полученных от двух датчиков, приведет к уменьшению полезного сигнала в $1/(1 - 0.412) = 1.7$ раза. При этом напряжение шума уменьшится в 3.07 раза, следовательно, отношение сигнал/шум повысится в 1.8 раза. Увеличение расстояния от электрода 1 до электрода 2 (см. рис. 3) позволяет увеличить это значение до нескольких раз. Таким образом, эксперимент показал, что существует реальная возможность с помощью простых технических средств повысить в несколько раз чувствительность приемника низкочастотного электромагнитного поля с электродным датчиком.

БЛАГОДАРНОСТИ

Автор выражает благодарность А.И. Захарову за помощь в обработке результатов эксперимента.

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. Взаимодействие электромагнитных полей контролируемых источников СНЧ диапазона с ионосферой и земной корой: Матер. Всерос. (с международным участием) научно-практич. семинара. В 2 тт. Апатиты, 2014. Т. 1.
3. Бернштейн С.Л., Барроуз М.Л., Эванс Дж. Э. и др. // ТИИЭР. 1974. Т. 62. № 3. С. 5.
4. Максименко В.Г., Нарышкин В.И. // РЭ. 2003. Т. 48. № 1. С. 70.
5. Максименко В.Г. // РЭ. 2017. Т. 62. № 11. С. 1086.
6. Максименко В.Г. // РЭ. 2018. Т. 63. № 7. С. 720.
7. Максименко В.Г. // Измерит. техника. 2019. № 1. С. 58.
8. Максименко В.Г. // РЭ. 2023. Т. 68. № 12. С. 1159.
9. Шлихтинг Г. Теория пограничного слоя. М.: Наука, 1974.

MOTION NOISE COMPENSATION OF THE MARINE ELECTRODE SENSOR OF THE ELECTRIC FIELD

V. G. Maksimenko

*Fryazino Branch Kotelnikov Institute of Radioengineering and Electronics of RAS,
Vvedenskii Squar., 1, Fryazino, Moscow Region, 141190 Russian Federation
E-mail: max54@ms.ire.rssi.ru*

Received April 10, 2024, revised April 10, 2024, accepted April 24, 2024

The possibility of compensation of the noise component of the electrode sensor caused by pulsations of the liquid velocity relative to the electromagnetic field sensor electrodes and the possibility of increasing the sensitivity of the receiving device several times is shown. The scheme of the device for reception and measurement of low-frequency electric field in the sea, in which the specified compensation is realized, is offered.

Keywords: electrode sensor, electrode noise, liquid velocity pulsations, correlation coefficient