КОНДУКТИВНЫЕ ИЗМЕРИТЕЛИ УДЕЛЬНОЙ ЭЛЕКТРОПРОВОДНОСТИ ЖИДКИХ СРЕД С ЗАМКНУТЫМ ЭЛЕКТРИЧЕСКИМ ПОЛЕМ

В.А. Гайский, П.В. Гайский

Институт природно-технических систем, РФ, г. Севастополь, ул. Ленина, 28

E-mail: gaysky@inbox.ru

С целью повышения точности измерения удельной электрической проводности жидкостей кондуктивными датчиками предлагаются и описываются новые конструкции датчиков с замкнутым внутри электрическим полем и структурные схемы измерителей на их основе [1, 2]. В устройствах обеспечивается исключение поляризационных эффектов на электродах, градуировка по образцовым растворам «геометрической константы», коррекция её значения при изменении температуры и давления.

Ключевые слова: кондуктивный датчик электропроводности, замкнутое электрическое поле.

Поступила в редакцию: 22.07.2019.

Введение. Для высокоточного измерения удельной электропроводности морской воды в океанографии широко используются кондуктометры с контактными датчиками, число электродов в которых зависит от способов исключения поляризационных эффектов на электродах на результат измерения и формирования замкнутого электрического поля внутри измерительной ячейки [3].

Использование только двух токовых электродов в датчике не устраняет влияние поляризационных эффектов на результат измерения и не обеспечивает достижение высокой точности.

Использование четырех электродов, двух токовых (питающих) и двух потенциальных (измерительных), и режима работы с источником тока позволяет устранить влияние поляризационных эффектов на токовых электродах. Однако для формирования замкнутого электрического поля внутри измерительной ячейки датчики выполняют из трубки с пятью (три токовых и два потенциальных) или семью (три токовых и четыре потенциальных) электродами, формирующими электронную пробку на торцах трубки [4]. Конструкция датчика и измерителя усложняется и существенно ухудшается естественная промываемость датчика, что влияет на репрезентативность и, следовательно, на точность измерения в конкретной точке морской среды.

Описание предложения. Наиболее просто задача замыкания электрического поля внутри измерительной ячейки решается при выполнении датчика в форме стакана так, как это предложено, например, в патенте [5].

Это устройство содержит «диэлектрическую трубку с расположенными в ней дисковым и кольцевым электродами, диэлектрическую прокладку, расположенную вблизи от дискового электрода и образующую вместе с диэлектрической трубкой стакан, регистраторы тока и напряжения и источник питания».

Однако, его недостатками для достижения высокой точности являются: влияние поляризационных эффектов на электродах на результат измерения, плохая естественная промываемость при неподвижном состоянии в неподвижной среде, отсутствие коррекции зависимости геометрических размеров датчика от его температуры и внешнего гидростатического давления.

Целесообразно и возможно исключение этих недостатков.

Рассмотрим суть предложения.

Для измерительной ячейки в форме цилиндра с внутренним диаметром d и длиной h образующей значение удельной электропроводности κ определяется формулой

$$\kappa = \frac{I}{U} \frac{4h}{\pi d^2} = K \frac{I}{U}, \quad (1)$$

где I – ток через ячейку, U – напряжение на её границах,

$$K = \frac{4h}{\pi d^2} \quad (2)$$

– «геометрическая константа» при начальной температуре (нулевой) корпуса датчика и внешнем давлении (нулевом).

При увеличении температуры на θ и давления на P изменяется h и d и, следовательно, K .

Если считать эти изменения независимыми и линейными с известными коэффициентами α и γ , то можем записать

$$h_\theta = h(1 + \alpha\theta) \quad , \quad (3)$$

$$d_\theta^2 = d^2(1 + \alpha\theta)^2 \quad , \quad (4)$$

$$h_P = h(1 - \gamma P) \quad , \quad (5)$$

$$d_P^2 = h^2(1 - \gamma P)^2 \quad . \quad (6)$$

Тогда для значения «геометрической константы» при конкретных температуре и давлении при подстановке выражений (3–6) в выражение (2) получим

$$K_{\theta,P} = \frac{K}{(1 + \alpha\theta)(1 - \gamma P)} \quad . \quad (7)$$

Обычно в океанографии измеритель электропроводности входит в состав СТД-комплексов, которые дают информацию о температуре воды и гидростатическом давлении P в точке измерения, например, при зондировании по глубине. Из-за тепловой инерции корпуса датчика электропроводности (стакана) его температура не обязательно будет равна температуре воды, если последняя изменяется. Поэтому температуру стакана θ целесообразно контролировать встроенным распределенным резисторным датчиком температуры как и предлагается в данном устройстве. Информацию о гидростатическом давлении целесообразно заимствовать извне, из данных СТД-комплекса.

Таким образом, при известных α , γ и измеренных значениях θ , P , I и U определяют текущую «геометрическую константу» $K_{\theta,P}$ по формуле (7) и удельную электрическую проводимость жидкости по формуле

$$\kappa = K_{\theta,P} \frac{I}{U} = K_{\theta,P} G \quad , \quad (8)$$

где G – электропроводность измерительной ячейки.

Структурно-функциональная схема измерителя удельной электропроводности жидких сред представлена на рис. 1. В состав измерителя входят датчик электропроводности (ДЭ)1, представленный в 2-х проекциях, управляемый источник тока (УИТ)2, измеритель напряжения (ИН)3, измеритель сопротивления (ИС)4, источник питания электромагнитов (ИПЭМ)5, микропроцессор (МП)6.

ДЭ1 служит для установления количественных соотношений между током и напряжением в измерительной ячейке в соответствии с законом Ома.

ДЭ1 состоит из твердотельного диэлектрического стакана 1₁, на дне которого в верхнем секторе установлен клинообразный диэлектрический вкладыш 1₂ и первый дисковый токовый электрод 1₃ (с выходом Т₁) в нижнем секторе, второй токовый полукольцевой электрод 1₄ (с выходом Т₂) установлен по кромке горловины стакана в верхнем секторе, по образующей цилиндра на внутренней стенке стакана на расстоянии h друг от друга и не менее d (для образования равномерного электрического поля) от токовых электродов установлены точечные потенциальные электроды 1₅ и 1₆ с выходами П₁ и П₂. В корпус стакана встроен распределенный резисторный датчик температуры 1₇ с выходами С₁ и С₂. К внешней поверхности стакана по вертикальной оси подведены башмаки U-образных магнитопроводов 1₈ и 1₉ с катушками намагничивания 1₁₀ и 1₁₁, имеющими электрические выходы М₁, М₂ и М₃, М₄. U-образные магнитопроводы предназначены для образования совместно с рабочим током I через токо-

Рис. 1. Структурно-функциональная схема измерителя

вые электроды 1₃ и 1₄ магнетогидродинамического движителя (МГД), за счет силы Лоренца обеспечивающего движение воды внутри стакана для принудительного его промывания. Диэлектрическая вставка 1₂, выполнение токовых электродов в виде полудиска (первого) и полукольца (второго) и установка их в разных секторах окружности сечения стакана необходимы для формирования направления линий электрического тока, нужного для МГД-движителя. Выходы токовых электродов Т₁ и Т₂ соединены с выходами управляемого источника тока 2, выходы потенциальных электродов П₁ и П₂ поданы на входы измерителя напряжения 3, выходы С₁ и С₂ распределенного датчика температуры 1₆ поданы на входы измерителя сопротивления 4, выходы обмоток электромагнитов М₁, М₂, М₃ и М₄ соединены с выходами 5 – ИПЭМ. Микропроцессор 6 служит для управления измерениями и первичной обработки данных и соединен по цифровым входам-выходам с 2 – УИТ,

3 – ИН, 4 – ИС и 5 – ИПЭМ и внешним выходом измерителя 7.

Приведенная структурно-функциональная схема и состав измерителя справедливы при работе его на постоянном, переменном и знакопеременном токе. Однако для облегчения борьбы с поляризацией токовых электродов, возможности изготовления электродов не из благородных металлов, исключение влияния емкостных составляющих в комплексном сопротивлении измерительной ячейки, целесообразно использовать такую схему включения 4-х электродной измерительной ячейки на знакопеременном токе с автоматической настройкой на активную составляющую сопротивления, которая предложена в патенте [6, 7].

Для избежания возникновения межэлектродного потенциала все электроды изготавливаются из одного устойчивого к коррозии в морской воде материала (платина, золото, нержавеющая сталь, титан, тантал и др.). Потенциальные то-

чечные электроды 1_4 и 1_5 с возможно меньшим диаметром (типа острия иглы) устанавливаются заподлицо с внутренней поверхностью стакана.

При использовании знакопеременного тока в работе измерителя управляемый генератор тока 2 имеет в своем составе коммутатор полярности на выходе, измеритель напряжения 3 содержит на входе коммутатор полярности, синфазированный с генератором тока, источник питания электромагнитов 5 также имеет синфазированный с источником тока коммутатор на выходе тока намагничивания для сохранения постоянства направления силы Лоренца в магнито-гидродинамическом движителе (МГД), а, следовательно, и направления вынужденного движения жидкости [8, 9].

Во всех случаях измеритель напряжения 3 должен иметь максимально большое входное сопротивление, чтобы не шунтировать измерительную базу между потенциальными электродами. Встроенный в стакан распределенный датчик температуры 1_6 изготавливают из металлов с хорошей термочувствительностью (платины, меди или никеля) и обеспечивают контроль температуры по его сопротивлению, измеряемому с помощью 4 – ИС.

При измерениях непосредственно в среде с подвижного носителя измерителя (зонда или буксира) стакан датчика хорошо промывается потоком обтекания при соответствующей ориентации относительно потока. При позиционных постановках в неподвижной среде промываемость стакана датчика для обеспечения репрезентативности (и точности) измерений осуществляется с использованием МГД-двигателя.

На рис. 1 условно обозначены полюса N , S электромагнитов, показаны ли-

нии рабочего тока и направления векторов потоков $\vec{V}_1$ и $\vec{V}_2$, возникающие за счет силы Лоренца, направление которой определяется по правилу «правой руки».

Подробнее схема формирования промывающего потока в стакане МГД-двигателем показана на рис. 2, где сформированные установкой клинообразного 45° градусного вкладыша на дно стакана и расположением токовых электродов в противоположных секторах окружности сечения стакана электрическое поле с нужными отклонениями направления тока от оси цилиндра представлено на рис. 2а, схема наложения следов магнитных полей с направлением на линии тока показана на рис. 2б, схема формирования потоков жидкости под воздействием силы Лоренца в МГД-двигателе показана на рис. 2в.

Таким образом, реализованный в стакане датчик за счет специально сформированного электрического поля и линий тока между токовыми электродами и добавленных электромагнитов двойной МГД-двигатель порождает продольный вихрь внутри стакана, промывающий измерительную ячейку датчика.

Величина силы Лоренца (и скорость потока V) пропорциональна силе тока и величине магнитной индукции, необходимые значения которых должны быть обеспечены.

Устройство работает следующим образом. В среде измерения стакан датчика заполняется обновляемой жидкостью. Через токовые электроды по входам T_1 и T_2 в измерительную ячейку поступает контролируемый ток I , а на выходах Π_1 и Π_2 потенциальных электродов возникает напряжение U .

Рис. 2. Схема формирования вымывающей ячейки потока магнито-гидродинамическим движителем

При измерениях на разнополярном токе вторичным измерительным преобразователем, который образован источником тока 2 и измерителем напряжения 3 под управлением микропроцессоров, реализуется выделение синфазных составляющих тока I и напряжения U , по которым определяется активная составляющая электропроводности G измерительной ячейки между потенциальными электродами по формуле

$$G = \frac{I}{U} . \quad (9)$$

Далее для определения удельной электропроводности жидкости необходимы градуировочные значения K и коэффициенты α и γ для «геометрической константы» $K_{\theta,P}$, которые входят в выражение (8).

При заданной $\mathfrak{x}_0$ образцового раствора, известных θ_0 и P_0 , измеренных I_0 и U_0 из выражения (8) получим

$$\mathfrak{x}_0 = \frac{K G_0}{(1 + \alpha\theta_0)(1 - \gamma P_0)} , \quad (10)$$

где $G_0 = \frac{I_0}{U_0}$, K – «геометрическая константа» при начальной (нулевой) температуре и начальном (нулевом) давлении, зависящая только от параметров h и d измерительной ячейки.

Задачей градуировки является определение неизвестных K , α и γ .

Для упрощения процедуры не требуется специально стабилизировать температуру и давление, которые можно измерять при взятии отсчетов по четырем

образцовым пробам жидкости $\mathfrak{x}_i (\overline{i = 0, 3})$, для которых в дополнение к выражению (10) справедливы выражения

$$\begin{aligned} \mathfrak{x}_1 &= \frac{K G_1}{(1 + \alpha\theta_1)(1 - \gamma P_1)} , \\ \mathfrak{x}_2 &= \frac{K G_2}{(1 + \alpha\theta_2)(1 - \gamma P_2)} , \\ \mathfrak{x}_3 &= \frac{K G_3}{(1 + \alpha\theta_3)(1 - \gamma P_3)} . \end{aligned} \quad (11)$$

Попарно поделим выражение (10) на выражения (11) и получим

$$\begin{aligned} \frac{\mathfrak{x}_0}{\mathfrak{x}_1} &= \frac{G_0(1 + \alpha\theta_1)(1 - \gamma P_1)}{G_1(1 + \alpha\theta_0)(1 - \gamma P_0)} , \\ \frac{\mathfrak{x}_0}{\mathfrak{x}_2} &= \frac{G_0(1 + \alpha\theta_2)(1 - \gamma P_2)}{G_2(1 + \alpha\theta_0)(1 - \gamma P_0)} , \\ \frac{\mathfrak{x}_0}{\mathfrak{x}_3} &= \frac{G_0(1 + \alpha\theta_3)(1 - \gamma P_3)}{G_3(1 + \alpha\theta_0)(1 - \gamma P_0)} . \end{aligned} \quad (12)$$

$$\text{Введем обозначение } c_i = \frac{\mathfrak{x}_0 G_i}{\mathfrak{x}_i G_0} \quad (13)$$

Запишем

$$c_i = \frac{(1 + \alpha\theta_i)(1 - \gamma P_i)}{(1 + \alpha\theta_0)(1 - \gamma P_0)} . \quad (14)$$

После преобразований получим систему линейных алгебраических уравнений вида

$$\alpha(\theta_0 c_i + \theta_i) + \gamma(P_i - c_i P_0) + \alpha\gamma(P_i \theta_i - c_i P_0 \theta_0) = 1 - c_i, \quad \overline{i = 1, 3} \quad (15)$$

с неизвестными α , γ и $\alpha\gamma$.

При решении системы (15) по правилу Крамера получим определитель системы

$$\begin{aligned} \Delta = & (\theta_0 c_i - \theta_1)(P_2 - c_2 P_0)(P_3 \theta_3 - c_3 P_0 \theta_0) + (P_1 - c_1 P_0)(P_2 \theta_2 - c_2 P_0 \theta_0)(\theta_0 c_3 - \theta_3) + \\ & + (P_1 \theta_1 - c_1 P_0 \theta_0)(\theta_0 c_2 - \theta_2)(P_3 - c_3 P_0) - (P_1 \theta_1 - c_1 P_0 \theta_0)(P_2 - c_2 P_0)(\theta_0 c_3 - \theta_3) - \dots \\ & - (\theta_0 c_i - \theta_1)(P_2 \theta_2 - c_2 P_0 \theta_0)(P_3 - c_3 P_0) - (P_1 - c_1 P_0)(\theta_0 c_2 - \theta_2)(P_3 \theta_3 - c_3 P_0 \theta_0) . \end{aligned} \quad (16)$$

Для представляющих интерес неизвестных получим

$$\begin{aligned} \alpha = \frac{1}{\Delta} [& (1 - c_i)(P_2 - c_2 P_0)(P_3 \theta_3 - c_3 P_0 \theta_0) + (P_1 - c_1 P_0)(P_2 \theta_2 - c_2 P_0 \theta_0)(1 - c_3) + \\ & + (P_1 \theta_1 - c_1 P_0 \theta_0)(1 - c_2)(P_3 - c_3 P_0) - (P_1 \theta_1 - c_1 P_0 \theta_0)(P_2 - c_2 P_0)(1 - c_3) - \\ & - (1 - c_1)(P_2 \theta_2 - c_2 P_0 \theta_0)(P_3 - c_3 P_0) - (P_1 - c_1 P_0)(1 - c_2)(P_3 \theta_3 - c_3 P_0 \theta_0)] \end{aligned} \quad (17)$$

$$\begin{aligned} \gamma = \frac{1}{\Delta} [& (\theta_0 c_1 - \theta_1)(1 - c_2)(P_3 - c_3 P_0) + (1 - c_1)(P_2 \theta_2 - c_2 P_0 \theta_0)(\theta_2 P_3 - \theta_3) + \\ & + (P_1 \theta_1 - c_1 P_0 \theta_0)(\theta_0 c_2 - \theta_2)(1 - c_3) - (P_1 \theta_1 - c_1 P_0 \theta_0)(1 - c_2)(\theta_0 c_3 - \theta_3) - \\ & - (\theta_0 c_1 - \theta_1)(P_2 \theta_2 - c_2 P_0 \theta_0)(1 - c_3) - (1 - c_1)(\theta_0 c_2 - \theta_2)(P_3 \theta_3 - c_3 P_0 \theta_0)] . \end{aligned} \quad (18)$$

— Значение K определим из уравнений (11) как среднее

$$K = \frac{1}{4} \sum_{i=0}^3 \frac{ж_i (1 + \alpha \theta_i) (1 - \gamma P_i)}{G_i} . \quad (19)$$

В рабочем режиме измеряются текущие G , θ и P и удельная электропроводность жидкости вычисляется по формуле (8), где $K_{\theta, P}$ из формулы (7).

Таким образом, достигнуто повышение точности за счет исключения влияния на результат измерения поляризационных эффектов на токовых электродах, обеспечения замкнутости электрического поля измерительной ячейки, обеспечения репрезентативности измерений в конкретной точке пространства и времени, коррекции изменения геометрических размеров измерительной ячейки от изменения температуры и внешнего давления.

Однако задача промывки внутреннего объема датчика решается сложно. Известно устройство [10], которое содержит датчик, корпус которого состоит из неэлектропроводного диска с токовыми электродами и пластинчатой стойки с n измерительными электродами, генератор тока, коммутатор и измеритель напряжения.

Его недостатками являются только частичное подавление поляризационных эффектов на электродах, поскольку один

из токовых электродов входит в потенциальную измерительную цепь; открытый объем измерительной ячейки и, следовательно, изменение «геометрической константы» в неоднородной нестационарной внешней среде; сложная зависимость «геометрической константы» от всех геометрических размеров датчика, практически исключающая возможность её расчета в физических единицах.

Целесообразно повышение реальной точности за счет полного исключения влияния поляризационных эффектов на электродах на результат измерения, реализации замкнутости электрического поля внутри измерительной ячейки и простой формульной зависимости «геометрической константы» от линейных размеров положения потенциальных электродов, а также использования множества измерительных каналов. Для этого в измерителе удельной электропроводности жидкости [3], содержащем датчик с неэлектропроводным диском, двумя токовыми и n потенциальными электродами, генератор тока, резисторный датчик температуры диска, измеритель сопротивления, коммутатор, изме-

ритель напряжения и микропроцессор, первый токовый точечный электрод установлен в центре неэлектропроводного диска, второй токовый электрод выполнен в виде полусферы из электропроводной сетки с диаметром, равным диаметру диска, и установлен на диск для образования электрически замкнутого внутреннего пространства измерительной ячейки, потенциальные точечные электроды в которой размещены на внутреннем поверхности диска по спирали Архимеда на произвольных фиксированных расстояниях друг от друга и соединены через коммутатор попарно с дифференциальными входами измерителя напряжений, и удельная электропроводность жидкости определяется по формуле

$$\bar{\kappa} = \frac{1}{N} \sum_{\substack{i,j \in 1,n \\ i \neq j}}^N \kappa_{ij}, \quad (20)$$

где $\kappa = K_{ij} I / U_{ij}$ – удельная электропроводность жидкости между изолиниями, на которых расположены i -ый и j -ый потенциальные электроды; I – ток в измерительной ячейке; U_{ij} – напряжение между i -ым и j -ым потенциальными электродами; K_{ij} – значение «геометрической константы» ij -ой пары потенциальных электродов; n – число потенциальных электродов; N – число используемых пар потенциальных электродов.

На рис. 3 представлена конструкция датчика. На рис. 4 показана структурно-функциональная схема устройства.

Рис. 3. Конструкция датчика

Рис. 4. Структурно-функциональная схема измерителя

Рассмотрим предложенное устройство подробнее.

Основной особенностью и отличием устройства от других является конструкция датчика. Корпус датчика (рис. 3а) образован неэлектропроводным диском 1, накрытым сверху полусферой 2 из электропроводной сетки, совместно с диском образующей измерительную ячейку с замкнутым в объеме полусферы электрическим полем.

Первый токовый точечный электрод 3 с выводом T_1 расположен в центре диска 1, вторым токовым электродом 4 с выводом T_2 является сетка полусферы 2. При подаче тока I через входы T_1 T_2 внутри полусферы устанавливается электрическое поле, линии равного потенциала которого образуют полусферы во внутреннем объеме ячейки и concentric окружности на поверхности диска, а плотность тока на расстоянии r

от электрода 1 падает с расстоянием r по закону

$$I_r = \frac{I}{2\pi r^2}. \quad (21)$$

Напряженность электрического поля E_r при этом равна

$$E_r = I_r / \kappa, \quad (22)$$

где κ – удельная электропроводность жидкости, а напряжение U_{12} между двумя точками с расстояниями r_1 и r_2 от центра диска равно

$$U_{12} = \int_{r_1}^{r_2} E_r dr = \int_{r_1}^{r_2} \frac{I}{2\pi r^2 \kappa} dr = \frac{I}{2\pi \kappa} \int_{r_1}^{r_2} \frac{dr}{r^2} = \frac{I}{2\pi \kappa} \left(-\frac{1}{r} \right) \Big|_{r_1}^{r_2} = \frac{I}{2\pi \kappa} \left(\frac{1}{r_1} - \frac{1}{r_2} \right). \quad (23)$$

Для удельной электропроводности жидкости получим

$$\kappa = \frac{1}{2\pi} \left(\frac{1}{r_1} - \frac{1}{r_2} \right) \frac{I}{U_{12}} = K_{12} \frac{I}{U_{12}}, \quad (24)$$

где $K_{12} = \frac{1}{2\pi} \left(\frac{1}{r_1} - \frac{1}{r_2} \right)$ (25)

– «геометрическая константа» для пары потенциальных электродов с расстояниями r_1 и r_2 от центра диска. Каждая пара потенциальных электродов образует выход измерительного канала.

В предлагаемом устройстве n потенциальных точечных электродов 5 установлены на n разных концентрических окружностях на диске, например, на разных расстояниях по спирали Архимеда (рис. 3б).

В принципе из n электродов можно образовать $C_n^2 = \frac{(n-1)n}{2}$ пар, часть которых изначально будет иметь одинаковые K_{ij} . Если нет двух потенциальных электродов на одной концентрической окружности (с равными $r_i = r_j$, то изначально будет $(n-1)$ разных K_{ij} и, соответственно, разных пар. Таким образом, возможно сформировать N пар электродов (измерительных каналов), причем

$$(n-1) \leq N \leq \frac{n(n-1)}{2}. \quad (26)$$

Целесообразность выбора числа пар N потенциальных электродов в качестве

выходов отдельных измерительных каналов определяется конкретной технической реализацией датчика.

Пронумеруем потенциальные электроды в порядке возрастания. Тогда удельная электропроводность жидкости, измеренная ij -ым каналом будет

$$\kappa_{ij} = K_{ij} \frac{I}{U_{ij}}, \quad (27)$$

где $i, j \in \overline{1, n}$,

$$K_{ij} = \frac{1}{2\pi} \left(\frac{1}{r_i} - \frac{1}{r_j} \right). \quad (28)$$

«Геометрическая константа» K_{ij} при градуировке по образцовому раствору с известной κ_0 определяется по формуле

$$K_{ij} = \frac{\kappa_0 U_{ij}}{I}. \quad (29)$$

При изменении температуры диска на θ от начальной и внешнего гидростатического давления на P от начального изменяются его размеры и изменяется величина K_{ij} , откорректированное значение которой $K_{ij, \theta, P}$ определяется по формуле

$$K_{ij, \theta, P} = K_{ij} \frac{1}{(1 + \alpha\theta)(1 - \gamma P)} , \quad (30)$$

где α – температурный коэффициент расширения; γ – коэффициент сжатия.

Для контроля температуры θ диска в него встроен распределенный резисторный датчик температуры 6 (рис. 3, 4) с выводами D_1 и D_2 . Значение гидростатического давления P берется извне. Например, из данных СТД-комплекса, в котором используется измеритель электропроводности. Коэффициенты α и γ считаются априорно известными для материала, из которого сделан диск, или определяются градуировкой для готового датчика.

Из-за естественной пространственно-временной неоднородности жидкости внутри измерительной ячейки, различия i, j трасс между разными парами потенциальных электродов и неодновременности опроса каналов, значения $\bar{\varepsilon}_{ij}$ будут различными и для измерительной

ячейки в целом находится их среднее

$$\bar{\varepsilon} = \frac{1}{N} \sum_{\substack{i, j \in 1, n \\ i \neq j}}^N \varepsilon_{ij} . \quad (31)$$

В процессе эксплуатации за счет загрязнения или биологического обрастания датчика значения K_{ij} могут изменяться по-разному, приводя к появлению систематических погрешностей измерения, которые для множества N каналов в формуле (31) осредняются как случайные.

Если множество систематических погрешностей в разных каналах имеет нулевое среднее, что вполне вероятно, то возможна текущая адаптивная переградуировка каналов определением текущих «геометрических констант» $K_{ij}(\tau)$ по формуле

$$K_{ij}(\tau) = \frac{\bar{\varepsilon}(\tau - 1) U_{ij}(\tau - 1)}{I} , \quad (32)$$

где $\bar{\varepsilon}(\tau - 1)$, $U_{ij}(\tau - 1)$ – значения величин в предшествующий момент времени $(\tau - 1)$, причем значение $\bar{\varepsilon}(\tau - 1)$ принято за образцовое.

Рассмотрим состав и структуру устройства (рис. 4).

В состав измерителя входят: генератор тока (ГТ) 7, соединенный по выходам со входами токовых электродов T_1 и T_2 , коммутатор (К) 8 пар выходов P_i и P_j потенциальных электродов на вход измерителя напряжения (ИН) 9, измеритель сопротивления (ИС) 10, входы которого соединены с выходами D_1 и D_2 распределенного датчика температуры 6.

Измеритель работает следующим образом.

Датчик помещается в жидкость, которая заполняет измерительную ячейку – полусферу. Благодаря большой поверхности сетки токового электрода 2 осуществляется хороший водообмен с внешней средой за счет внешней конвекции и диффузии, что обеспечивает идентичность воды вне и внутри измери-

тельной ячейки и, следовательно, репрезентативность измерений.

Подается ток I через токовые электроды. Полусфера токового электрода 2 совместно со вторым токовым электродом 3 в центре диэлектрического диска 1 обеспечивают замкнутость электрического поля и распределение эквипотенциальных поверхностей по полусфере в объеме и по окружностям на диэлектрическом диске.

Возможные случайные искажения электрического поля внутри ячейки из-за биологического обрастания электрода-сетки рандомизируются использованием n потенциальных электродов и N каналов измерения напряжений. Детермированные изменения линейных размеров между потенциальными электродами и центром диска от изменения температуры и гидростатического давления корректируются по формуле (30) за счет контроля температуры θ диска встроенным датчиком 6 и давления P внешним измерителем.

Производится N измерений напряжений U_{ij} на N парах потенциальных электродов. Вычисляются N значений удельной электропроводности κ_{ij} по формуле (7) и среднее $\bar{\kappa}$ по формуле (31).

Заключение. Таким образом, в предложенных решениях исключено влияние поляризационных эффектов на электродах на результат измерения, обеспечивается измерение удельной электропроводности жидкости в электрически замкнутом объёме измерительной ячейки, которая хорошо промывается МГД-движителем или за счет сеточного выполнения второго токового электрода. «Геометрическая константа» датчика зависит только от двух линейных геометрических размеров, корректируемых при изменении температуры и давления и имеет также потенциальную возможность измерения и вычисления в физических единицах. Использование N измерительных каналов для коррекции значений «геометрических констант» разных каналов по текущему среднему обеспечивает метрологическую долговечность устройства.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Патент* РФ № 2654316. Устройство для измерения удельной электропроводности жидких сред. Гайский В.А., С.В. Казанцев, А.В. Клименко. Оpubл. 17.05.2018. Бюл. № 14.

2. *Патент* РФ № 2658498. Устройство для измерения удельной электропроводности жидких сред. Гайский В.А., Гайский П.В. Оpubл. 21.06.2018. Бюл. № 18.

3. *Лопатин Б.А.* Кондуктометрия. Новосибирск: Изд-во СО АН СССР. 1964. 279 с.

4. *Степанюк И.А.* Океанологические измерительные преобразователи. Л.: Гидрометиздат, 1986. 272 с.

5. *Патент* РФ № 2046361. Устройство для измерения удельной электропроводности жидких сред. Веревкин В.И., Быстров В.А., Поляков С.Е. Оpubл. 20.10.1995. Бюл. № 10.

6. *Патент* РФ № 2312331. Кондуктометр. Гайский В.А., Клименко А.В. Оpubл. 10.12.2007. Бюл. 34.

7. *Измеритель* электропроводности жидкости / В.А. Гайский, А.В. Клименко, А.Н. Греков [и др.] // Системы контроля окружающей среды / Средства и мониторинг. Сб. науч. тр. МГИ НАНУ. Севастополь. 2005. С. 81–84.

8. *Общая физика.* Электрические и магнитные явления / А.И. Ахиезер. Справочное пособие Киев: Наукова думка. 1981. 358 с.

9. <https://en.wikipedia.org/wiki/Magnetohydrodynamics> (дата обращения: 12.04.2019).

10. *Патент* РФ № 2055351. Устройство для измерения удельной электропроводности жидких сред. Веревкин В.И., Быстров В.А., Беляев В.М. [и др.] Оpubл. 27.02.1996. Бюл. № 2.

CONDUCTIVE CONDUCTIVITY METERS OF LIQUID MEDIA WITH CLOSED ELECTRIC FIELD

V.A. Gaisky, P.V. Gaisky

Institute of Natural and Technical Systems, RF, Sevastopol, Lenin St., 28

In order to increase the accuracy of measuring electrical conductivity of liquids with conductive sensors, new designs of sensors with an electric field closed inside and structural diagrams of meters based on them are proposed and described [1, 2]. The devices ensure the exclusion of polarization effects on electrodes, grading according to standard solutions of the "geometric constant", and correction of its value with changing temperature and pressure.

Keywords: conductive conductivity sensor, closed electric field.