

# РЕЗИСТИВНЫЕ ПРОВОЛОЧНЫЕ ДАТЧИКИ ВОЛНОГРАФОВ

А.К.Куклин, Н.Я.Куклина,  
О.А.Шабалина

Экспериментальное отделение  
Морского гидрофизического института  
НАН Украины  
Крым, Кацивели  
E-mail: [edmhi@ukr.net](mailto:edmhi@ukr.net)

*Рассматривается ряд вариантов резистивных проволочных датчиков волнографов с позиции длинной линии с распределенными параметрами при питании датчиков переменным током с целью исключения поляризации. Дано решение для определения комплексной величины переходного сопротивления датчиков на границе раздела вода–воздух. Показана возможность применения компенсационных электродов для сохранения линейности приращения сопротивления вдоль всей длины рабочих электродов датчика.*

Резистивные проволочные датчики волнографов широко используются в практике исследований ветрового волнения на морях и пресно-водных водоемах. Они изготавливаются из материалов с высоким удельным сопротивлением (никром, константан) и сохраняют свои свойства при продолжительном пребывании в агрессивной среде, какой является морская вода. В водной среде рабочие электроды резистивного проволочного датчика представляют из себя длинную линию с распределенными параметрами [1], имеющую согласованную нагрузку. Активное сопротивление таких датчиков на границе раздела вода – воздух было определено в работах [2], [3], [4]. Однако, вода любого водоема, в котором работают резистивные датчики волнографов, является раствором электролита той или иной концентрации. Поэтому при прохождении переменного тока через электроды датчика, которым они пытаются с целью исключения поляризации, на границе между электродами и водной средой возникает двойной электрический слой, образованный электрическими зарядами, расположеными на металле, и ионами противоположных знаков, находящимися в водной среде вблизи поверхности проволочных электродов датчика [5], [6]. Двойной электрический слой в первом приближении представляет

собой конденсатор, обкладки которого – заряженная поверхность металлического электрода и слой ионов противоположного знака, находящегося вблизи поверхности металла. Эту емкость можно считать включенной последовательно с активным сопротивлением водной среды между электродами датчика (рис. 1а).

Величина сопротивления резистивного датчика определяется следующим выражением:

$$Z_1 = (L - \ell)r + Z_2. \quad (1)$$

где  $Z_2$  – комплексное значение входного сопротивления длинной линии, определяемое на границе раздела вода–воздух;  $r$  – удельное сопротивление проволочных электродов датчика;  $L$  – полная длина проволочных электродов датчика;  $\ell$  – длина погруженной части датчика в воду.

Решая дифференциальные уравнения, которым удовлетворяют токи и напряжения в любом сечении однородной линии с утечкой, с учетом положений о комплексной величине сопротивления утечки между электродами датчика, входное сопротивление резистивного проволочного датчика ( $Z_2$ ) можно записать в следующем виде

$$Z_2 = \frac{Z_3 + Z_4 t h \gamma \ell}{1 + \frac{Z_3}{Z_4} t h \gamma \ell}, \quad (2)$$

$$\text{где } Z_r = \sqrt{r(R_0 + j\omega C_1)} \quad (3)$$

– характеристическое сопротивление линии с потерями;

$$\gamma = \sqrt{\frac{r}{R_0 + j\omega C_1}} \quad \text{- коэффициент затухания цепи;}$$

$Z_3$  – сопротивление согласованной нагрузки между нижними концами датчика;  $r$  – активное сопротивление проволочных электродов датчика;  $C_1$  – эквивалентное значение емкости между электродами;  $R_0$  – величина активного сопротивления водной среды между электродами датчика;  $\ell$  – безразмерная величина заглубления электродов датчика в воду в единицах расчетной длины.

Значения величин  $r$ ,  $C_1$ ,  $R_0$  в выражении (3) дано для единицы расчетной длины рабочих электродов датчика.

Выражение (3) справедливо и для датчиков с одним электродом (вторым электродом является земля), а также для любых других однородных и симметричных электродов, в том числе и для электродов из материала с малым удельным сопротивлением.

Если сопротивление  $Z_3$  является активным, то при изменении уровня воды на нижнем участке датчика величина  $Z_2$  не остается постоянной по емкостной составляющей. Для полной стабилизации входного сопротивления датчика ( $Z_2$ ) сопротивление  $Z_3$  должно быть комплексным. При работе датчиков в морской воде для этой задачи целесообразно использовать электроды согласования. Эти электроды подключаются к нижним концам рабочих электродов датчика (рис. 1). При этом величина сопротивления между двумя такими электродами (или одним электродом и заземлением для одноэлектродного датчика) должна быть равна величине характеристического сопротивления ( $Z_4$ ). В тех случаях, когда длина рабочих электродов датчика не ограничена, роль электродов согласования выполняют нижние компенсационные (нерабочие) участки датчика ( $\ell_1$ ) (рис. 1б). Длина таких участков определяется из выражения (2) или непосредственными измерениями (для морской воды  $\ell_1 \leq 100$  см, для пресной воды  $\ell_1 \geq 300$  см).

При расчете величины сопротивления между электродами согласования, а также для электродов, используемых в качестве заземляющих электродов, основное значение имеет площадь контакта электрода в водной среде ( $S$ ). Если электроды однородны по всей длине, то сопротивление между ними с погружением в воду определяется тем же выражением, что и для рабочих электродов датчика, так как они принципиально ничем между собой не отличаются. Однако здесь необходимо учитывать следующие особенности. Для электродов согласования отсутствует согласованная нагрузка ( $Z_3 = \infty$ ), поскольку они сами являются этой нагрузкой. В этом случае из выражения (2) получаем

$$Z_2 = \frac{\sqrt{r(R_0 + j\omega C_1)}}{th \sqrt{\frac{r}{R_0 + j\omega C_1}} \ell} \quad (4)$$

Для электродов из материала с малым удельным сопротивлением, имеющих со средоточенную площадь по сравнению с рабочими электродами датчика, коэффициент затухания цепи  $\gamma$  значительно уменьшается и не превышает 0,1, так как по модулю

$$r \ll R_o + j\omega C_1$$

Вследствие этого, в выражении (2) значение гиперболического тангенса можно представить самим аргументом ( $th 0,1 = 0,0997$ ). Учитывая, что значение  $\ell$  можно написать в виде

$$\ell = \frac{1}{K} S_1,$$

после соответствующих сокращений выражение (4) будет иметь вид

$$Z_2 = K \frac{R_o + j\omega C_1}{S_1}, \quad (5)$$

где  $K$  – коэффициент, имеющий размерность площади в единицах расчетной длины и зависящий от формы и материала электродов;  $S_1$  – значение площади электродов согласования в единицах расчетной длины.

Для электродов согласования

$$Z_2 = Z_4, \quad \text{отсюда}$$

$$S_1 = \frac{R_o + j\omega C_1}{Z_4}, \quad (6)$$

где  $Z_4$  – величина характеристического сопротивления рабочих электродов датчика.

Выражение (6) можно использовать и для определения площади заземляющих электродов датчика  $S_2$

$$S_2 = \frac{R_o + j\omega C_1}{Z_5}, \quad (7)$$

где  $Z_5$  – заданная величина сопротивления между двумя заземляющими электродами.

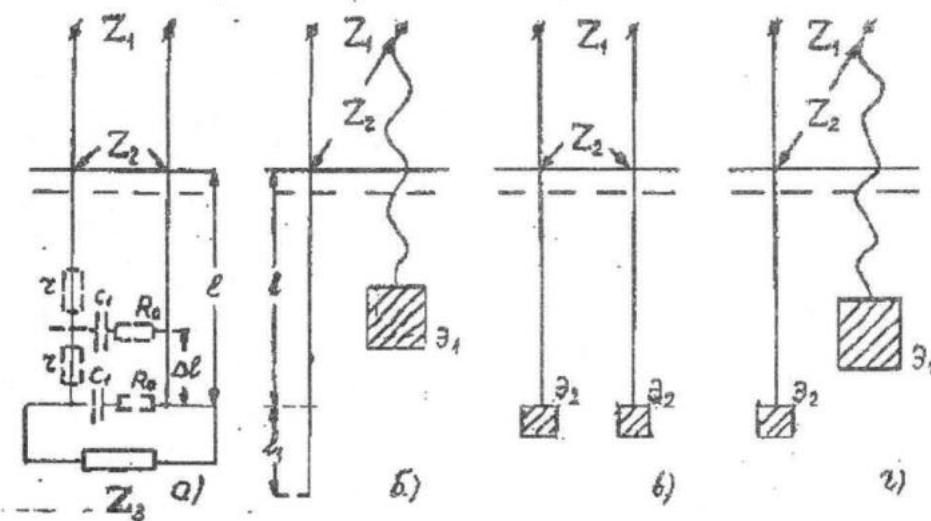


Рис. 1 - Резистивные проволочные датчики волнометрических систем:

- а) двухэлектродный, имеющий согласованную нагрузку  $Z_3$ ; б) с одним электродом, имеющим компенсационный участок  $\ell_1$ ; в) с двумя рабочими электродами и электродами согласования  $Z_2$ ; г) с одним рабочим электродом и электродом согласования  $Z_2$ .

Для измерения возвышений взволнованной поверхности обычно применяются датчики с одним рабочим электродом (вторым электродом является заземляющий электрод). Датчики с двумя электродами используются в основном для измерения мгновенных значений разности уровней между двумя рабочими электродами датчика, т.е. для определения наклонов. В этом случае датчик необходимо характеризовать базой – расстоянием по горизонтали между двумя рабочими электродами датчика.

Питание резистивных датчиков осуществляется переменным током. На рис. 2 по-

казано зависимость входного сопротивления датчика  $Z_2$  от частоты питания измерительного блока для морской воды. Из представленной зависимости видно, что оптимальная частота питания лежит в пределах 2000 – 5000 Гц.

На рис. 3 представлена экспериментальная зависимость величины характеристического сопротивления  $Z_3$  от диаметра и удельного сопротивления никромового провода рабочих электродов резистивного датчика для морской воды.

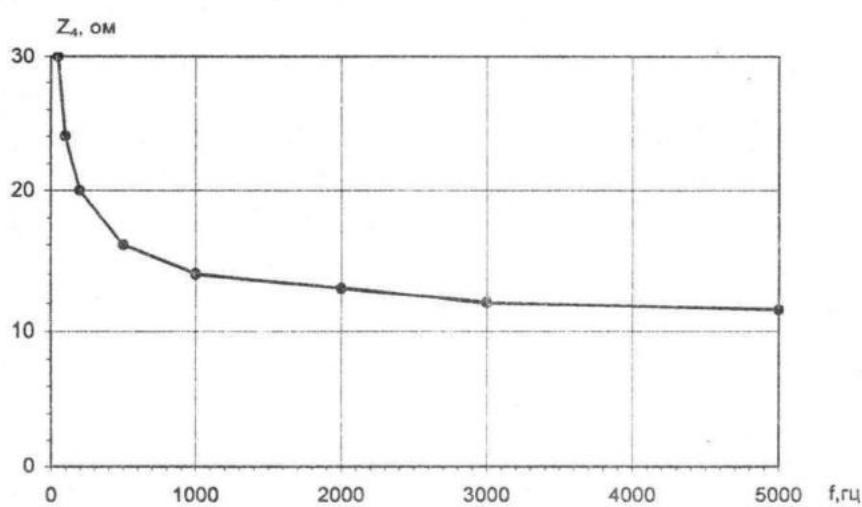


Рис. 2 - Зависимость входного сопротивления датчика от частоты питания измерительного блока

Для датчика из никромового провода диаметром 0,3 мм ( $r = 15,0 \text{ Ом}$ ) для условий Черного моря площадь электродов согласования составляет  $4 - 5 \text{ см}^2$ . Площадь заземляющего электрода при работе с одноэлект-

родными датчиками не превышает 20–30  $\text{см}^2$ . Дальнейшее увеличение этой площади ввиду объемного характера электропроводности водной среды не вызывает уменьшение сопротивления между электродами.

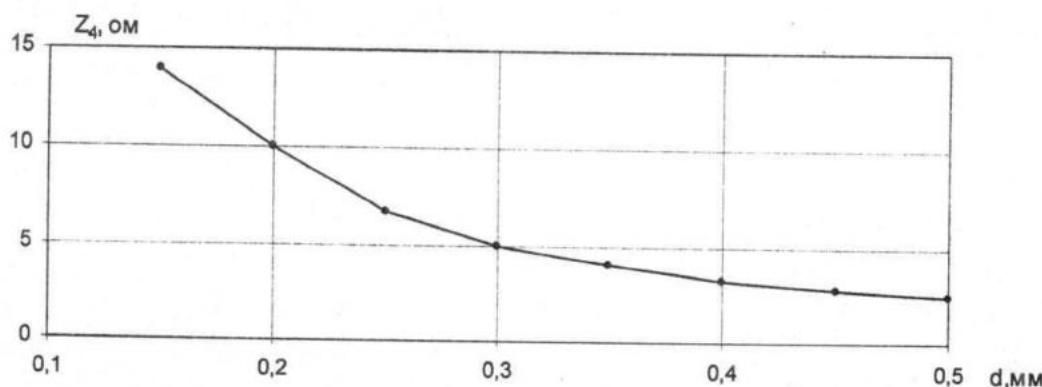


Рис.3 - Зависимость величины характеристического сопротивления от диаметра никромового провода рабочих электродов резистивного датчика (морская вода)

## ЛИТЕРАТУРА

- Круг К.А. и др. Основы электротехники. Госэнергоиздат. – М. 1952.
- Устройство для измерения и регистрации элементов волн в водоеме. Авт. свид. СССР № 143562 06.09.1961. Опубл. в "Бюллетень изобретений", № 24, 1961.
- Прибрежный электроволнограф с электронным автоматическим мостом. Сб. работ Иркутской ГМО, вып.1, Иркутск. 1966.
- Электроволнограф с программным механизмом и устройством для отсчета среднего периода волн. Труды координационных совещаний по гидротехнике, вып. 61, - Л. 1970.
- Лопатин Б.А. Кондуктометрия. Изд. СО АН СССР, Новосибирск. 1964.
- Скорчеллetti В.В. Теоретическая электрохимия. Изд. "Химия", - Л. 1970.