

ИНСТРУМЕНТАЛЬНЫЕ ПОГРЕШНОСТИ СОЛЕМЕРОВ ТИПА AUTOLAB И ГМ-65

В.И.Забурдаев

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

Введение. При анализе результатов сличений индуктивных солемеров типа Autolab (CSIRO, Австралия) и ГМ-65 ("Гидрометприбор", СССР) были обнаружены [1] большие расхождения в их показаниях в сравнении с прецизионным компаратором РСС (NOIC, США) по контрольным пробам в период 1974-1975 гг., а также с показаниями современных средств измерений солености в придонных водах Черного моря в период с 1988 по 1993 гг. Эти расхождения в 2-10 и более раз превышали паспортные погрешности сличаемых приборов. В работе [1] было показано, что эти расхождения могли быть вызваны как методическими погрешностями (особенно при сравнении показаний в натурных условиях, например вызванных изменчивостью солености проб в процессе отбора, хранения или транспортировки их), так и инструментальными погрешностями этих приборов.

Настоящая работа посвящена оценке возможных инструментальных погрешностей солемеров типа ГМ-65 и Autolab, а также выработке отдельных предложений и рекомендаций для их доработки с целью повышения метрологических характеристик, особенно ГМ-65, большой парк которых еще находится в экс-

плуатации в отдельных странах СНГ. В связи с тем, что при создании солемера ГМ-65 была взята за основу функционально-электрическая схема широкодиапазонной модели прибора Autolab [2], включая даже номинальные значения параметров радиоэлементов основных узлов схемы, остановимся на анализе инструментальных погрешностей только прибора ГМ-65, допуская предположения их существования и в моделях солемера Autolab.

Функционально-электрическая схема солемера ГМ-65 и основное уравнение измерений

На рис. 1 приведена функционально-электрическая схема с указанием функционального назначения основных элементов схемы, где обозначено: Г – генератор переменного тока $U = 10 \text{ В}$, $f_r = 10^4 \text{ Гц}$, ИДН – 5-ти декадный индуктивный делитель напряжения; Z_1 – сопротивление для калибровки солемера ("калибровка"); Z_2 – сопротивление, обеспечивающее настройку схемы термокомпенсации ("компенсация"); ИЯ – измерительная ячейка; Тр.1 – трансформатор напряжения (питающий трансформатор) датчика электропроводимости; R_s – эквивалентное сопротивление жидкостного витка исследуемой воды; R_t – термистор, компенсирующий температурную зависимость нормальной воды с соленостью точно 35; Тр.2 – трансформатор сравнения токов витка воды \dot{I}_s и компенсации \dot{I}_k ; У – усилитель сигнала рассогласования; ФД – фазовый детектор; ФСЦ – фазосдвигающая цепь; ИБ – индикатор баланса; К - переключа-

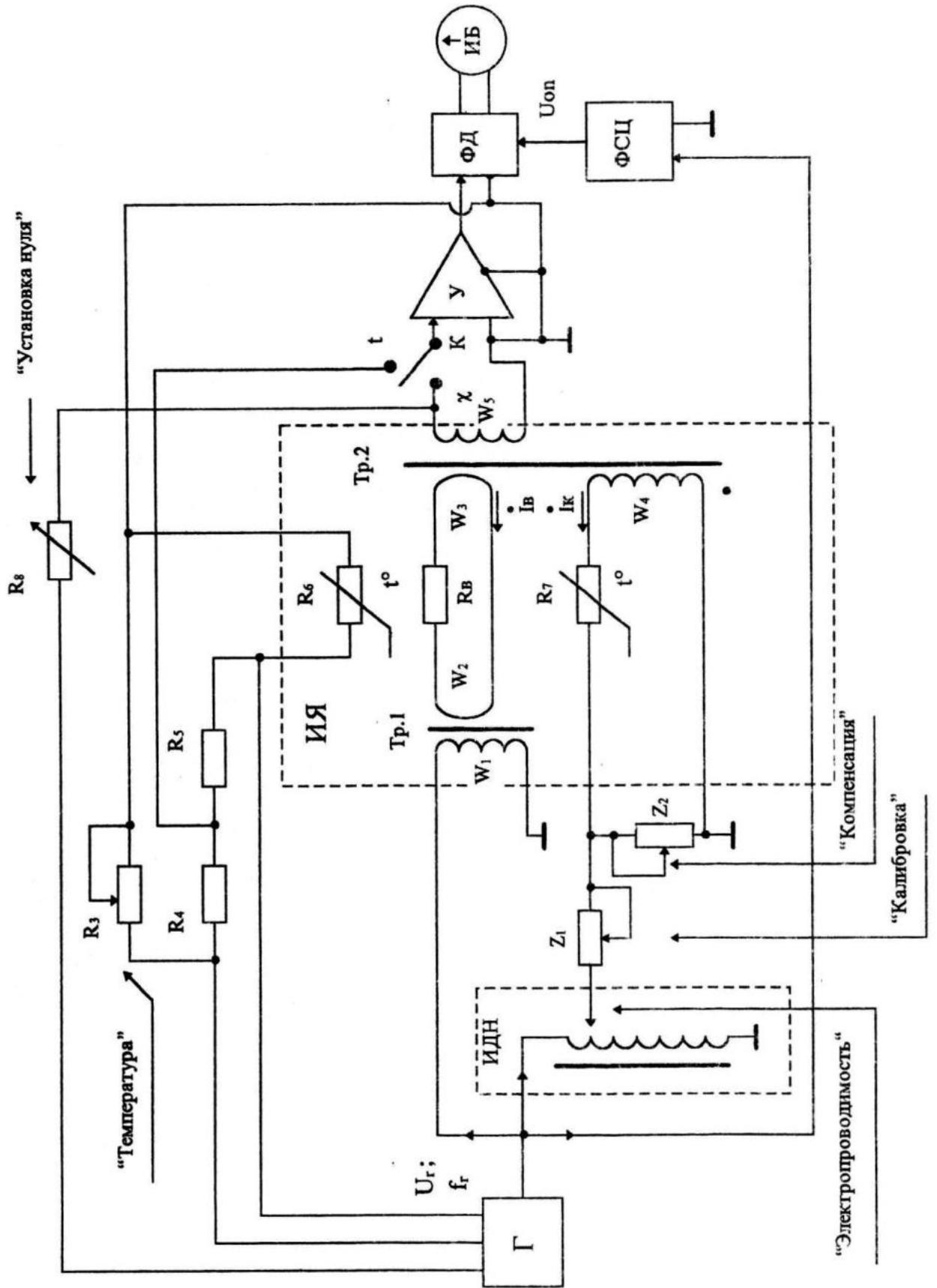


Рисунок 1 - Упрощенная функционально-электрическая схема электросолемера ТМ-65

тель режимов измерения электропроводимости (положение "χ") и температуры пробы воды (положение "t"); R_3, R_4, R_5 – сопротивления плеч моста для измерения температуры пробы воды в камере измерительной ячейки; R_6 – термистор для измерения температуры пробы воды; R_8 – сопротивление для установки нуля прибора.

Сопротивление жидкостного витка воды R_s определяется удельной электрической проводимостью исследуемой пробы $χ$ и величиной геометрической постоянной измерительной ячейки I_d . В свою очередь удельная электропроводимость зависит от солености S , температуры t и давления P и записывается в виде $χ = χ(S, t, P)$. Поскольку при измерениях с помощью лабораторного солемера давление равно атмосферному, принимается $P = 0$ и в дальнейшем индекс P опускается. Геометрическая постоянная измерительной ячейки также зависит от температуры и давления $I_d = I_d(t, P)$, но учитывая, что $P = 0$, этот индекс также опускается. Тогда в общем виде можем записать

$$R_s = \frac{1}{G_s} = \frac{1}{χ(S, t) I_d(t)} , \quad (1)$$

где G_s , $\frac{1}{\text{Ом}}$ – проводимость жидкостного витка воды.

Отсчет показаний солемера производится в тот момент, когда индикатор баланса показывает нулевое значение, т.е. равенство двух взаимно

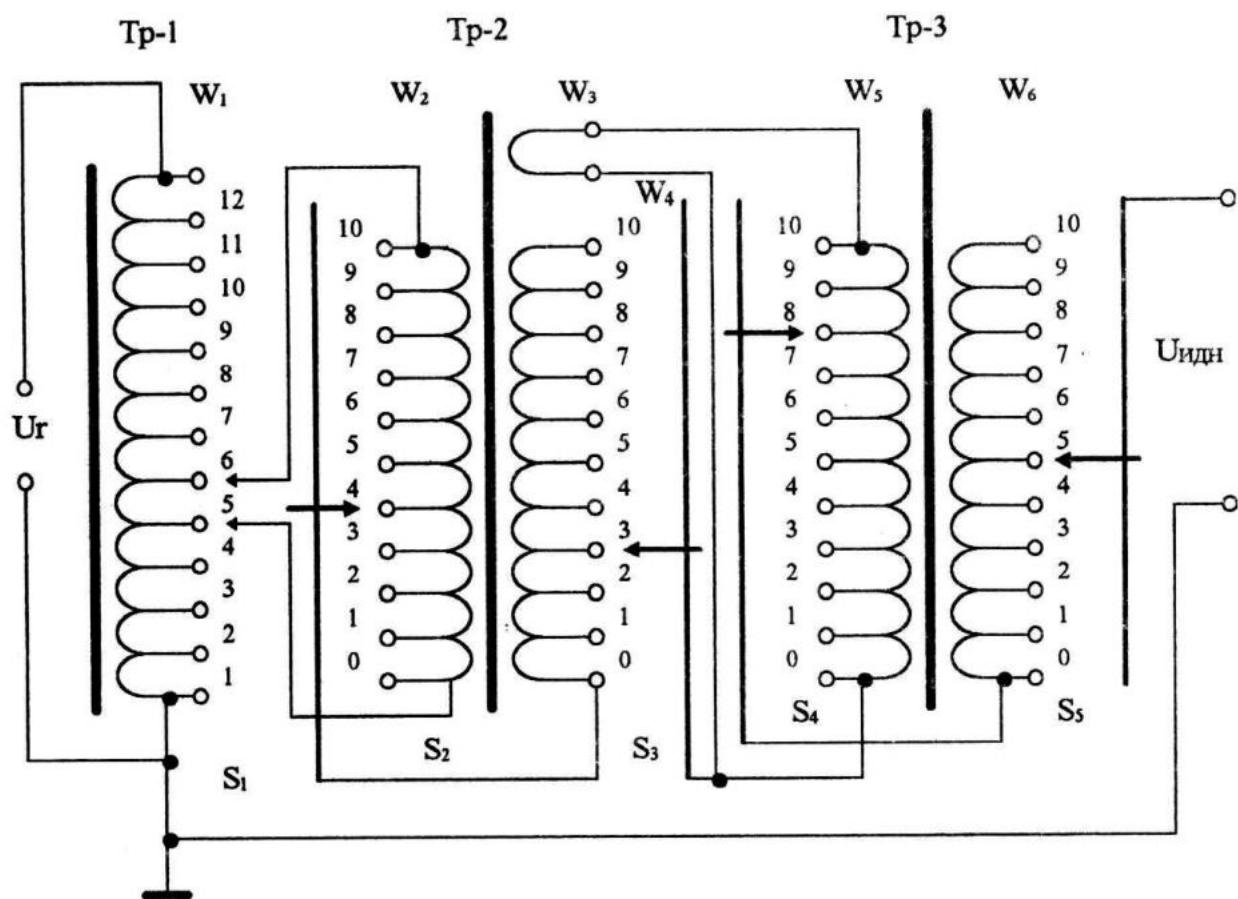
компенсирующих намагничивающих сил в трансформаторе Тр-2: тока витка воды I_s и тока компенсации I_k

$$I_s \cdot W_3 = I_k \cdot W_4 \quad (2)$$

На рис. 2 показана развернутая электрическая схема ИДН. Пять декад собраны на трех тороидальных сердечниках типа К-40 × 25 × 11 М6000 НМ-1. Количество секций и число витков в каждой секции отдельных декад приведены в пояснениях к рис. 2. В связи с тем, что в процессе и в момент уравновешивания через все обмотки индуктивного делителя проходит ток, на выходе ИДН устанавливается напряжение, отличающееся от теоретического значения $U_{\text{ИДН}} = U_r \cdot N_d$ в связи с частичным падением напряжения на выходном сопротивлении декадных обмоток и потерями в сердечниках. Выходное сопротивление делителя Z_d имеет комплексный характер. Действительная (активная) составляющая R_d определяется активным сопротивлением обмоток, контактов галетных переключателей и потерями в сердечниках. Мнимая (реактивная) составляющая X_d определяется индуктивностями рассеяния в обмотках, межвитковыми емкостями и монтажными реактивностями. Принимая во внимание полное сопротивление витка воды и полное выходное сопротивление ИДН $Z_d = R_d + jX_d$ и допуская, что оно имеет индуктивный характер, т.е.

$$(\omega L_d)^2 + R_d^2 \gg \left(\frac{1}{\omega C_d} \right) \quad (3)$$

можно написать



W_1	$= 3 \times 12 = 36$	витков	ПЭВ-2, \emptyset 1.2	$r_{c1} \approx 0.0024$	Ом
W_2	$= 10 \times 10 = 100$	витков	ПЭВ-2, \emptyset 0.51	$r_{c2} \approx 0.048$	Ом
W_3	=	1 виток	ПЭВ-2, \emptyset 1.2	$r_{c3} \approx 0.0008$	Ом
W_4	$= 1 \times 10 = 10$	витков	ПЭВ-2, \emptyset 1.2	$r_{c4} \approx 0.0008$	Ом
W_5	$= 10 \times 10 = 100$	витков	ПЭВ-2, \emptyset 0.51	$r_{c5} \approx 0.048$	Ом
W_6	$= 1 \times 10 = 10$	витков	ПЭВ-2, \emptyset 1.2	$r_{c6} \approx 0.0008$	Ом

Рисунок 2 - Упрощенная электрическая схема индуктивного делителя напряжения

$$\dot{I}_e \cdot W_3 = U_r \cdot \frac{W_2 \cdot W_3}{W_1} \left\{ \frac{R_e}{R_e^2 + [X_e + \omega (L_2 + L_3)]^2} - j \frac{X_e + \omega (L_2 + L_4)}{R_e^2 + [X_e + \omega (L_2 + L_3)]^2} \right\}, \quad (4)$$

$$\dot{I}_k \cdot W_4 = U_r \cdot N_d \cdot W_4 \left(\frac{R_2 \cdot A + X_2 \cdot B}{A^2 + B^2} + j \frac{X_2 \cdot A - R_2 \cdot B}{A^2 + B^2} \right), \quad (5)$$

где R_e , X_e - активная и реактивная составляющие сопротивления витка воды соответственно;

L_2 , L_3 - индуктивности "обмоток"

$$A = R_d \cdot R_2 + R_d \cdot R_7 + R_d \cdot r_4 - X_d \cdot X_2 - X_d \cdot \omega L_4 + R_1 \cdot R_2 + R_1 \cdot R_7 + r_4 \cdot R_1 - X_1 \cdot X_2 - X_1 \cdot \omega L_4 + R_2 \cdot R_7 + R_2 \cdot r_4 - X_2 \cdot \omega L_4, \quad (6)$$

$$B = X_2 \cdot R_d + R_d \cdot \omega L_4 + X_d \cdot R_2 + X_d \cdot R_7 + X_d \cdot r_4 + X_2 \cdot R_1 + R_1 \cdot \omega L_4 + X_1 \cdot R_2 + X_1 \cdot R_7 + X_1 \cdot r_4 + R_2 \cdot \omega L_4 + X_2 \cdot R_7 + X_2 \cdot r_4; \quad (7)$$

R_1 , X_1 , R_2 , X_2 - активная и реактивная составляющие комплексных сопротивлений Z_1 и Z_2 соответственно;

r_4 , L_4 - активное сопротивление и индуктивность обмотки в цепи компенсации W_q (включая индуктивность рассеяния).

Поскольку в процессе измерения

$$A_1 = R_d \cdot R_2 + R_d \cdot R_3 + R_d \cdot r_4 - X_d \cdot \omega L_4 + R_1 \cdot R_2 + R_1 \cdot R_7 + r_4 \cdot R_1 + R_2 \cdot R_7 + R_2 \cdot r_4, \quad (8)$$

W_2 , W_3 витка воды или его эквивалента (включая индуктивности рассеяния);

(после калибровки солемера) никаких переключений в магазинах сопротивлений Z_1 и Z_2 не производится (составляющие X_1 и X_2 остаются неизменными), для упрощения анализа можно допустить $X_1 = X_2 = 0$. Тогда упрощая выражения (6) и (7), получим

$$B_1 = R_d \cdot \omega L_4 + X_d \cdot R_2 + X_d \cdot R_7 + X_d \cdot r_4 + R_1 \cdot \omega L_4 + R_2 \cdot \omega L_4. \quad (9)$$

Условие (2) полного равновесия намагничивающих сил тока витка

воды и тока компенсации тогда будет иметь вид

$$\dot{U}_T \cdot \frac{W_2 \cdot W_3}{W_1} \left\{ \frac{R_s}{R_s^2 + [X_s + \omega(L_2 + L_3)]^2} - j \frac{X_s + \omega(L_2 + L_3)}{R_s^2 + [X_s + \omega(L_2 + L_3)]^2} \right\} = \\ = N_d \cdot \dot{U}_T \cdot W_4 \left(\frac{R_2 \cdot A_1}{A_1^2 + B_1^2} - j \frac{R_2 \cdot B_1}{A_1^2 + B_1^2} \right) . \quad (10)$$

Поскольку в солемере используется фазовый детектор (уравновешивание с помощью ИДН только активных составляющих намагничивающих сил тока витка воды и тока компенсации), в момент равно-

весия справедливо соотношение

$$\operatorname{Re} \dot{I}_s \cdot W_3 = \operatorname{Re} \dot{I}_k \cdot W_4 \quad (11)$$

и выражение (10) после преобразования принимает вид

$$N_d = \frac{W_2 \cdot W_3}{W_1 \cdot W_4} \cdot \frac{G_s (A_1^2 + B_1^2)}{\left\{ 1 + G_s^2 \cdot [X_s + \omega(L_2 + L_4)]^2 \right\} \cdot A_1 \cdot R_2} . \quad (12)$$

Выражение (12) есть основное измерительное уравнение солемера, связывающее коэффициент деления индуктивного делителя N_d с электропроводимостью G_s пробы воды, залитой в измерительную ячейку или с

электропроводимостью эквивалента витка воды.

При калибровке солемера и при измерении проводимости исследуемой пробы устанавливается связь между следующими элементами

$$(N_d)_k = f_k [(G_s)_k, (A_1)_k, (B_1)_k, (R_2)_k, (X_s)_k, (L_2 + L_3)_k] , \quad (13)$$

$$(N_d)_x = f_x [(G_s)_x, (A_1)_x, (B_1)_x, (R_2)_x, (X_s)_x, (L_2 + L_3)_x] , \quad (14)$$

где индексы k и x соответствуют этим двум режимам соответственно.

Тогда относительная электропроводимость, которая будет вычислена

по показаниям коэффициентов деления ИДН, с учетом выражения (1), будет иметь вид

$$R'_{x,t} = \frac{(N_d)_x}{(N_d)_k} = R_{x,t} \cdot \frac{(I_d)_x}{(I_d)_k} \cdot \frac{[(A_1)_x^2 + (B_1)_x^2] \left\{ 1 + (G_s)_k^2 [(X_s)_k + \omega(L_2 + L_4)]^2 \right\}}{[(A_1)_k^2 + (B_1)_k^2] \left\{ 1 + (G_s)_x^2 [(X_s)_x + \omega(L_2 + L_4)]^2 \right\}} \cdot \frac{(A_1)_k \cdot (R_2)_k}{(A_1)_x \cdot (R_2)_x} , \quad (15)$$

где $R_{x,t} = \frac{\chi_{x,t}}{\chi_{n.b.,t}}$ - действительная (истинная) относительная электропроводимость исследуемой воды;

$\chi_x, \chi_{n.b.,t}$ - удельные электрические проводимости исследуемой воды и нормальной воды с $S = 35,0$ при температуре t ;

$(I_{\Delta})_x$; $(I_{\Delta})_k$ - геометрическая постоянная измерительной ячейки (рабочей камеры и собственно датчика) в момент измерения проводимости исследуемой и нормальной воды (калибровки) соответственно.

Выражение (15) есть основное измерительное уравнение электротензометров типа ГМ-65 или Autolab при измерении относительной элек-

тропроводимости. Как видно из этого уравнения $R'_{x,t}$, вычисленная по показателям коэффициента деления ИДН, отличается от действительного значения ОЭП R_x . Если выходное сопротивление ИДН имеет индуктивный характер, то абсолютное значение этой погрешности будет равно

$$\Delta(R_{x,t}) = R'_{x,t} - R_x = R_x \left(\frac{(I_{\Delta})_x}{(I_{\Delta})_k} \cdot \frac{[(A_1)_x^2 + (B_1)_x^2]}{[(A_1)_k^2 + (B_1)_k^2]} \cdot \frac{\{1 + (G_s)_k^2 [(X_s)_k + \omega(L_2 + L_3)]^2\}}{\{1 + (G_s)_x^2 [(X_s)_x + \omega(L_2 + L_3)]^2\}} \cdot \frac{(A_1)_k \cdot (R_2)_k}{(A_1)_x \cdot (R_2)_x} - 1 \right). \quad (16)$$

Если в выходном сопротивлении ИДН преобладает емкостная составляющая, т.е.

$$R_{\Delta}^2 + \left(\frac{1}{\omega C_{\Delta}} \right)^2 \gg (\omega L_{\Delta})^2, \quad (17)$$

то при предположении $X_1 = X_2 = 0$ (за период между калибровкой и измерением эти параметры сопротивлений Z_1, Z_2 не изменяются), получим

$$\begin{aligned} \Delta(R_{x,t}) = R_x & \left(\frac{(I_{\Delta})_x}{(I_{\Delta})_k} \cdot \frac{(E_x^2 + H_x^2) \{1 + (G_s)_k^2 [(X_s)_k + \omega(L_2 + L_4)]^2\}}{\{[(A_1)_k^2 + (B_1)_k^2] \{1 + (G_s)_x^2 [(X_s)_x + \omega(L_2 + L_4)]^2\}} \times \right. \\ & \left. \times \frac{(A_1)_k \cdot (R_2)_k}{(C_x \cdot E_x + D_x \cdot H_x)} - 1 \right), \end{aligned} \quad (18)$$

где $C_x = (R_2)_x \cdot (R_{\Delta})_x$, (19)

$$D_x = (R_2)_x \cdot \left(\frac{1}{\omega \cdot C_{\Delta}} \right)_x, \quad (20)$$

$$\begin{aligned}
E_x = & (R_1)_x \cdot (R_2)_x \cdot (R_{\Delta})_x + (R_1)_x \cdot (R_{\Delta})_x \cdot (R_7)_x + (R_1)_x \cdot (R_{\Delta})_x \cdot r_4 + \\
& + (R_{\Delta})_x \cdot \omega L_4 \cdot \left(\frac{1}{\omega C_{\Delta}} \right)_x + (R_1)_x \cdot \omega L_4 \cdot \left(\frac{1}{\omega C_{\Delta}} \right)_x + (R_{\Delta})_x \cdot (R_7)_x \cdot (R_2)_x + ; \quad (21) \\
& + (R_{\Delta})_x \cdot r_4 \cdot (R_2)_x + \left(\frac{1}{\omega C_{\Delta}} \right)_x \cdot (R_2)_x \cdot \omega L_4
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
H_x = & -(R_1)_x \cdot (R_g)_x \cdot \omega L_4 + (R_1)_x \cdot r_4 \left(\frac{1}{\omega C_{\Delta}} \right)_x + (R_{\Delta})_x \cdot \left(\frac{1}{\omega C_{\Delta}} \right)_x \cdot r_4 + \\
& + (R_1)_x \cdot (R_3)_x \cdot \left(\frac{1}{\omega C_{\Delta}} \right)_x + (R_{\Delta})_x \cdot (R_7)_x \cdot \left(\frac{1}{\omega C_{\Delta}} \right)_x + (R_1)_x \cdot (R_2)_x \cdot \left(\frac{1}{\omega C_{\Delta}} \right)_x + \\
& + (R_{\Delta})_x \cdot (R_2)_x \cdot \left(\frac{1}{\omega C_{\Delta}} \right)_x - (R_{\Delta})_x \cdot \omega L_4 \cdot (R_2)_x - \left(\frac{1}{\omega C_{\Delta}} \right)_x \cdot (R_7)_x \cdot (R_2)_x + \\
& + \left(\frac{1}{\omega C_{\Delta}} \right)_x \cdot r_4 \cdot (R_2)_x .
\end{aligned} \quad (22)$$

Как видно из выражений (16), (18) инструментальная погрешность лабораторных солемеров типа ГМ-65 и Autolab зависит от изменчивости параметров $A_1, B_1, C, D, E, H, X_1, \omega(L_2 + L_3), \omega L_4, I_{\Delta}$ за период между калибровкой и измерением проводимости исследуемой воды. Согласно выражениям (8, 9), (19, 20, 21, 22) изменчивость этих параметров зависит от изменчивости активной R_{Δ} и реактивной X_{Δ} - составляющих выходного сопротивления ИДН, а также от изменчивости R_1, R_2, R_7 .

Активная и реактивная составляющие выходного сопротивления ИДН

Активное сопротивление ИДН определяется активным сопротивлением обмоток декадных трансформа-

торов, выводных соединительных концов, а также сопротивлением подвижных контактов галетных переключателей. Тогда, учитывая (см. рис. 2), что первая, вторая и четвертая декады (обмотки W_1, W_2, W_5) включены идентично по выходному сигналу (выходное активное сопротивление определяется параллельным соединением активного сопротивления верхней и нижней обмоток относительно скользящего контакта), а в третьей и пятой декадах секции обмоток W_4, W_6 включены также одинаково, но последовательно, активная составляющая выходного сопротивления ИДН может быть вычислена по следующей формуле

$$R_D = \frac{(11 - n_{S1}) \cdot n_{S1} \cdot r_{C1}}{11} + \frac{(10 - n_{S2}) \cdot n_{S2} \cdot r_{C2}}{10} + n_{S3} \cdot r_{C4} + \frac{(10 - n_{S4}) \cdot n_{S4} \cdot r_{C5}}{10} + n_{S5} \cdot r_{C6} + r_{K1} + r_{K2} + r_{K3} + r_{K4} + r_{K5} + r_{\Pi}, \quad (23)$$

где $n_{S1}, n_{S2}, n_{S3}, n_{S4}, n_{S5}$ - номер позиции галетного переключателя от первой до пятой декады ИДН соответственно; $r_{C1}, r_{C2}, r_{C4}, r_{C5}, r_{C6}$ - активное сопротивление одной секции обмоток W_1, W_2, W_4, W_5, W_6 ИДН; $r_{K1}, r_{K2}, r_{K3}, r_{K4}, r_{K5}$ - сопротивление скользящих контактов галетных переключателей с первой по пятую декаду ИДН соответственно; r_{Π} - активное сопротивление монтажных проводов, соединяющих декады ИДН друг с другом, с генератором Г и резистором Z_2 (см. рис. 1).

На рис. 2 приведены ориентировочные значения активных сопротивлений отдельных секций обмоток ИДН, исходя из диаметра используемого провода, длины одного витка на тороидальном сердечнике типа К40 x 25 x 11 ($l_b = 0,06$ м). Переходное сопротивление скользящих контактов галетных переключателей типа ПГК, используемых в солемере ГМ-65, в нормальных условиях и при гарантированной износостойчивости (10000 переключений) не превышает (0,02÷0,025) Ом [3]. Поскольку в приборе применено параллельное соединение 4-х контактов для первой декады и 2-х контактов для остальных декад, диапазон изменчивости активных сопротивлений галетных переключателей будет лежать в пределах (0,005÷0,006) Ом для первой декады и (0,01÷0,012) Ом для

остальных четырех декад. Активное сопротивление монтажных проводов r_{Π} не превышает 0,01 Ом. Таким образом, согласно формуле (23) активная составляющая выходного сопротивления ИДН должна лежать в пределах от $R_D = R_{D\min} = 0,055$ Ом до $R_D = R_{D\max} = 0,4$ Ом для любых значений коэффициента деления N_D ИДН.

Как видно из формулы (23), минимальное сопротивление R_D должно наблюдаться в случае

$$n_{S1} = \begin{cases} 0 \\ 11 \end{cases}, \quad n_{S2} = \begin{cases} 0 \\ 10 \end{cases}, \quad n_{S3} = 0,$$

$$n_{S4} = 0, \quad n_{S5} = \begin{cases} 0 \\ 10 \end{cases}, \quad n_{\Pi} = 0,$$

а максимальное - при

$$n_{S1} = \begin{cases} 5 \\ 6 \end{cases}, \quad n_{S2} = 5, \quad n_{S3} = \begin{cases} 9 \\ 10 \end{cases},$$

$$n_{S4} = 5, \quad n_{S5} = \begin{cases} 9 \\ 10 \end{cases}.$$

Реальные значения активной составляющей выходного сопротивления в зависимости от коэффициента деления ИДН для случаев $R_{D\min}$ и $R_{D\max}$, измеренные в солемере ГМ-65 зав. № 40, не превышают вычислен-

ных значений и лежат в пределах 0,3÷0,4 Ом.

Погрешность измерения $(\Delta R_{x,t})_{RD}$ ОЭП, вызванная изменчивостью активной составляющей выходного сопротивления ИДН, можно оценить по формуле (16) путем упрощения при условии

$$X_D = 0, L_2 = L_3 = L_5 = 0, r_5 = 0;$$

$$(\Delta R_{x,t})_{RD} = R_x \cdot \frac{(R_D)_x - (R_D)_{\bar{x}}}{R_i}, \quad (24)$$

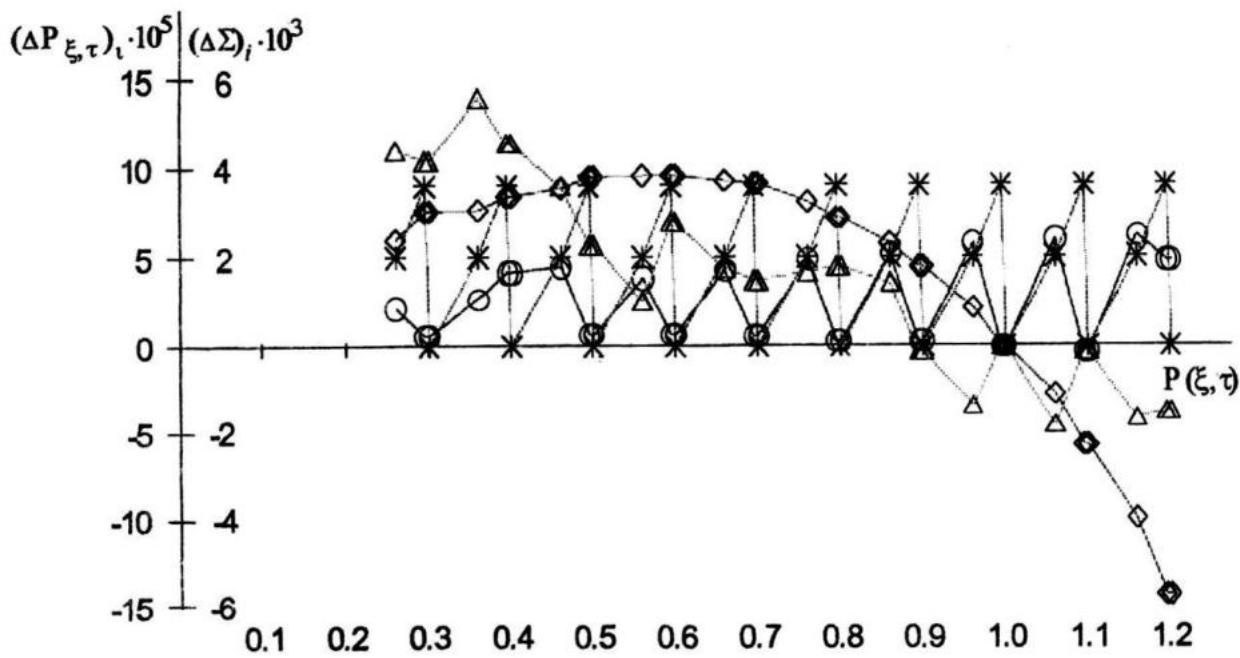
Возможные значения погрешности $(\Delta R_{x,t})_{RD}$ для средних температурных условий ($t \approx 18 \div 22^{\circ}\text{C}$) и $R_i = 3,5 \text{ кОм}$ показаны на рис. 3. Максимальная погрешность $(\Delta R_{x,t})_{RD}$ составляет $6,2 \cdot 10^{-5}$, что эквивалентно погрешности по солености $(\Delta S)_{RD} = 2,5 \cdot 10^{-3}$. Среднее квадратическое отклонение погрешности измерения ОЭП, вызванной изменчивостью R_D при изменении N_D (погрешность из-за дифференциальной нелинейности статической характеристики преобразования солемера) составит $(\sigma_s)_{RD} = 2 \cdot 10^{-5}$, что в эквиваленте солености составит $(\sigma_s)_{RD} = 0,0008$.

Все вышеприведенные оценки погрешности солемеров ГМ-65 получены в предположении, что число циклов переключений галетных переключателей не превышает 10000. Однако за один экспедиционный рейс (3-4 месяца в СССР) обрабатывалось на солемере не менее 2000÷4000 проб (100-200 гидрологических станций до

глубины 2000 м, 20 проб на каждой станции со стандартных горизонтов). Поскольку каждая проба должна измеряться не менее двух раз, число циклов переключений галетных переключателей может составить 4000-8000 за один рейс и 8000-16000 за год. При такой интенсивности работ за один год число циклов переключений ИДН превышает гарантированное изготовителем и допустимое сопротивление скользящих контактов может превысить гарантированное 0,025 Ом. Однако изготовитель [3] не дает информации об изменчивости переходного сопротивления контактов за пределами гарантированной наработки и оно может намного превышать номинальное значение.

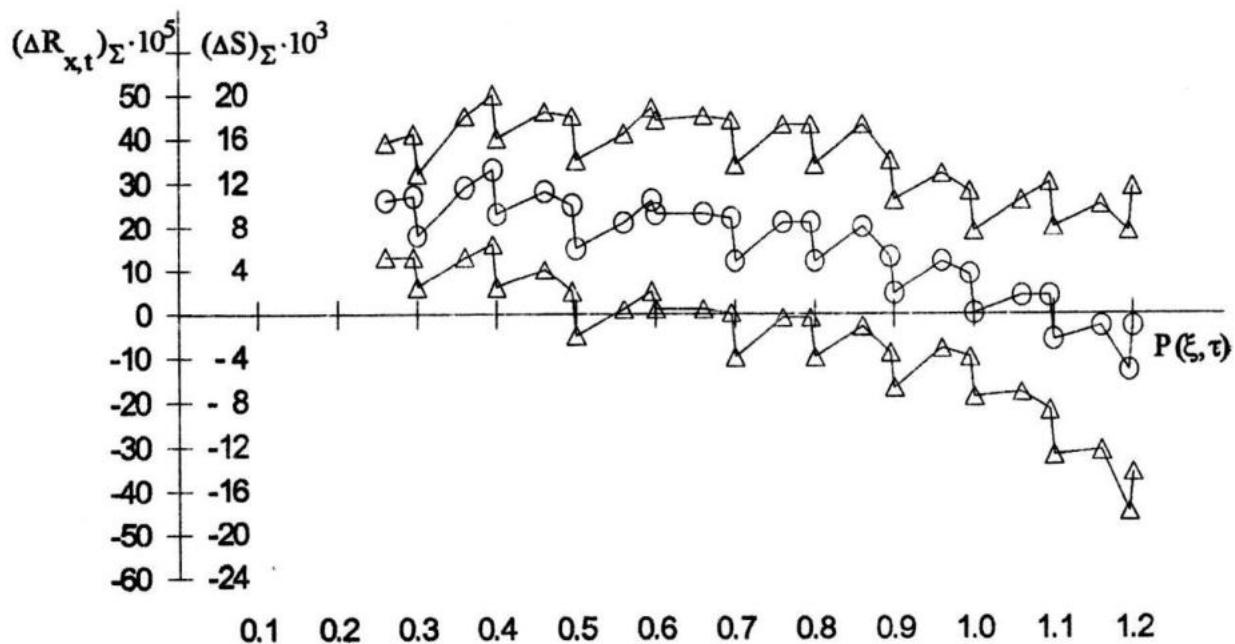
Реактивная составляющая выходного сопротивления индуктивного делителя в основном определяется индуктивностями рассеяния первичных и вторичных обмоток декад, в связи с чем непосредственному измерению не поддается. Теоретический расчет индуктивностей рассеяния также не даст требуемой точности, т.к. отсутствуют конкретные конструктивные данные по изготовлению декад трансформаторов.

Для оценки изменчивости реактивной составляющей сопротивления делителя была собрана электрическая схема, показанная на рис. 4, в которой использовались реальные узлы солемера ГМ-65 зав. № 40: датчик электрической проводимости Тр-1, Тр-2; ИДН; нуль - орган в составе штатного усилителя переменного тока без фазового различителя и электронного осциллографа как индикатора.



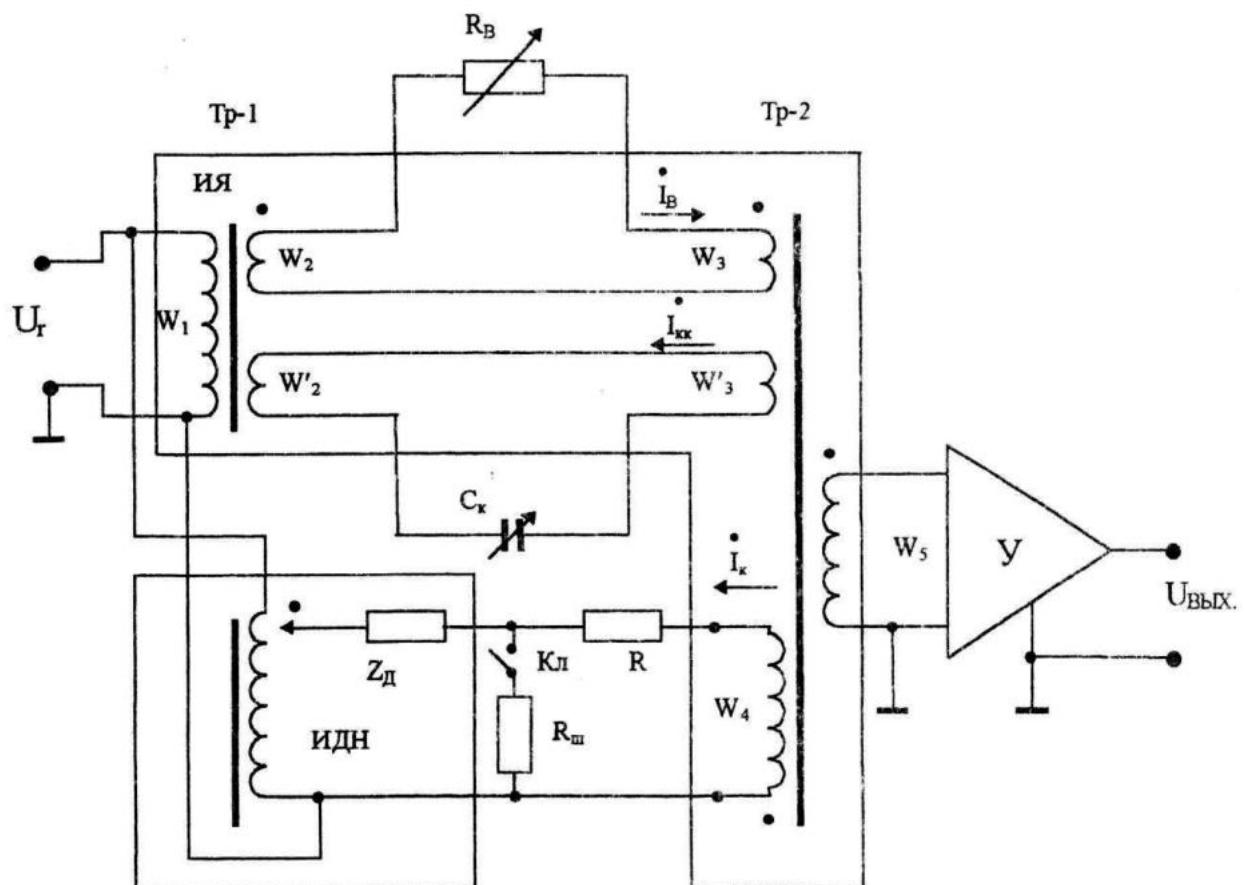
- - $(\Delta R_{x,t})_{R_D}$ - из-за активной составляющей выходного сопротивления ИДН;
- △ - $(\Delta R_{x,t})_{X_D}$ - из-за индуктивной составляющей выходного сопротивления ИДН;
- ◇ - $(\Delta R_{x,t})_{L_2, L_3}$ - из-за индуктивностей витка воды;
- * - $(\Delta R_{x,t})_{WC1}$ - из-за подгрузки секций первой декады.

Рисунок 3 - Составляющие систематической погрешности солемера ГМ-65

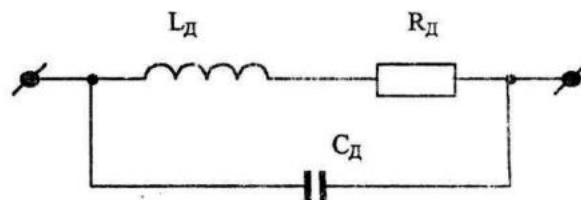


- - суммарная систематическая составляющая погрешности;
- △ - границы максимально возможной общей погрешности.

Рисунок 5 - Инструментальные погрешности измерения солемера ГМ-65



а)



б)

Рисунок 4 - Электрическая схема для измерения выходного импеданса индуктивного делителя напряжения Z_D (а)
и эквивалентная схема Z_D (б)

Уравновешивание моста производилось по активной и реактивной составляющим, для чего в контур компенсации был введен воздушный конденсатор переменной емкости C_k . Момент полного баланса определялся по минимальному значению сигнала на выходе усилителя. В связи с тем, что штатное сопротивление $Z_2 = R_2 = 75 \pm 100 \Omega$ (см. рис. 1) было убрано, для ограничения тока в цепи компенсации последовательно с сопротивлением r_1 вместо термистора R_7 было поставлено добавочное сопротивление типа БЛП $R = 20 \text{ к}\Omega$. Магазин сопротивления R_{mag} и проводник с сопротивлением r_{np} использовались в качестве эквивалента витка воды R_b . Проводимость витка

$$G_b = \frac{1}{R_{mag} + r_{np}}$$

устанавливалась с помощью магазина и в момент калибровки солемера подбиралось такое значение $(G_b)_k = \frac{1}{R_{mag} + r_{np}}$, чтобы

коэффициент деления ИДН составлял $(N_d)_k = 1,00000$. Калибровка производилась дважды: один раз при разомкнутом контакте K_d , другой - при замкнутом.

Для каждого установленного значения $(N_d)_k$ производилось уравновешивание моста с помощью магазина сопротивления также дважды - для разомкнутого и замкнутого состояния контакта K_d . Образцовое значение коэффициента деления делителя определялось по формулам

$$(N_d)_{obr,1} = \left(\frac{(R_b)_k}{(R_b)_X} \right)_{R_{sh}=\infty}, \quad (25)$$

$$(N_d)_{obr,2} = \left(\frac{(R_b)_k}{(R_b)_X} \right)_{R_{sh}=93}. \quad (26)$$

При разомкнутом контакте K_d ток через выходное сопротивление ИДН не превышает

$$I_d = \frac{U_f}{R} = \frac{5V}{20 \cdot 10^3 \Omega} = 0,25 \cdot 10^{-3} A \text{ и}$$

падение напряжения на нем мало. Если контакт K_d замкнут, тогда $I_d = \frac{U_{sh}}{R_{sh}} = \frac{5V}{93,2 \Omega} = 50 \cdot 10^{-3} A$ и падение напряжения на выходном сопротивлении ИДН возрастет в 200 раз и, следовательно, истинный коэффициент деления ИДН будет отличаться от номинального более заметно, чем в случае, когда $R_{sh} = \infty$. Таким образом, для одного и того же номинального коэффициента деления N_d ИДН, установленного с помощью ручек галетных переключателей, должны получиться разные значения $(N_d)_{obr,1}$ и $(N_d)_{obr,2}$, причем $(N_d)_{obr,1} > (N_d)_{obr,2}$. Отношение образцовых коэффициентов деления $(N_d)_{obr,2} / (N_d)_{obr,1} = K$ связано со значениями сопротивлений R_{sh} , активной R_d и реактивной X_d - составляющими выходного импеданса следующим образом

$$K = Re \frac{R_{sh}}{r_d + R_{sh}} = \frac{R_{sh} (R_d + R_{sh})}{(R_d + R_{sh})^2 + X_d^2}. \quad (27)$$

Если реактивная составляющая выходного импеданса имеет индуктивный характер (см. рис. 3), то

$$X_d = \omega L_d = \left[\frac{R_{sh} (R_{sh} + R_d) - K (R_{sh} + R_d)^2}{K} \right]^{\frac{1}{2}} . \quad (28)$$

Если реактивная составляющая X_d имеет емкостной характер, то

$$X_d = \frac{1}{\omega C_d} = \left[\frac{(R_{sh} \cdot R_d)^2 \cdot (1 - K)}{K (R_{sh} + R_d)^2 - (R_{sh}^2 + R_d \cdot R_{sh})} \right]^{\frac{1}{2}} . \quad (29)$$

В выражениях (28), (29) L_d , C_d являются эквивалентными индуктивностью и емкостью выходного импеданса ИДН, $\omega = 2\pi f_r$.

Погрешность образцовых коэффициентов деления $(N_d)_{обр,1}$ и $(N_d)_{обр,2}$ определяется погрешностью магазина сопротивлений типа R327 (погрешность $\delta_{mag} = \pm 0,01\%$), используемого для имитации сопротивления витка воды R_b . Поскольку $(N_d)_{обр}$ вычисляется по отношению двух разных сопротивлений $(R_b)_k$ и $(R_b)_x$, погрешность определения $(N_d)_{обр}$ в предположении, что погрешность магазина является случайной величиной, можно оценить по формуле

$$(\Delta N_d)_{обр} = (\Delta N_d)_{обр,1} = (\Delta N_d)_{обр,2} = \pm \sqrt{2} \cdot \delta_{mag} \cdot (N_d)_{обр} = \pm 14 \cdot 10^{-5} \cdot (N_d)_{обр} . \quad (30)$$

Погрешность отношения K будет равна

$$\Delta K = \sqrt{2} \cdot (\Delta N_d)_{обр} \cdot K = \pm 20 \cdot 10^{-5} \cdot K .$$

В результате анализа выражений (27)-(28) по экспериментальным данным было установлено, что реактивная составляющая выходного импеданса с возрастанием N_d от 0,1 до 0,9 носит индуктивный характер и изменяется от 4,2 до 0,5 Ом, а при изменении N_d от 0,9 до 1,19999 - носит емкостной характер и составляет $(0,3 \div 0,6)$ Ом.

В результате расчетов по формулам (16), (18) были вычислены погрешности измерения ОЭП, вызванные изменчивостью активной и реактивной составляющих выходного импеданса ИДН, а также из-за индуктивностей L_2 , L_3 витка воды в зави-

симости от номинального коэффициента деления N_d ИДН.

На рис. 3 показан характер изменчивости погрешностей $(\Delta R_{x,t})_{Rd}$, $(\Delta R_{x,t})_{X_d}$, $((\Delta R_{x,t})_{L2} + L_3)$. При этом за значения индуктивностей $L_2 = L_3 = 6,5 \times 10^{-6}$ Гн приняты значения полных индуктивностей "витка", равные реальным значениям для солемера ГМ-65.

Подгрузка секций первой декады младшими декадами

Как показано на рис. 2, напряжение питания второй декады (обмотка W_2) снимается с одной секции обмотки W_1 первой декады, на которой установлен галетный переключатель

n_{s1} . Это приводит к тому, что напряжение на этой секции будет меньше напряжения на аналогичных, но не подгруженных секциях, и, следовательно, устанавливаемый с помощью переключателей ИДН коэффициент деления, приходящийся на вторую и последующие декады, будет меньше номинального значения на величину

$$\Delta \dot{U}_{c1} = U_{c1H} \cdot \left[1 - \frac{Z_{c1} \cdot Z_{w2}}{(Z_{c1} + Z_{w2}) \cdot Z_{c1}} \right], \quad (31)$$

где U_{c1H} - номинальное напряжение на одной секции первой декады; Z_{c1} - выходное сопротивление одной секции первой декады; Z_{w2} - выходное сопротивление всей обмотки W_2 второй декады.

Поскольку число витков в одной секции первой декады $W_{c1} = 3$, а $W_2 = 100$, то для двух одинаковых тороидальных сердечников Тр-1 и Тр-2 как по геометрии, так и по магнитной проницаемости, будем иметь $Z_{c1} = \gamma \cdot W_{c1}^2$, $Z_{w2} = \gamma \cdot W_2^2$ (где γ - константа) и, следовательно,

$$\frac{\Delta \dot{U}_{c1}}{\dot{U}_{c1H}} = 1 - \frac{W_{c1}^2 \cdot W_2^2}{(W_{c1}^2 + W_2^2) \cdot W_{c1}^2} = 9 \cdot 10^{-4} \quad (32)$$

Учитывая, что $\frac{\Delta \dot{U}_{c1H}}{(\dot{U}_{ИДН})_{N_d=1}} = 0,1$, получим $\frac{\Delta \dot{U}_{c1}}{(\dot{U}_{ИДН})_{N_d=1}} = 9 \cdot 10^{-5}$.

Это говорит о том, что максимальная погрешность измерения относительной электропроводимости, вызванная погрузкой секции первой декады обмоткой второй декады, может достигать $(\Delta R_{x,t})_{W_{c1}} = 9 \cdot 10^{-5}$

Эта погрешность одинаковая для солемеров ГМ-65 и Autolab, так как число витков в секциях индуктивных делителей у них одинаковы. Зависимость этой погрешности от коэффициента деления N_d носит пилообразный периодический характер, линейно возрастаю от начала до конца каждой десятой доли и падая до нуля при переходе от 0,09999 к 0,1, от 0,19999 к 0,20000, от 0,29999 до 0,30000 и т.д. Периодичность и скачкообразность этой погрешности также, как в случае изменчивости выходного импеданса ИДН, приводит к появлению дифференциальной нелинейности статической характеристики преобразования солемера. При калибровке солемера по одной нормальной воде с относительной электропроводимостью $K_{15} = 1 \pm \Delta K_{15}$, где ΔK_{15} – указанное на этикетке стандарта отклонение от $K_{15} = 1,0$, возможна ошибка в калибровке из-за наличия погрешности $(\Delta R_{x,t})_{W_{c1}}$, которая может привести к систематической погрешности измерения $(R_{x,t})$, равной $(R_{x,t}) \cdot (\Delta R_{x,t})_{W_{c1}} = -11 \cdot 10^{-5}$, что в эквиваленте соленоиды может составить $(\Delta S)_{W_{c1}} \approx 11 \cdot 10^{-5}$. $S_x = -(0 \div 0,0044)$ в зависимости от измеряемой соленоиды S_x . На рис. 3 показан характер изменчивости погрешности $(\Delta R_{x,t})_{W_{c1}}$ в зависимости от N_d .

Температурная нестабильность элементов электрической схемы

В связи с относительной малостью активной и реактивной составляющих сопротивлений индуктивного делителя, а также обмотки компенсации W_4 (см. рис. 1) в сравнении с сопротивлениями Z_1 , Z_2 и R_7 , будем учитывать погрешность температурной нестабильности

бильности, возникающую из-за изменчивости активных сопротивлений R_1 и R_2 , полагая при этом

$$X_1 = X_2 = X_7 = 0; \quad (X_B)_K = (X_B)_X = 0; \\ \omega(L_2 + L_3) = 0; \quad X_A = 0; \quad R_A = 0; \quad r_4 = 0.$$

$$R'_X = R_X \frac{[(R_1)_X \cdot (R_2)_X + (R_1)_X \cdot (R_7)_X + (R_2)_X \cdot (R_7)_X] (R_2)_K}{[(R_1)_K \cdot (R_2)_K + (R_1)_K \cdot (R_7)_K + (R_2)_K \cdot (R_7)_K] (R_2)_X}. \quad (33)$$

При этом

$$(R_1)_X = (R_1)_K \cdot (1 + \alpha_1 \cdot \Delta t), \quad (34)$$

$$(R_2)_X = (R_2)_K \cdot (1 + \alpha_2 \cdot \Delta t), \quad (35)$$

где α_1, α_2 - температурные коэффициенты сопротивлений R_1, R_2 ;

$\Delta t = t_x - t_k$ - изменение температуры сопротивлений R_1, R_2 от момента калибровки до момента измерения проводимости пробы X .

В этих расчетах изменение сопротивления термистора R_7 не следует

Тогда из выражений (15) получим показанную прибором относительную электрическую проводимость

учитывать, так как его изменение компенсирует температурное изменение электрической проводимости нормальной воды, оставляя R_x примерно постоянным. В связи с этим принимаем $(R_7)_X = (R_7)_K$.

Погрешность измерения относительной электрической проводимости при уходе температуры сопротивлений R_1 и R_2 на величину Δt можно вычислить из следующего выражения

$$(\Delta R_X)_{R1,R2} = R'_X - R_X = \left(\frac{a \cdot f_1(t) \cdot f_2(t) + b \cdot f_1(t) + c \cdot f_2(t)}{(a+b+c) \cdot f_2(t)} - 1 \right) \cdot R_X, \quad (36)$$

где $a = (R_1)_K \cdot (R_2)_K$; $b = (R_1)_K \cdot (R_7)_K$; $c = (R_2)_K \cdot (R_7)_K$; $f_1(t) = 1 + \alpha_1 \cdot \Delta t$; $f_2(t) = 1 + \alpha_2 \cdot \Delta t$.

Если температура изменяется на $\Delta t = \pm 1^\circ\text{C}$, как это допускается инструкцией по эксплуатации [4], то для сопротивлений типа БЛП группы А $R_1 = 3,5 \text{ кОм}$, $R_2 = 0,075 \text{ кОм}$, $R_3 = 0,1 \text{ кОм}$ (именно они стоят в солемере ГМ-65) $\alpha_1 = \alpha_2 = 1,5 \cdot 10^{-4} \text{ }^\circ\text{C}$ [5] получим $(\Delta R_X)_{R1,R2} = \pm R_X \cdot 8,2 \cdot 10^{-5}$.

При этом положительному значению

Δt соответствует положительное ΔR_X .

Как правило, эта погрешность выявляется при повторной калибровке (после обработки проб) и в инструкции [4] предлагается ее учитывать внесением поправок. Величина поправок δR_x определяется как линейная функция от интервала времени t_x с момента первой калибровки до момента обработки данной пробы

$$\delta R_{x,t} = \frac{(\Delta R_{k,t})_{R1,R2}}{\tau_c} \cdot (\tau)_x , \quad (37)$$

где τ_c - интервал времени между двумя соседними калибровками; $(\Delta R_{k,t})_{R1,R2}$ - уход показаний солемера между двумя соседними калибровками.

Однако, учитывая тот факт, что сопротивления R_1 и R_2 расположены внутри корпуса прибора, при изменении окружающей температуры (например, постепенном ее повышении), температура сопротивлений R_1 и R_2 меняется нелинейно, описывая кривую переходного процесса инерционного звена с задержкой. Задержка определяется плохой "продуваемостью" корпуса прибора и линейно интерполированная поправка не компенсирует погрешности (особенно в первой половине интервала обработки серии) и, следовательно, можно ожидать, что

$$(\Delta R_{x,t})_{R1,R2} \approx \frac{1}{2} (\pm R_x \cdot 8,2 \cdot 10^{-5}) \approx \pm 4 \cdot 10^{-5} \cdot R_x$$

Если температура воздуха изменяется немонотонно, то погрешность $(\Delta R_{x,t})_{R1,R2}$ не может быть скомпенсирована и может достигать значений $(\Delta R_{x,t})_{R1,R2} = \pm 8,2 \cdot 10^{-5} \cdot R_x$ при изменении температуры на $\Delta t = \pm 1^\circ\text{C}$.

Изменчивость геометрической постоянной измерительной ячейки

Погрешность измерения относительной электрической проводимости

зависит от нестабильности геометрической постоянной измерительной ячейки, а именно от изменчивости

отношения $\frac{(I_d)_x}{(I_d)_k}$. В литературе

нет сообщений о концентрационной зависимости геометрической постоянной бесконтактных индуктивных датчиков, поэтому изменчивость I_d в основном связывают с изменением температуры $t_x - t_k = \Delta t$ рабочей камеры за период между калибровкой и измерением проводимости исследуемой пробы. В этом смысле погрешность $(\Delta R_x)_{I_d}$ аналогична погрешности $(\Delta R_{x,t})_{R1,R2}$. Однако она зависит не только от температуры окружающего воздуха, но и от разницы в температуре проб.

Изменчивость отношения $\frac{(I_d)_x}{(I_d)_k}$

определяется температурными коэффициентами линейного расширения α_1 корпуса ячейки (оргстекло, $\alpha_1 = (85 \div 135) \cdot 10^{-6}$ [6] и α_2 корпуса собственно датчика электропроводимости (эпоксидный компаунд без наполнителя, $\alpha_2 = (50 \div 80) \cdot 10^{-6}$ [6]. При этом максимальная изменчивость от-

ношения $\frac{(I_d)_x}{(I_d)_k}$ при допустимой

нестабильности температуры корпуса ячейки и датчика $\Delta t = \pm 1^\circ\text{C}$, как это указывается в паспорте на прибор [4],

достигает $\Delta \frac{(I_d)_x}{(I_d)_k} = \pm 12 \cdot 10^{-5}$. В свя-

зи с этим погрешность измерения ОЭП из-за изменчивости геометрической постоянной ячейки может достигать

$$(\Delta R_{x,i})_{i,x} = \pm 12 \cdot 10^{-5} \cdot R_x . \quad (38)$$

Изменение геометрической постоянной измерительной ячейки в некоторых случаях, например, при монотонном изменении Δt может быть обнаружено и частично исправлено путем внесения так называемой поправки на "самопрогрев" [4], определяемой по разнице отсчетов коэффициента деления ИДН в момент первичной и вторичной калибровки $\Delta N_{\text{дк}}$. При этом поправки вычисляются по формуле

$$\Delta'(R_{x,i}) = \Delta(N_{A,k}) \cdot \frac{\tau_i}{\tau_c} \cdot R_x , \quad (39)$$

где τ_c - время обработки всей серии проб (время между соседними калибровками); τ_i - интервал времени между первой калибровкой и моментом окончания измерения проводимости i -й пробы.

В действительности температура измерительной ячейки (корпуса и датчика) в процессе работы солемера может меняться немонотонно, иногда возвращаясь в момент вторичной калибровки к температуре первичной

$$\begin{aligned} [TK(I_B)_{H.B.}]_t &= \left(\frac{d(I_B)_{H.B.}}{dt} \right)_t \cdot \frac{1}{[(I_B)_{H.B.}]_t} = \frac{d(r_t)}{dt} \cdot \frac{1}{r_t} = \\ &= \frac{1}{r_t} \left(2,00564 \cdot 10^{-2} + 2,208618 \cdot 10^{-4} \cdot t - 2,09067 \cdot 10^{-6} \cdot t^2 + 4,0124 \cdot 10^{-9} \cdot t^3 \right) , \quad (40) \end{aligned}$$

где

$r_t = 0,6766097 + 2,00564 \cdot 10^{-2} \cdot t + 1,104259 \cdot 10^{-4} \cdot t^2 - 6,9698 \cdot 10^{-7} \cdot t^3 + 1,0031 \cdot 10^{-9} \cdot t^4$
- температурная зависимость электропроводимости нормальной воды [7].

калибровки. Тогда $\Delta t = 0$, $\Delta(N_{\text{дк}}) = 0$ и никакой поправки в измерения вноситься не будет, а из-за текущих $(\Delta t)_i = \pm 1^\circ\text{C}$ в период между калибровками останутся неисключенными погрешности $(\Delta R_{x,i})_{i,\text{д}} = \pm 12 \cdot 10^{-5} \cdot R_x$.

Отличие температурных коэффициентов тока компенсации ТК I_k от температурного коэффициента тока "вилка" нормальной воды (ТК I_v)

Как уже отмечалось выше, изменение электрической проводимости нормальной воды от температуры в лабораторных нетермостатированных солемерах осуществляется с помощью температурозависимых (термокомпенсирующих) элементов в цепи тока компенсации. В качестве таких элементов в солемерах ГМ-65 и Autolab используются термисторы.

Если температурные коэффициенты электрической проводимости нормальной воды и тока компенсации неодинаковы, то возникает погрешность в измерении относительной электрической проводимости при отклонении температуры исследуемых проб воды от температуры нормальной воды при калибровке.

В табл. 1 представлены значения температурного коэффициента тока в вилке с нормальной водой

Таблица 1 - Температурные коэффициенты тока "витка" с нормальной водой $(TKI_B)_{n.b.}$ и тока компенсации TKI_K

Параметр	Температура, °C						
	20	21	25	26	30	31	
$\alpha_3 = -0,04$	$TK(I_B)_{n.b.}$	0,0211996	0,0208476	0,0196783	0,0193951	0,0183194	0,0180647
	TKI_K	0,0211996	0,0207922	0,0196783	0,0192701	0,0183194	0,0179146
$\alpha_3 = -0,038$	ΔTKI	0	$-5,5 \cdot 10^{-5}$	0	$-11,8 \cdot 10^{-5}$	0	$-15 \cdot 10^{-5}$
	TKI_K	0,0211996	0,0208352	0,0196783	0,0193100	0,0183194	0,0179518
$\alpha_3 = -0,036$	ΔTKI	0	$-1,2 \cdot 10^{-5}$	0	$-8,5 \cdot 10^{-5}$	0	$-11,2 \cdot 10^{-5}$
	TKI_K	0,0211996	0,0208783	0,0196783	0,0193506	0,0183194	0,0179890
$\alpha_3 = -0,035$	ΔTKI	0	$+3,2 \cdot 10^{-5}$	0	$-4,4 \cdot 10^{-5}$	0	$-7,5 \cdot 10^{-5}$
	TKI_K	0,0211996	0,020899	0,0196783	0,0193720	0,0183194	0,0180110
	ΔTKI	0	$+5,2 \cdot 10^{-5}$	0	$-2,3 \cdot 10^{-5}$	0	$-5,3 \cdot 10^{-5}$

Полагая в выражении (5) $X_1 = X_2 = X_3 = 0$; $X_d = \omega L_2 = \omega L_4 = \omega L_5 = 0$;
 $r_g = 0$; $r_s = 0$ найдем

$$(I_K)_t = U \cdot K_g \cdot \frac{R_2}{R_1} \cdot \frac{1}{R_2 + (R_7)_t + \frac{R_2}{R_1} \cdot (R_7)_{t_K} + \left[(R_7)_{t_K} + \frac{R_2}{R_1} \cdot (R_7)_{t_K} \right] \cdot \alpha_7 (t - t_K)}. \quad (41)$$

Тогда

$$(TKI_K)_t = \left(\frac{dI_K}{dt} \right)_t \cdot \frac{1}{(I_K)_t} = - \frac{\left[(R_7)_t + \frac{R_2}{R_1} \cdot (R_7)_t \right] \cdot \alpha_7}{R_2 + (R_7)_t + \frac{R_2}{R_1} \cdot (R_7)_t}, \quad (42)$$

где для небольших отклонений температуры $t - t_K$ принято

$$(R_7)_t = (R_7)_{t_K} \cdot [1 + \alpha_7 \cdot (t - t_K)].$$

В табл. 1 приведены вычисленные значения $[TK(I_B)_{n.b.}]$ и $(TKI_K)_t$ для солемеров типа ГМ-65 при температуре 20; 21; 25; 26; 30; 31 °C.

Расчеты показывают, что расхождения температурных коэффициентов витка воды и компенсации можно свести до $\Delta(TKI) = \pm 5,5 \cdot 10^{-5}$ при $t - t_K = 1^\circ C$ путем указанного в

инструкции по эксплуатации солемера ГМ-65 способа. При этом необходимо температурный коэффициент термистора приблизить, например, к значению $\alpha_3 \approx 0,035$ путем добавочных сопротивлений, соединенных последовательно с R_7 , или параллельно с ним.

Погрешность измерения относительной электрической проводимости исследуемой пробы, вызванная $\Delta(TKI)$, может быть вычислена следующим образом

$$(\Delta R_{x,t})_{\Delta(TK)} = \Delta(TK) \cdot (t_x - t_k) \cdot R_x . \quad (43)$$

В заключении настоящего раздела отметим, что при правильной настройке схемы термокомпенсации и изменении температуры проб и нормальной воды не более, чем на $\pm 1^{\circ}\text{C}$, погрешность лабораторных солемеров типа ГМ-65 и Autolab из-за отличия температурного коэффициента тока компенсации и тока в витках нормальной воды не более, чем на $\pm 5 \cdot 10^{-5} (\text{ }^{\circ}\text{C})^{-1}$ линейно связана с величиной ОЭП и не превышает $\pm 6 \cdot 10^{-5}$, что в эквиваленте солености составит $\Delta S = \pm 0,0024$.

Неточность измерения температуры пробы воды в измерительной ячейке

В связи с зависимостью относительной электрической проводимости $R_{x,t}$ от температуры, при которой она измеряется, погрешность измерения температуры пробы Δt приведет к погрешности пересчета $R_{x,t}$ в ОЭП $R_{x,15}$ при температуре 15°C . Это в конечном счете приведет к погрешности определения солености.

Величина такой погрешности может быть оценена по формуле

$$(\Delta R_{x,15})_t = \frac{\partial(R_{x,t})}{\partial t} \cdot \Delta t_x . \quad (44)$$

Значения частной производной $\frac{\partial(R_{x,t})}{\partial t}$ для конкретных значений $(R_{t,x})$ и температуры могут быть вычислены по таблице II из Международных океанографических таблиц [8].

Поскольку указанная в паспорте на солемер ГМ-65 [4] погрешность измерения температуры пробы лежит

в пределах $\Delta t_x = \pm 0,5^{\circ}\text{C}$, то погрешность приведения $R_{x,t}$ к $R_{x,15}$ может составить $(\Delta R_{x,15})_t = \pm(3 \div 9,5) \cdot 10^{-5}$, что соответствует $\Delta S = \pm(0,001 \div 0,004)$.

Суммарная погрешность измерений относительной электрической проводимости и солености с помощью солемеров ГМ-65 и Autolab при калибровке по одной точке

Суммарная погрешность определяется значениями составляющих погрешностей, часть из которых относится к основной инструментальной погрешности (погрешности, вызванной активной и реактивной составляющими выходного сопротивления ИДН, индуктивностями витка воды, подгрузкой секций первой декады), а другая часть - к дополнительным температурным погрешностям (изменчивость сопротивлений резисторов, температурного коэффициента тока в цепи компенсации, геометрической постоянной измерительной ячейки и погрешность измерения температуры пробы воды в измерительной ячейке).

На рисунке 3 показан количественный и качественный характер изменчивости отдельных составляющих систематической погрешности в зависимости от коэффициента деления N_d ИДН, что эквивалентно измеряемой относительной электропроводимости $R_{x,t}$. На рисунке 5 показан характер изменчивости суммарной систематической составляющей основной погрешности $(\Delta R_{x,t})_{\Sigma c}$ и показаны возможные границы общей (основной и дополнительной) погрешности измерения относительной электропроводимости $(\Delta R_{x,t})_{\text{общ}}$ и со-

ответствующие погрешности солености $(\Delta S)_{\Sigma c}$ и $(\Delta S)_{\text{общ.}}$

При этом суммарная систематическая составляющая погрешности и

$$(\Delta R_{x,t})_{\Sigma c} = (\Delta R_{x,t})_{R_d} + (\Delta R_{x,t})_{x_d} + (\Delta R_{x,t})_{L_2, L_3} + (\Delta R_{x,t})_{W_{Cl}}, \quad (45)$$

$$(\Delta R_{x,t})_{\text{общ.}} = (\Delta R_{x,t})_{\Sigma c} + (\Delta R_{x,t})_{R_1, R_2} + (\Delta R_{x,t})_{TKI} + (\Delta R_{x,t})_{I_d} + (\Delta R_{x,t})_{\Delta I}. \quad (46)$$

Как видно из рисунка 6, максимальная систематическая составляющая основной погрешности солемера ГМ-65 наблюдается в области $R_{x,t} \approx 0,3 \div 0,6$, $R_{x,t} \approx 1,1 \div 1,2$ и достигает по ОЭП (солености) $+34 \cdot 10^{-5}$ ($+0,013$ епс), $-14 \cdot 10^{-5}$ ($-0,005$ епс) соответственно. А возможные значения общей погрешности достигают $+50 \cdot 10^{-5}$ ($+0,02$ епс) в области значений $R_{x,t} \approx 0,3 \div 0,7$ и $\pm 45 \cdot 10^{-5}$ ($\pm 0,018$ епс) в области $R_{x,t} = 0,8 \div 1,2$.

Наибольший вклад в систематическую составляющую погрешности измерений, как видно из рисунка 3, вносят погрешности из-за подгрузки первой декады ИДН и из-за индуктивностей витка воды $(\Delta R_{x,t})_{L_2, L_3}$. В области значений $R_{x,t} = 0,1 \div 0,5$ существенной становится погрешность из-за реактивной составляющей выходного сопротивления ИДН. Дифференциальная нелинейность (скакки) статической характеристики преобразования главным образом определяется периодической погрешностью из-за подгрузки первой декады ИДН $(\Delta R_{x,t})_{W_{Cl}}$, достигающей $+9 \cdot 10^{-5}$, что в эквиваленте солености составляет $(0,003 \div 0,0036)$ епс. Изменчивость активной составляющей выходного сопротивления ИДН также является причиной появления диффе-

ренциальной нелинейности в СХП, но в $(2 \div 10)$ раз меньшей по сравнению с погрешностью $(\Delta R_{x,t})_{W_{Cl}}$.

Главной причиной дополнительных погрешностей является изменчивость температуры окружающего воздуха и отличие температуры проб воды от средней температуры нормальной воды, по которой производится первичная и вторичная калибровка солемера. Наибольшее влияние при этом на точность измерений оказывает изменчивость геометрической постоянной измерительной ячейки, приводящей к максимальной погрешности $(\Delta R_{x,t})_{I_d} \approx \pm 14 \cdot 10^{-5}$ ($\pm 0,006$ епс) при допустимой изменчивости температуры ячейки между калибровками $\pm 1^{\circ}\text{C}$ [4].

Погрешность измерения температуры пробы не оказывает непосредственного влияния на результат измерения ОЭП $R_{x,t}$, но она оказывает косвенное влияние на точность вычисления промежуточного значения ОЭП при $+15^{\circ}\text{C}$ $R_{x,15}$, по которой затем вычисляется соленость. Эта погрешность может лежать в пределах $\pm(0,001 \div 0,004)$ епс в эквиваленте солености.

Общая инструментальная погрешность солемеров типа ГМ-65 в эквиваленте солености может лежать в пределах от $0 \div 0,020$ в области $R_x =$

$0,1 \div 0,7$ и в пределах $\pm 0,02$ в области $R_x = 0,7 \div 1,2$.

Поскольку принципиальные электрические схемы солемеров типа Autolab и ГМ-65 практически одинаковы вплоть до номинальных значений параметров отдельных элементов, систематическая составляющая основной погрешности измерения солемера Autolab также как и у ГМ-65 может достигать значений от $+0,014$ до $-0,005$ епс в эквиваленте солености в пределах изменения ОЭП от 0,2 до 1,2.

Дополнительная температурная погрешность, вызванная изменением геометрической постоянной измерительной ячейки в солемере Autolab может достигать таких же значений, как в ГМ-65, поскольку материалы датчика и корпуса ячейки у них одинаковы. В связи с этим общая погрешность измерений солености солемером Autolab в реальных условиях эксплуатации может лежать в пределах $\pm (0,005 \div 0,016)$.

Выводы и предложения

В результате проведенных исследований установлены основные причины инструментальных погрешностей и оценены возможные значения их составляющих, а также возможные значения общей погрешности измерений солености с помощью солемеров типа ГМ-65. Оказалось, что расчетные значения общей погрешности для этих приборов совпадают с паспортными данными завода-изготовителя в области значений солености $28 \div 42 \pm (0,02 \div 0,03)$, а в области солености $4 \div 28$ оказываются меньше паспорт-

ных значений. Возможно это произошло из-за того, что не учитывалось влияние электронного "смещения нуля" прибора в связи с невозможностью его аналитической оценки из-за отсутствия каких-либо объективных данных. Компенсация влияния "смещения нуля" должна производиться перед и после каждой серии измерений. Если этого не производить, или производить недостаточно тщательно, то, естественно, это скажется на качестве полученных результатов измерений в худшую сторону.

Учитывая тот факт, что солемеры Autolab и ГМ-65 идентичны по принципиальной электрической схеме, можно сделать вывод, что фактические инструментальные погрешности солемеров типа Autolab могут превышать паспортные значения ($\pm 0,003$) и достигать значений в пределах $\pm (0,016)$ в эквиваленте солености. Этот факт следует принимать во внимание при анализе долговременной изменчивости солености водных масс по архивным данным, полученным в прошлом с помощью солемеров типа Autolab.

В результате проведенного анализа установлено, что улучшить характеристики используемых в настоящее время лабораторных солемеров типа ГМ-65 и Autolab достаточно трудно. Более того, в выпущенной позже модели ГМ-65М [9] значительно (почти в 4 раза) увеличена возможная дифференциальная погрешность из-за подгрузки секции первой декады (в связи с увеличением числа витков секции первой декады с 3 до 6). Дифференциальная нелинейность статической характеристики

преобразования, вызванная изменчивостью активной и реактивной составляющей выходного сопротивления ИДН, может быть практически исключена путем установки на выходе ИДН электронного малошумящего повторителя напряжения, тем самым резко уменьшив нагрузку ИДН.

Для уменьшения погрешности из-за дифференциальной нелинейности, вызванной подгрузкой секций первой декады можно рекомендовать таблицы поправок в пределах каждой десятой доли первой декады.

Уменьшение среднего значения систематической составляющей погрешности, вызванной индуктивностями витка воды и "смещением нуля", можно осуществить калибровкой приборов по нескольким стандартам нормальной воды, введенным в обход в связи с принятием шкалы практической солености ШПС-1978. Это может уменьшить погрешность измерения солености до $(0,005 \pm 0,01)$ епс.

Для уменьшения дополнительных температурных погрешностей радиальной мерой для существующего парка приборов может быть уменьшение колебания температуры воздуха в помещении до $0,2^{\circ}\text{C}$ и обеспечения разницы температуры пробы нормальной воды также до $0,2^{\circ}\text{C}$. Если обеспечить эти условия, то общая инструментальная погрешность обоих типов приборов не превысит $\pm 0,005$ епс.

Л и т е р а т у р а

1. Забурдаев В.И. Результаты лабораторных и натурных сличений индуктивных электросолемеров типа Autolab и ГМ-65. Сборник научных трудов "Системы контроля окружающей среды-2000". МГИ НАНУ, Севастополь., 2000.
2. Brown N.L., Hamon B.V. An inductive saemometer. Deep-Sea Research, 1961, V8, № 1, p. 65-75.
3. Выключатели и переключатели. Справочник. Министерство электронной промышленности СССР. Научно-исследовательский институт. Москва., 1971.
4. Электросолемер ГМ-65. Паспорт л. 82. 840. 004 Пс, 1976, 66 листов.
5. Резисторы: Справочник / В.В.Дубровский, Д.М.Иванов, Н.Я.Пратусевич и др.; Под ред. Н.И.Четверткова и В.М.Терехова.- 2-е изд., перераб. и доп. - М.: Радио и связь, 1991.- 528 с.
6. Краткий справочник конструктора радиоэлектронной аппаратуры. Под ред. В.Г.Варламова. М., "Сов. радио", 1972, с. 124-125.
7. ЮНЕСКО, 1981. Шкала практической солености, 1978 год, и Международное уравнение состояния морской воды, 1980 год. Техн. докум. ЮНЕСКО по морским наукам, 36: 25 стр.
8. International oceanographic tables. Volume I. National Institute of Oceanography of Great Britoin and UNESCO., 1971.
9. Электросолемер ГМ-65 М. Паспорт Л.82. 840. 004 Пс. 1988 г., 41 лист