

**РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ
МЕТРОЛОГИЧЕСКИХ
ХАРАКТЕРИСТИК
ИЗМЕРИТЕЛЯ ОТНОСИТЕЛЬНОЙ
ЭЛЕКТРОПРОВОДИМОСТИ
ГИДРОЛОГОХИМИЧЕСКОГО
МОДУЛЯ МОРСКОЙ ПРИБРЕЖНОЙ
СТАНЦИИ**

*А.В. Клименко, К.А. Кузьмин,
А.П. Алексеев, В.И. Забурдаев*

Морской гидрофизический институт
НАН Украины
г. Севастополь, ул. Капитанская, 2
E-mail: oaoi@alpha.mhi.iuf.net

В результате испытаний установлено, что автоматическая коррекция температурного воздействия на электронные элементы модуля в алгоритме первичной обработки информации уменьшает температурную погрешность измерения электропроводимости до $\pm 0,003$ %. Изменчивость геометрической постоянной датчика относительной электропроводимости при непрерывном нахождении его в воде в течение 34 суток не превышает 0,022 %.

Введение. В процессе Государственных приемочных испытаний и после них были проведены дополнительные исследования метрологических характеристик измерительного канала относительной электропроводимости (ИК ОЭП) гидрологохимического модуля (МГХ) [1, 2] на предмет его использования в устройствах с более высокими требованиями к точности измерений, чем это было нужно для морской прибрежной станции.

Главное внимание при этих испытаниях уделялось исследованию температурного воздействия на электронные узлы модуля и оценке долговременной стабильности геометрической постоянной контактного датчика электропроводимости при длительном нахождении его в морской воде (влияние загрязнения, коррозия электродов, набухания изолирующих подложек и т.п.) В настоящей статье излагаются основные результаты проведенных исследований.

Структурно-функциональная схема измерительного канала и функция преобразования. На рисунке 1 представлена упрощенная структурно-функциональная схема измерительного канала электрической проводимости, где обозначено: 1 – первичный измерительный преобразователь электрической проводимости (ПИП ОЭП) с токовыми электродами T_1, T_2 и потенциальными электродами $П_1, П_2$; 2 – усилитель напряжения U_1 , снимаемого с потенциальных электродов $П_1, П_2$ ПИП ОЭП; 3 – элемент сравнения опорного напряжения $U_{on.}$ и напряжения $U_1 \cdot k_1$, где k_1 – коэффициент усиления усилителя 1; 4 – усилитель разностного сигнала $(U_{on.} - k \cdot U_1)$ с коэффициентом усиления k_2 ; 5 – генератор тока ГТ-1 с коэффициентом передачи k_3 ; 6 – генератор тока ГТ-2 с коэффициентом передачи k_4 ; 7 – аналого-цифровой преобразователь (АЦП).

Напряжение на потенциальных электродах ПИП ОЭП равно

$$U_1 = I_{ГТ-1} \cdot \frac{1}{G_o}, \quad (1)$$

где $I_{ГТ-1}$ – выходной ток ГТ-1;

$G_o = \chi \cdot k_o$ – проводимость участка между потенциальными электродами;

χ – удельная электрическая проводимость исследуемой воды;

k_o – геометрическая постоянная ПИП.

На выходе генератора тока ГТ-1 наблюдается ток, равный

$$I_{ГТ-1} = (U_{on.} - U_1 \cdot k_1) \cdot k_2 \cdot k_3. \quad (2)$$

Подставляя значение U_1 в (2), получим

$$I_{ГТ-1} = \chi \cdot U_{on.} \cdot \frac{1}{\frac{k_1}{k_1} + \frac{1}{k_2 \cdot k_3} \cdot \chi}. \quad (3)$$

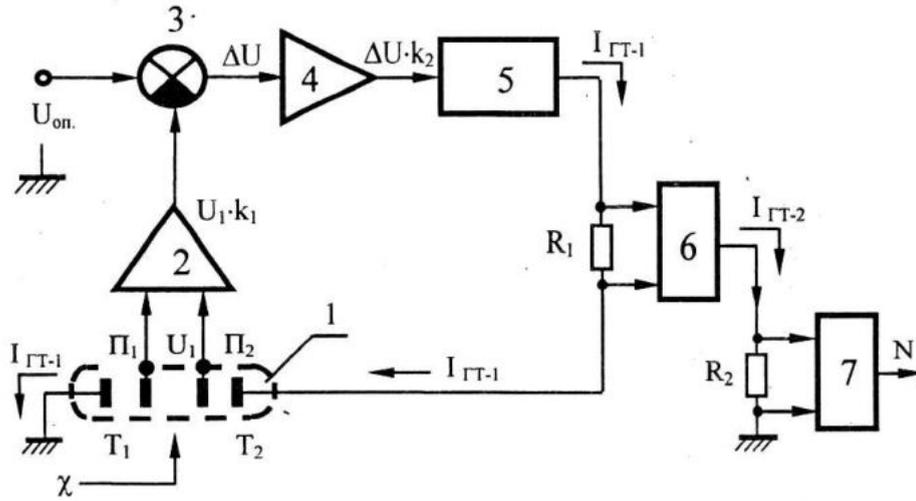


Рисунок 1 – Упрощенная структурно-функциональная схема ИК ОЭП

Напряжения на сопротивлениях R_1 и R_2 будут равны

$$U_{R_1} = I_{ГТ-1} \cdot R_1 = U_{оп.} \cdot \chi \cdot \frac{R_1}{\frac{k_1}{k_0} + \frac{1}{k_2 \cdot k_3} \cdot \chi}, \quad (4)$$

$$U_{вых} = U_{R_2} = I_{ГТ-2} \cdot R_2 = U_{оп.} \cdot \chi \cdot \frac{R_1 \cdot R_2 \cdot k_4}{\frac{k_1}{k_0} + \frac{1}{k_2 \cdot k_3} \cdot \chi}. \quad (5)$$

Выходной код N АЦП связан с величиной удельной электропроводимости следующим выражением

$$(a_0 + a_1 \cdot N) = U_{оп.} \cdot \frac{R_1 \cdot R_2 \cdot k_4}{\frac{k_1}{k_0} + \frac{1}{k_2 \cdot k_3} \cdot \chi}, \quad (6)$$

где a_0 – зона нечувствительности АЦП;

a_1 – цена единицы младшего разряда АЦП.

Градуировочное уравнение (обратная функция преобразования) будет иметь вид

$$\chi = (a_0 + a_1 \cdot N) \cdot \frac{k_1}{k_0 \left(U_{оп.} \cdot R_1 \cdot R_2 \cdot k_4 - \frac{1}{k_2 \cdot k_3} (a_0 + a_1 \cdot N) \right)}. \quad (7)$$

Поскольку относительная электрическая проводимость равна $R = \frac{\chi}{\chi_{35,15,0}}$, где χ – измеряемая удельная электрическая проводимость, а $\chi_{35,15,0}$ – удельная электриче-

ская проводимость образцового раствора морской воды с соленостью $S = 35,0$ при температуре $+15^\circ\text{C}$ и при атмосферном давлении ($P = 0$), то выражение (7) примет вид

$$R = \frac{1}{\chi_{35,15,0}} \cdot (a_0 + a_1 \cdot N) \cdot \frac{k_1}{k_0 \left(U_{on} \cdot R_1 \cdot R_2 \cdot k_4 - \frac{1}{k_2 \cdot k_3} (a_0 + a_1 \cdot N) \right)} \quad (8)$$

Как видно из выражения (8), стабильность показаний, а также погрешность измерения исследуемой схемы зависит от

стабильности, а также от величины параметров схемы.

Если $k_2 \cdot k_3 \approx \infty$, то выражение (8) преобразуется к следующему виду

$$R = \frac{1}{\chi_{35,15,0}} \cdot (a_0 + a_1 \cdot N) \cdot \frac{k_1}{k_0 \cdot U_{on} \cdot R_1 \cdot R_2 \cdot k_4} \quad (9)$$

и градуировочная характеристика становится линейной.

Однако предварительные лабораторные испытания показали, что функция преобразования (6) и градуировочная характеристика (8) нелинейны, вероятно, в следствие того, что $k_2 \cdot k_3 \neq \infty$.

Также при испытаниях было установлено, что окружающая температура оказывает существенное влияние на функцию преобразования, приводя к погрешности измерения, достигающей $\Delta R = \pm 0,0026$.

Особенно подвержены влиянию температуры коэффициенты усиления и передачи k_1, k_2, k_3, k_4 , а также источник опорного напряжения U_{on} и резисторы R_1, R_2 (в схему были поставлены термостабильные резисторы с $TKC = 5 \cdot 10^{-6}$).

Температурная нестабильность геометрической постоянной k_0 не была выявлена,

но ее уход автоматически учитывался в процессе градуировки, поскольку температура ПИП полностью совпадала с температурой градуировочного раствора, по которой вычислялась относительная электропроводимость R при известной солености S раствора.

Исследование температурной зависимости функции преобразования и градуировочной характеристики. Для оценки температурного влияния на электронные узлы схемы был проведен специальный эксперимент, который позволил выявить функцию влияния температуры на показания измерительного канала.

Для этой цели был изготовлен "сухой" имитатор первичного измерительного преобразователя, схема которого показана на рисунке 2.

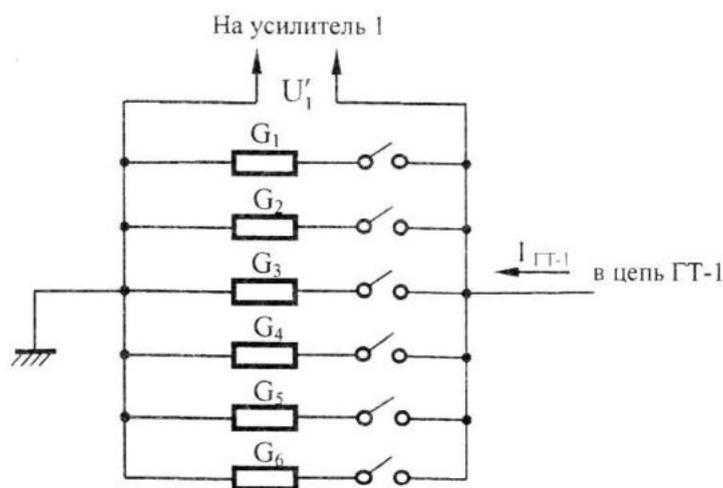


Рисунок 2 – Имитатор проводимости

Значения резистивных проводимостей, имитирующие проводимость воды были выбраны равными:

$$G_1 = 769 \cdot 10^{-3} \text{ Сим};$$

$$G_2 = 625 \cdot 10^{-3} \text{ Сим};$$

$$G_3 = 500 \cdot 10^{-3} \text{ Сим};$$

$$G_4 = 333,3 \cdot 10^{-3} \text{ Сим};$$

$$G_5 = 200 \cdot 10^{-3} \text{ Сим};$$

$$G_6 = 50 \cdot 10^{-3} \text{ Сим},$$

что примерно полностью охватило заданный диапазон изменений проводимости морской воды для ПИП данного типа.

Измерительный блок помещался в термостат, в котором ступенчато менялась температура от 6 до 37 °С с выдержкой на каждой ступеньке не менее 30 минут, чтобы полностью установилась температура всех элементов ИК ОЭП. Имитатор ПИП находился при комнатной температуре, а проводимости имитатора за время эксперимента оставались постоянными в пределах $\pm 5 \cdot 10^{-6} \cdot G_i$.

Температура $t_{\text{в.к.}}$ элементов ИК ОЭП внутри контейнера измерялась с помощью встроенного цифрового термометра с погрешностью $\pm 0,5$ °С.

В результате исследования была установлена связь выходного кода N_i с температурой $t_{\text{в.к.}}$ внутри контейнера для каждой проводимости имитатора:

$$N_1 = 15105974 + 6519,3 \cdot (t_{\text{в.к.}} - t_o) \quad - \text{ для } G_1; \quad (10)$$

$$N_2 = 12385556 + 5111,3 \cdot (t_{\text{в.к.}} - t_o) \quad - \text{ для } G_2; \quad (11)$$

$$N_3 = 10230035 + 4241,8 \cdot (t_{\text{в.к.}} - t_o) \quad - \text{ для } G_3; \quad (12)$$

$$N_4 = 6939543 + 2670,6 \cdot (t_{\text{в.к.}} - t_o) \quad - \text{ для } G_4; \quad (13)$$

$$N_5 = 4249392 + 1541,5 \cdot (t_{\text{в.к.}} - t_o) \quad - \text{ для } G_5; \quad (14)$$

$$N_6 = 999868 + 925,8 \cdot (t_{\text{в.к.}} - t_o) \quad - \text{ для } G_6. \quad (15)$$

Свободные члены этих выражений являются показаниями АЦП, соответствующие кодам при $t = t_o = 0$ °С.

Чтобы получить однозначную связь $N_i = f(G_i)$ необходимо скомпенсировать влияние температуры на показания ИК ОЭП и привести коды $N_i = f(G_i, t_i)$ к одной фиксированной температуре t_o , т.е. к $N_{oi} = f(G_i, t_o)$, где t_o – значение температуры внутри контейнера, при которой производится градуировка ИК ОЭП по имитатору проводимости.

Как видно из выражений (10) – (15) температурный коэффициент α_i кодов N_i зависит от начального кода $N_{oi} = f(G_i, t_o)$,

причем эта зависимость хорошо аппроксимируется следующим выражением

$$\alpha_i = a_o + a_1 \cdot N_{oi} + a_2 \cdot N_{oi}^2, \quad (16)$$

где $a_o = 589,97$;

$$a_1 = 2,2168 \cdot 10^{-4};$$

$$a_2 = 1,15751 \cdot 10^{-11}.$$

Тогда показания ИК ОЭП при любой температуре t_i и проводимости G_i могут быть приведены к температуре t_o по следующей формуле

$$N_{oi} = N_i - (a_o + a_1 \cdot N_{oi} + a_2 \cdot N_{oi}^2) \cdot (t_i - t_o). \quad (17)$$

Решая это уравнение относительно N_{oi} , получим

$$N_{oi} = \frac{-[1 + a_1(t_i - t_o)] + \sqrt{[1 + a_0(t_i - t_o)]^2 + 4a_2 \cdot (t_i - t_o) \cdot [N_i - a_0 \cdot (t_i - t_o)]}}{2a_2 \cdot (t_i - t_o)} \quad (18)$$

Для нашего конкретного случая при $t_o = 0$, получим следующее выражение

$$N_{oi} = \frac{-[1 + 2,2168 \cdot 10^{-4} \cdot (t_{г.к.})_i] + \sqrt{[1 + 589,97 \cdot (t_{г.к.})_i]^2 + 4,6304 \cdot (t_{г.к.})_i [N_i - 589,97(t_{г.к.})_i]}}{2,31502 \cdot 10^{-11} \cdot (t_{г.к.})_i} \quad (19)$$

которое использовалось при градуировке измерительного канала относительной электрической проводимости по растворам морской воды.

Результаты градуировки ИК ОЭП.
Градуировка измерительного канала производилась на оборудовании метрологической службы МГИ НАН Украины с использованием лабораторного электросолемера СОКОЛ 4602 МГИ с неисключенной по-

грешностью не более $\pm 8 \cdot 10^{-5}$ по относительной электрической проводимости и рабочего эталона температуры с неисключенной погрешностью $\pm 0,002$ °C. Все отсчеты выходного кода АЦП производились после коррекции влияния температуры на электронику ИК ОЭП по формуле (19).

В таблице 1 приведены основные результаты градуировки.

Таблица 1 – Результаты градуировки ИК ОЭП

Но- мер из- ме- ре- ния	Код ИК ОЭП, приведен- ный к $t = 0$ °C, N_{oi} , ед.	Образо- вое значе- ние ОЭП рабочего раствора, R_{oi} , °C,	Показание ИК ОЭП в единицах ОЭП, R_i	Погрешность $\Delta R_i =$ $= R_i - R_{oi}$	$M[\Delta R_i]$	$\Delta_i = \Delta R_i -$ $- M[\Delta R_i]$	Темпера- тура рабочего раствора, °C
1	16325000	1,483635	1,483398	-0,000237	0,000000	-0,000237	33,7386
2	16330000	1,483607	1,483775	0,000168		0,000168	33,7375
3	16330000	1,483579	1,483775	0,000194		0,000194	33,7365
4	16325000	1,483523	1,483398	-0,000125		-0,000125	33,7343
5	12381800	1,169602	1,169618	0,000016	0,0000005	0,000011	24,4286
6	12381700	1,169577	1,169609	0,000032		0,000027	24,4275
7	12381400	1,169577	1,169584	0,000007		0,0000065	24,4275
8	12380400	1,169551	1,169498	-0,000053		-0,0000525	24,4263
9	6630600	0,625073	0,625085	0,000012	-0,0000005	0,0000125	16,3432
10	6630800	0,625089	0,625105	0,000016		0,0000165	16,3443
11	6630700	0,625105	0,625095	-0,000010		-0,0000095	16,3454
12	6630600	0,625105	0,625085	-0,000020		-0,0000195	16,3454
13	4116700	0,390740	0,390722	-0,000018	0,0000005	-0,0000185	8,1757
14	4116900	0,390751	0,390739	-0,000012		-0,0000125	8,1768
15	4117300	0,390763	0,390774	0,000011		0,0000105	8,1779
16	4117600	0,390778	0,390799	0,000021		0,0000205	8,1791
17	2747500	0,282342	0,282342	0,000000	0,000000	0,000000	1,1757
18	2747500	0,282342	0,282342	0,000000		0,000000	1,1757
19	2747500	0,282342	0,282342	0,000000		0,000000	1,1757
20	2747500	0,282342	0,282342	0,000000		0,000000	1,1757

По результатам градуировки получена следующая градуировочная характеристика

$$R_i = 1,48343 \cdot 10^{-1} + 2,095952 \cdot 10^{-8} \cdot N_{oi} + 1,215738 \cdot 10^{-14} \cdot N_{oi}^2 - 7,816308 \cdot 10^{-22} \cdot N_{oi}^3 + 1,623873 \cdot 10^{-29} \cdot N_{oi}^4 \quad (20)$$

Систематическая составляющая погрешности градуировочной характеристики не превышает $\pm 5 \cdot 10^{-7}$, а среднее квадратическое отклонение случайной составляющей погрешности в диапазоне ОЭП от $R = 0,15$ (при температуре раствора $1,7 \text{ }^\circ\text{C}$) до $R = 1,17$ (при температуре $24,4 \text{ }^\circ\text{C}$) составляет $\sigma_R = 1,93 \cdot 10^{-5}$, что при доверительной вероятности $0,95$ приведет к случайной погрешности в этом диапазоне измерений не более $\Delta_R \leq 3,8 \cdot 10^{-5}$, что в эквиваленте солёности в соответствии с ШПС-1978 при температуре морской воды $t = 1,7 \text{ }^\circ\text{C}$ составит $\Delta_S \leq \pm 0,0023$, а при температуре $t = 30 \text{ }^\circ\text{C}$ – $\Delta_S \leq \pm 0,001$ единиц практической солёности (пс).

В точке с температурой воды $t = 33,7 \text{ }^\circ\text{C}$ случайная погрешность достигает $\Delta_R = (-2,66 \cdot 10^{-4} \div 1,89 \cdot 10^{-4})$, что в эквивалента солёности составляет $\Delta_S = (-0,007 \div 0,005)$ пс. Столь большая случайная погрешность вероятнее всего

была вызвана, с одной стороны, высоким темпом изменения температуры в градуировочном баке, с другой, наличием пузырьков воздуха на контактах датчика электропроводности, которые возникли в результате выделения из воды воздуха при повышении температуры в градуировочном баке.

Исследование долговременной стабильности первичного измерительного преобразователя электропроводности. Для этой цели погружаемое устройство гидрологохимического модуля было установлено в бак с морской водой с солёностью $17\text{--}18$ пс, включалось каждый день на протяжении 34 суток. При этом главным вопросом исследования являлось загрязнение (покрытие слизью, коррозия и т.п.).

Проверка загрязнения производилась в последний день путем многократной протирки датчика электропроводности ватно-марлевым тампоном непосредственно в морской воде без подъема измерительного модуля из градуировочного бака и без изменения положения модуля в баке. Были сделаны записи показаний ИК ОЭП до и после протирки контактного ПИП.

В таблице 2 приведены основные данные этой проверки.

Таблица 2 – Сравнительные данные показаний модуля до и после протирки ПИП ОЭП

Показания модуля до протирки ПИП ОЭП		Показания модуля после протирки ПИП ОЭП	
Средняя температура в баке, $t_{до}, \text{ }^\circ\text{C}$	Средний код ИК ОЭП, $N_{до}, \text{ ед.}$	Средняя температура в баке, $t_{после}, \text{ }^\circ\text{C}$	Средний код ИК ОЭП, $N_{после}, \text{ ед.}$
20,338	6126666,7	20,380	6133888,9

Общая разница в показаниях $(\Delta N)_{\Sigma} = N_{\text{после}} - N_{\text{до}} = 7222,2 \text{ ед.}$

Эта разница складывается из изменения показаний ИК ОЭП в зависимости от роста температуры при протирке (в воду погрузились руки оператора и нагрели ее) и в зависимости от чистки датчика.

$$\Delta R = R_{\text{до}} \cdot [(r_t)_{\text{после}} - (r_t)_{\text{до}}], \quad (21)$$

где

$$r_t = 0,6766097 + 2,00564 \cdot 10^{-2} \cdot t + 1,10425 \cdot 10^{-4} \cdot t^2 - 6,9698 \cdot 10^{-7} \cdot t^3 + 1,0031 \cdot 10^{-9} \cdot t^4; \quad (22)$$

Подставляя в выражение (22) значения $t = t_{\text{до}}$ и $t = t_{\text{после}}$, получим:

$$(r_t)_{\text{до}} = 1,12444801; \quad (r_t)_{\text{после}} = 1,1255226;$$

$$\Delta r_t = (r_t)_{\text{после}} - (r_t)_{\text{до}} = 0,0010746;$$

$$\Delta R = R_{\text{до}} \cdot \frac{\Delta r_t}{(r_t)_{\text{до}}} = R_{\text{до}} \cdot 0,00095566.$$

Заменяя $R_{\text{до}}$ на эквивалентное $(N_R)_{\text{до}} = 6126666,7$ получим изменение $(\Delta N)_t$, вызванное только изменением температуры $(\Delta N)_t = \frac{\Delta r_t}{(r_t)_{\text{до}}} = 6126666,7 * 0,00095566 = 5855,01.$

Следовательно, загрязнение ПИП ОЭП привело к изменению кода

Изменение показаний из-за роста температуры вычислялось следующим образом. Поскольку в процессе протирки соленость раствора не менялась относительная электропроводимость раствора после нагрева ΔR равна [3]

$$(\Delta N)_{\text{загр}} = (\Delta N)_{\Sigma} - (\Delta N)_t = 1367,21 \text{ ед.}$$

Это соответствует относительной погрешности ИК ОЭП из-за загрязнения

$$\frac{(\Delta N)_{\text{загр.}}}{N_{\text{до}}} = \frac{1367,21}{6126666,7} = 0,00022 \text{ (0,022 \%)}$$

за 34 дня, что соответствует абсолютной погрешности при $R = R_{\text{max}} = 1,7$

$$(\Delta R)_{\text{загр.}} = \frac{(\Delta N)_{\text{загр.}}}{(N)_{\text{до}}} \cdot 1,7 = 0,00038.$$

Если условия загрязнения в баке эквивалентны условиям загрязнения в реальном море, то при заданной погрешности $(\Delta R)_{\text{дон}} = 0,003$ за 4 месяца по техническому заданию на МГХ [1], можно предположить, что модуль простоит в море без обслуживания около

$$n = \frac{(\Delta R)_{\text{дон}}}{(\Delta R)_{\text{загр}}} = \frac{0,003}{0,00038} \approx 7,9 \text{ месяцев}$$

не выходя за допустимую величину погрешности по ИК ОЭП.

Заключение. В результате проведенного исследования измерительного канала относительной электрической проводимости гидрологохимического модуля морской прибрежной станции установлено, что благодаря учету функции влияния температуры контейнера на электронные компоненты измерительного канала в алгоритме первичной обработки получаемой информации можно значительно повысить метрологические характеристики канала. Это может позволить использовать данную схему в измерителях более высокой точности таких, например, как зондирующие комплексы, где допустимая приведенная погрешность не должна превышать $(0,01 \div 0,005)\%$ по относительной электропроводимости, что в эквиваленте солености соответствует погрешности $(0,004 \div 0,002)$ единиц практической солености. Однако это потребует дополнительных морских испытаний для установления функций влияния температуры и давления на геометрическую постоянную ПИП.

Также установлено, что применяемая конструкция контактного датчика электрической проводимости обладает достаточно высокой долговременной стойкостью к загрязнению при непрерывном длительном нахождении датчика в морской воде (не обрастает слизью, не корродирует). Это качество дает надежду на то, что модуль в со-

ставе станции может проработать без обслуживания датчика электропроводимости при допустимой погрешности измерений $\Delta R = \pm 0,003$ значительно большее время, чем было задано в техническом задании (предположительно восемь месяцев вместо заданных четырех). Однако только опытная эксплуатация модуля в составе станции в реальных морских условиях может подтвердить или опровергнуть полученные в лабораторных условиях показатели долговременной стабильности измерительного канала относительной электрической проводимости.

ЛИТЕРАТУРА

1. В.А. Гайский, Н.А. Греков, П.В. Гайский и др. Морская прибрежная станция "Бриз-1". Системы контроля окружающей среды: Сб. науч. тр. / НАН Украины. МГИ: – Севастополь. 2006. – С. 9–23.
2. В.А. Гайский, А.В. Клименко, А.Н. Греков, Д.М. Васильев. Измеритель электропроводности жидкости. Системы контроля окружающей среды: Сб. науч. тр. / НАН Украины. МГИ: – Севастополь. 2005. – С. 81–84.
3. R.G. Perkin, E.L. Lewis. The practical Salinity Scale 1978: Fitting the date/ IEEE Journal of oceanic Engineering, Vol. OE-5, No. 1. 1980. – P. 9–16.