

ОЦЕНКА ПОГРЕШНОСТИ ЭТАЛОННОЙ КОНДУКТОМЕТРИЧЕСКОЙ ЯЧЕЙКИ, ОБУСЛОВЛЕННОЙ НЕЭКВИПОТЕНЦИАЛЬНОСТЬЮ ПОВЕРХНОСТИ ЭЛЕКТРОДОВ

А.И.Глухенький¹, канд.техн.наук, **А.А.Михаль²**, канд.техн.наук
^{1,2} – Институт электродинамики НАН Украины,
пр. Победы, 56, Киев-57, 03680, Украина

Разработана математическая модель для расчета погрешности преобразования эталонной четырехэлектродной кондуктометрической ячейки, обусловленной неэквипотенциальностью поверхности электродов. Определены условия, при которых эта погрешность не превышает 10 ppm. Библ. 6, рис. 5.

Ключевые слова: погрешность, кондуктометрическая ячейка, сопротивление, геометрия электродов.

Введение. Кондуктометрические методы и средства измерения широко используются в различных отраслях науки, промышленности и технологии. Например, в океанологии – для определения солености морской воды; в энергетике – для контроля качества водоподготовки котлов; в экологии – для оценки общей минерализации промышленных и сточных вод; в медицине. В последнем случае существуют целые научные направления, основанные на кондуктометрических измерениях, такие, как исследования гемодинамики кровеносной системы и внутренних органов (тетраполярная реоплейтизмография), кондуктометрические методы изучения заболеваний крови и почечной недостаточности, исследование новых свойств и механизмов биочувствительности, биогенерации (нелинейная электротермодинамика) и др.

Проводящие жидкости (электролиты) являются проводниками второго рода с ионным типом проводимости. Одной из основных физических величин, характеризующих их электрические свойства, является электролитическая проводимость (ЭП) σ [См/м]. В основе обеспечения единства измерения ЭП лежит эталон, основные функции которого заключаются в воспроизведении, хранении и передаче размера физической величины нижестоящим в поверочной схеме средствам измерений. Эталоны ведущих экономически развитых стран, которые были созданы в последние годы, основаны на использовании “абсолютного (прямого)” метода воспроизведения физической величины [5]. Суть его сводится к двум процедурам: измерению сопротивления R_x эталонной кондуктометрической ячейки и последующему вычислению значения ЭП согласно уравнению для сопротивления R_{DC} участка длиной L и площадью поперечного сечения S бесконечно длинного цилиндрического проводника на постоянном токе

$$\sigma = L / (R_{DC} S) . \quad (1)$$

Однако, исходя из реальных конструкций первичных измерительных преобразователей (ПИП) и методов измерений, заложенных в эталонах ЭП ведущих промышленно развитых стран [4], измеренное сопротивление R_x не может быть тождественно равно сопротивлению R_{DC} , по крайней мере, по двум соображениям. Во-первых, ПИП эталонов имеют конечные размеры и конкретную геометрию электродной системы. Во-вторых, практически во всех случаях измерение осуществляется на переменном токе. В процессе измерения указанные факторы вызывают два эффекта. Первый эффект связан с растеканием электрического тока по токовому электроду конечного сопротивления. В результате внутренние поверхности электродов перестают быть поверхностями равного потенциала, что в свою очередь, приводит к неравномерному распределению напряжения по периметру жидкого проводника. Второй эффект вызван наличием токов смещения. Перечисленные эффекты являются причиной или источниками возникновения погрешности, которую удобно рассматривать как относительную величину

$$\delta = R_x / R_{DC} - 1 . \quad (2)$$

Т.о. целью работы является построение расчетной модели, оценка и анализ этой погрешности.

Постановка задачи. Несоответствие сопротивлений R_X и R_{DC} рассмотрим на примере ПИП эталона ЭП, который используется в Украине [1] и предназначен для воспроизведения единицы ЭП жидкости с наивысшей точностью в диапазоне 0,06–60 См/м. На рис. 1 показана обобщенная функциональная схема, поясняющая принцип работы основного (ответственного за воспроизведение) измерительного канала эталона ЭП. В качестве ПИП эталона выступает четырехэлектродная кондуктометрическая ячейка. Исследуемая жидкость находится внутри трубки внутренним диаметром D и общей длиной $L + 2l$. Трубка служит для фиксации геометрии жидкого проводника и состоит из трех секций: центральной 1 и двух боковых 2. На торцах центральной секции 1 размещены металлические кольцевые потенциальные электроды 3 толщиной h_p и шириной, соответствующей толщине стенки трубки. На краях трубки закреплены два диска 4, на внутреннюю поверхность которых нанесены металлические пленки 5 толщиной h_t , выполняющие функцию токовых электродов. Материалом трубок и дисков 4 является кварцевое стекло, обладающее хорошими изоляционными свойствами, временной стабильностью и минимальным коэффициентом температурного расширения. В качестве металла электродов используется платина как материал с минимальным для большинства электролитов поляризационным эффектом.

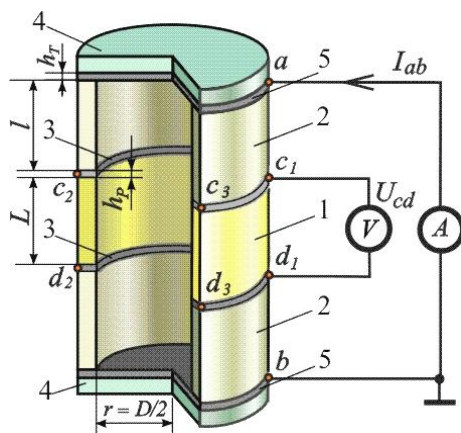


Рис. 1

Измерение сопротивления в эталоне выполняется на переменном токе, что исключает выпадение осадка в электролите, а также позволяет использовать более точные средства измерения, например, уравновешенные трансформаторные мостовые измерительные цепи. Измерительные сигналы (токи и напряжения) по форме являются синусоидальными с частотой 1 кГц. ПИП в четырех точках a, b, c и d подключен к средству измерения, которое обеспечивает прохождение тока \dot{I}_{ab} между точками a и b и снятие разности потенциалов (напряжения) \dot{U}_{cd} с точек c и d . В общем случае средство измерения сопротивлению переменному току имеет два квадратурных измерительных канала *real* (активная составляющая) и *image* (реактивная составляющая) и может находиться в двух режимах: режиме измерения импеданса Z_X и режиме измерения адмитанса Y_X . Тогда их коэффициенты преобразования для одного канала по активной составляющей в общем виде можно представить

$$R_X = \text{real}(\dot{U}_{cd} / \dot{I}_{ab}) = \text{real}(\dot{Z}_X), \quad (3)$$

$$G_X = \text{real}(\dot{I}_{ab} / \dot{U}_{cd}) = \text{real}(\dot{Y}_X). \quad (4)$$

Показанная на рис. 1 конструкция ПИП несколько идеализирована. В реальной кондуктометрической ячейке в центре дисков присутствуют отверстия для залива пробы, а внутренняя граница токовых электродов представлена конусной поверхностью [4]. Очевидно, такие особенности реальной конструкции также приведут к различию между R_X и R_{DC} и, соответственно, к погрешности (2). Однако из-за ограничений объема статьи эти исследования здесь не представлены.

В данной работе основное внимание будет уделено оценке составляющих погрешности воспроизведения ЭП ПИП эталона, обусловленных выполнением измерений на переменном токе, а также их зависимости от таких конструктивных параметров как толщина токовых h_t и потенциальных h_p электродов, отношение длин секций трубки l/L .

Определимся также с порядком рассматриваемых погрешностей. Поскольку доступные в настоящее время средства измерений и соответствующие эталоны (концевые меры длины и эталонные кольца) позволяют определять длину L и диаметр D центральной секции трубки реального ПИП с погрешностью порядка 10^{-5} , то предельное значение погрешности именно такой величины целесообразно анализировать в данной работе.

Математическая модель. При построении математической модели ячейки будем полагать, что измеряемая жидкость является однородной по составу (с постоянной концентрацией электролита) и изотропной средой и, следовательно, $\sigma = \text{const}$. Пренебрегаем также поляризационными эффектами на электродах, т.е. не учитываем приэлектродные процессы на межфазной границе металл/электролит.

Точечный подвод тока и снятие потенциалов, выполнение токовых и потенциальных электродов в виде тонких металлических пленок предопределяет трехмерный характер растекания переменных электрических токов в ПИП эталона, что, в свою очередь, требует рассмотрения трехмерной полевой электромагнитной задачи. В то же время, ввиду ограниченности ресурсов вычислительной техники численное решение такой задачи до сих пор труднореализуемо, поэтому для оценки погрешности воспроизведения ЭП в ПИП эталона обоснуем и примем дополнительные упрощающие расчет допущения.

Ранее [2] авторами численно в двумерном приближении была выполнена расчетная оценка влияния явления электромагнитной индукции на относительную погрешность определения сопротивлений R_{DC} цилиндрических проводников при измерениях сопротивления на переменном токе. Полученные результаты свидетельствуют о том, что для проводников с удельной электропроводностью менее 10^2 См/м относительная погрешность измерения на частоте 1 кГц не превышает 10^{-10} . Таким образом, ввиду малости вносимой погрешности явлением электромагнитной индукции при анализе точности воспроизведения ЭП в эталоне можно пренебречь.

Исходя из этого, полная трехмерная задача расчета электромагнитного поля может быть сведена к трехмерной задаче в так называемом приближении малых токов (small current), что значительно упрощает расчет. В этом случае задача сводится к решению в расчетных подобластях (столбе электролита и кварцевой трубке) уравнения Лапласа

$$\nabla \dot{\sigma}_i \nabla \dot{\phi} = 0, \quad (5)$$

где $\dot{\sigma}_i = \sigma_i + j\omega \varepsilon_0 \varepsilon_r$ – комплексная удельная проводимость, учитывающая протекание как токов проводимости, так и токов смещения в каждой из подобластей, $\varepsilon_0 = 8,85 \cdot 10^{-12}$ Ф/м, ε_r – относительная диэлектрическая проницаемость среды, $\dot{\phi}$ – скалярный электрический потенциал.

В качестве граничного условия на внешней боковой поверхности трубки задавалось условие электрической изоляции $\vec{n} \cdot \vec{J} = 0$, где \vec{n} – вектор нормали к поверхности, \vec{J} – вектор плотности полного тока. Для торцевых поверхностей трубки с электролитом граничное условие задавалось в виде уравнения

$$-\nabla_i \sigma_{p_t} h_t \nabla_i \dot{\phi} = \vec{n} \cdot \vec{J}, \quad (6)$$

где h_t – толщина токового электрода из платины с удельной электропроводностью σ_{p_t} . Граничное условие (6) является уравнением Пуассона и фактически соответствует условию непрерывности электрического тока в дифференциальной форме – $\text{div} \vec{J} = 0$. В нашей задаче оно позволяет моделировать пленочные токовые электроды первичного преобразователя.

Для моделирования потенциальных электродов использовалось внутреннее граничное условие, которое задавалось уравнением

$$-\nabla_i \sigma_{p_t} h_p \nabla_i \dot{\phi} = \vec{n} (\vec{J}_1 - \vec{J}_2), \quad (7)$$

где h_p – толщина потенциального электрода. В правой части уравнения (7) представлена разность нормальных составляющих полного тока на границах раздела между центральной и крайними секциями кварцевой трубки.

При проведении расчетов неизменными оставались внешний и внутренний диаметры кварцевой трубки (15 и 10 мм соответственно); длина центральной секции трубки (30 мм); удельная электропроводность платины (10^7 См/м) и кварца (10^{-14} См/м); относительная диэлектрическая проницаемость электролита (81) и кварца (3); рабочая частота (1000 Гц). Варьировались длины крайних секций трубки, толщины токовых и потенциальных электродов, значения ЭП жидкости.

По результатам расчета определялись значения электрических потенциалов в точках c и d . Полный ток вычислялся путем интегрирования нормальной составляющей плотности тока по произвольному поперечному сечению трубки с электролитом, после чего по выражениям (3) и (2) находилась относительная погрешность воспроизведения ЭП в ПИП эталона.

Для возможности отдельной оценки вклада в погрешность токов смещения и конструктивных факторов расчет в соответствии с представленной моделью также выполнялся и на постоянном токе (в отсутствии токов смещения).

Анализ результатов расчета. Рассмотрим подробнее количественные соотношения, полученные в виде зависимостей погрешности (2) от параметров объекта измерения.

Прежде всего, отметим, что отношение расстояний между токовыми и потенциальными электродами является крайне важным параметром при разработке вторичных измерительных преобразователей. Падение напряжения на столбах жидкости 2 (рис. 1) в процессе измерения выступает как синфазная помеха. Тогда, для прецизионных приборов с отсчетной шкалой в шесть декад для точной реализации функций (3, 4) коэффициент подавления измерительной цепью синфазного сигнала должен превышать 120 dB. На переменном токе частотой 1 кГц (из-за наличия перекрестных емкостей) это крайне непростая задача.

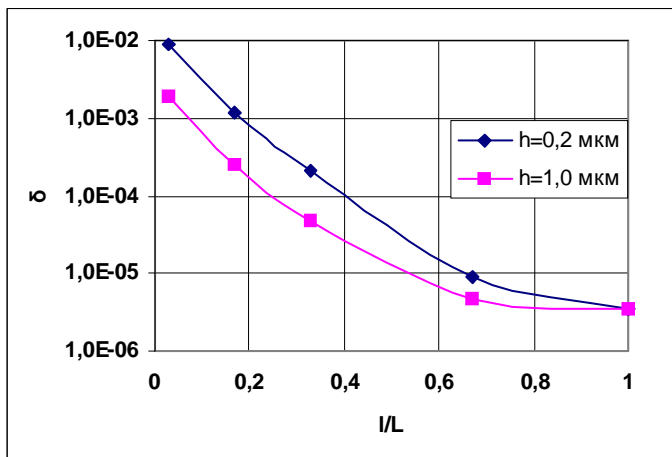


Рис. 2

Зависимость погрешности от толщин токового $h(T)$ и потенциального $h(P)$ электродов при $l/L=1/3$ и $\sigma = 60$ См/м показана на рис. 3. Из графиков следует, что толщина как токового, так и потенциального электродов влияет на погрешность практически одинаковым образом. Общая тенденция снижения погрешности с ростом толщины электродов связана с уменьшением их сопротивления и соответствующим снижением неравномерности распределения электрического потенциала. Очевидно, погрешностью можно пренебречь только при толщине более 10 мкм.

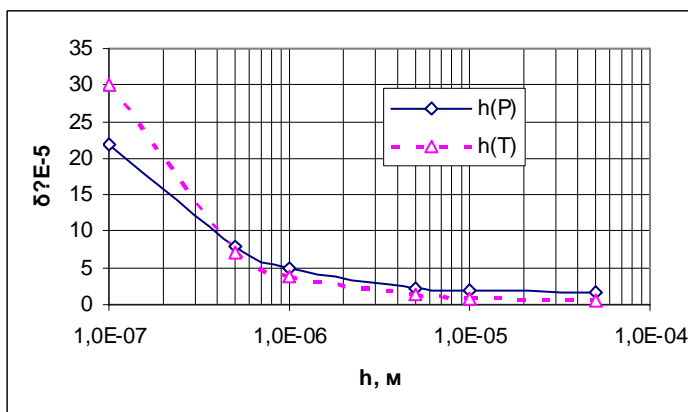


Рис. 3

нагрев, охлаждение). Очевидно, более толстые пленки крайне трудоемки в изготовлении. Технология гальванического осаждения предусматривает наличие металлической основы. Поэтому для токовых электродов технология пригодна, а для потенциальных – нет. Для токовых электродов можно также применить прессование или импульсную ВЧ сварку двух дисков 4 и 5 (рис. 1).

Необходимость учета погрешности из-за конечной толщины токовых электродов практически полностью снимается в результате использования технологии, допускающей применение металлической основы дисков 4. В отношении потенциальных электродов такой подход реализовать нельзя. Кроме того, существует неопределенность в вычислении поправки к длине трубки из-за конечной толщины потенциальных электродов. Она возникает при сборке, обусловлена несоосностью трубок 1

На рис. 2 показан характер зависимости погрешности для различных соотношений длин трубок l/L . Результаты приведены для двух толщин токовых электродов 0,2 и 1,0 мкм, при толщине потенциального электрода 0,3 мкм и электролитической проводимости жидкости $\sigma = 60$ См/м, что соответствует верхней границе диапазона воспроизведения эталона. Из рисунка следует, что при одинаковых длинах трубок 1 и 2 ($l/L=1$) погрешностью (поскольку она меньше 10^{-5}) можно пренебречь даже для очень тонких токовых электродов. При соотношениях $l/L < 0,5$ этот вид погрешности необходимо учитывать как корректирующий параметр при оценке неисключенной систематической погрешности.

Этот вывод важен для выбора той или иной технологии изготовления электродов. Каждая из существующих технологий имеет свои преимущества и недостатки. Например, технология химического осаждения позволяет создавать электроды толщиной до 1 мкм. Но из-за плохой адгезии и рыхлой структуры более толстый электрод механически не надежен и осыпается. Технология вжигания предусматривает превращение платино-хлористо-водородной кислоты в металлическую платину при температурах выше 600°C . Однако, как показывает практика, чтобы получить пленку толщиной 0,3 мкм на одной стороне трубки, необходимо более 20 итераций (высушивание,

и 2 и вызывает погрешность, которая равна полусумме толщин верхнего и нижнего потенциальных электродов (доказательство в данной работе не рассматривается). Тогда к толщине потенциальных электродов возникают противоречивые требования, оптимизация которых возможна только для конкретной конструкции ПИП.

Из графиков, показанных на рис. 2 следует, что выбирать отношение $l/L=0,8$ и более не имеет смысла, поскольку для заданной толщины электродов это не приводит к дальнейшему снижению погрешности данного вида. Для облегчения требований к характеристикам вторичного измерительного преобразователя отношение l/L необходимо снижать. Рассмотрим зависимость погрешности в диапазоне электролитической проводимости измеряемых растворов σ в ситуации, когда эта погрешность еще заметна, например, при $l/L=1/3$. Вид этой зависимости для одинаковой толщины электродов $h_T=h_P=3 \times 10^{-7}$ м показан на рис. 4,¹ где также показаны результаты расчета погрешности по формуле (3) для двух вариантов: постоянного тока $\delta(DC)$ и переменного тока $\delta(AC)$. Поскольку погрешность $\delta(AC)$ изменяется в широких пределах и при этом изменяет знак, авторы вынуждены пользоваться логарифмической шкалой и представлять погрешность по модулю. Наличие небольшого минимума в области $\sigma \approx 10^{-3} - 10^{-2}$ См/м свидетельствует о переходе через нулевую отметку и смене знака погрешности $\delta(AC)$. Причем влево от минимума имеем отрицательные значения погрешности $\delta(AC)$, а вправо – положительные. Кроме того, вправо от минимума погрешности $\delta(AC)$ и $\delta(DC)$ практически полностью совпадают, что свидетельствует о возможности расчета погрешности в этом диапазоне на постоянном токе.

Из общего характера зависимости следует, что рост погрешности выше 10^{-5} наблюдается только на краях исследуемого диапазона ($\sigma > 10^1$ См/м – диапазон кислот и $\sigma < 10^{-3}$ См/м – диапазон сильно разбавленных растворов, дистиллированной воды и органических растворителей).

Характер зависимости $\delta(AC)$ на рис. 4 объясняется наличием двух составляющих (источников) этой погрешности $\delta(AC) = \delta_h + \delta_e$. Первая составляющая δ_h обуславливает линейно нарастающий характер зависимости погрешности, начиная с $\sigma \approx 10^1$ См/м и свидетельствует о том, что для этого диапазона ЭП сопротивление столба жидкости между токовыми и потенциальными электродами мало и становится соизмеримым с сопротивлением токового дискового электрода. В результате доля падения потенциала (напряжения) на токовом электроде возрастает в общем распределении потенциала.

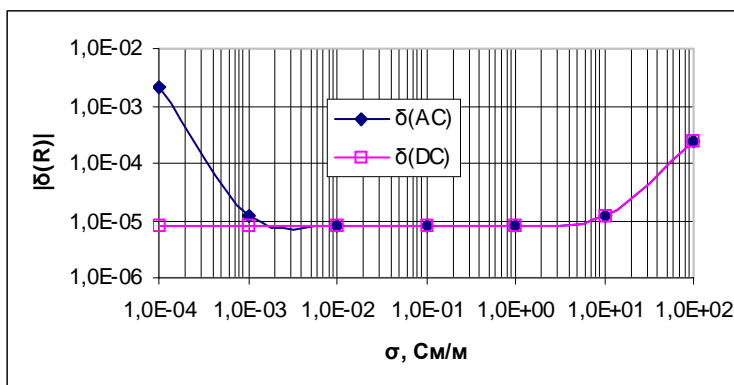


Рис. 4

Вторая составляющая δ_e на участке $\sigma < 10^{-3}$ См/м свидетельствует о преобладающем вкладе токов смещения в высокоомной области диапазона ЭП. Из совпадения погрешностей $\delta(AC)$ и $\delta(DC)$ в низкоомной области диапазона ЭП, следует, что $\delta(DC) = \delta_h$. Т.о. расчет погрешности на постоянном и переменном токах позволяет рассматривать погрешности δ_h и δ_e отдельно. Квадратичный характер зависимости погрешности δ_e вызывает необходимость более подробного исследования влияния токов смещения на результат измерений. Так, для участка прямолинейного цилиндрического проводника длиной L и поперечным сечением S с учетом принятого ранее безындукционного приближения ($j\omega A = 0$, где \dot{A} – векторный магнитный потенциал) для полного тока \dot{I} в любом поперечном сечении проводника имеем

¹ Минимальные значения погрешности, полученные авторами при расчете, колебались в диапазоне от 2 до 8×10^{-6} (что несколько меньше интересующего нас порогового значения 10^{-5}). Вероятно, это было вызвано ограниченными вычислительными возможностями пакета. Можно предположить, что на горизонтальных участках рис. 2–4, где погрешность ниже 8×10^{-6} , реальное значение погрешности может быть еще меньше.

$$\dot{I}_{ab} = \int_S (\sigma + j\omega\varepsilon_0\varepsilon_r) \dot{E} ds = \int_S (\sigma + j\omega\varepsilon_0\varepsilon_r) (-grad\dot{\phi} - j\omega\dot{A}) ds = -(\sigma + j\omega\varepsilon_0\varepsilon_r) \cdot grad\dot{\phi} \cdot S, \quad (8)$$

где $grad\dot{\phi}$ – градиент скалярного электрического потенциала, который является постоянной величиной в плоскости поперечного сечения рассматриваемого проводника.

Поскольку напряжение между точками c и d

$$\dot{U}_{cd} = -\int_c^d grad\dot{\phi} dl = -grad\dot{\phi} \cdot L, \quad (9)$$

то, подставив выражения (8) и (9) в уравнение (3), получим

$$R_X = real\left(\frac{-grad\dot{\phi} \cdot L}{-(\sigma + j\omega\varepsilon_0\varepsilon_r) \cdot grad\dot{\phi} \cdot S}\right) = R_{DC} \cdot real\left(\frac{1}{1 + j\omega\varepsilon_0\varepsilon_r / \sigma}\right). \quad (10)$$

Представим отношение $\omega\varepsilon_0\varepsilon_r / \sigma$ в виде тангенса фазового угла ϕ

$$\omega\varepsilon_0\varepsilon_r / \sigma = tg\phi, \quad (11)$$

тогда выражение для погрешности будет иметь следующий вид:

$$\delta_\varepsilon = R_X / R_{DC} - 1 = real\left(\frac{1}{1 + jtg\phi}\right) - 1 = \frac{tg^2\phi}{1 + tg^2\phi} \approx tg^2\phi. \quad (12)$$

Приближенное выражение справедливо для малых тангенсов. Два последних уравнения являются аналитическими выражениями, обосновывающими квадратичный характер зависимости части погрешности $\delta(AC)$ от ЭП жидкости, полученной численными методами и показанной на рис. 4 для диапазона $\sigma < 10^{-3}$ См/м.

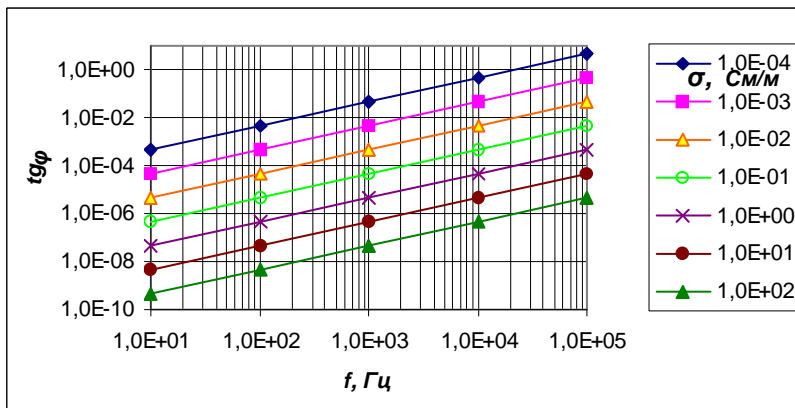


Рис. 5

На рис. 5 показаны частотные зависимости тангенса фазового угла в диапазоне возможных изменений электролитической проводимости жидкостей. Поскольку наивысшая точность воспроизведения ЭП в эталоне реализуется в диапазоне 60 мСм/м – 60 См/м, то в этом диапазоне на частотах вплоть до 10 кГц рассматриваемой погрешностью можно пренебречь, так как ее величина существенно меньше 10^{-5} .

Если величина погрешности становится значительной, на-

пример, для сильно разбавленных электролитов ($\sigma < 10^{-3}$ См/м), то измерительный прибор необходимо перевести в режим измерения адмитанса – комплексной проводимости. Обобщенная функция преобразования в этом случае будет иметь вид: $\dot{Y}_X = \dot{I}_{ab} / \dot{U}_{cd}$. Тогда, подставив в последнее уравнение полученные ранее выражения для I_{ab} и U_{cd} (уравнения (8) и (9)), после несложных преобразований получим

$$\dot{Y}_X = 1/R_{DC} + j\omega C_{Sol}, \quad (13)$$

где $C_{Sol} = \varepsilon_0\varepsilon_r S/L$.

Поскольку измерительное преобразование будет осуществляться в соответствии с уравнением (4), то очевидно, что:

$$G_X = real(\dot{Y}_X) = 1/R_{DC}. \quad (14)$$

Отсюда следует, что погрешность, обусловленная токами смещения, носит сугубо методический характер и полностью отсутствует при переходе в режим измерения проводимости. Кроме этого, как следует из [3], линейно нарастающий характер частотной зависимости $tg\phi$ (рис. 5) при различных проводимостях σ свидетельствует о том, что двухэлементная схема замещения объекта измерений будет параллельной, а характер реактивности – емкостный.

Заключение. 1. Расчетная модель может использоваться как инструмент в задаче распределения требований к метрологическим характеристикам между первичным и вторичным измерительным

преобразователем. Построенные на ее основе теоретические зависимости позволяют, задавшись необходимой погрешностью коэффициента преобразования ПИП, определить требования к геометрии электродной системы и технологии изготовления либо минимизировать значение погрешности путем увеличения расстояния между токовыми и потенциальными электродами. Последнее влечет за собой усложнение средства измерения.

2. Столб жидкости как объект измерений можно представить двухэлементной схемой замещения в виде параллельно включенных проводимости и емкости. Составляющая погрешности, вызванная токами смещения, носит методический характер и полностью отсутствует при переходе в режим измерения проводимости.

3. Разработка и изготовление ПИП с учетом полученных рекомендаций позволяет не учитывать конкретный вид погрешности в балансе расширенной неопределенности при воспроизведении электролитической проводимости в государственном первичном эталоне единицы ЭП жидкости. Последние международные сличения ССQM–K36 свидетельствуют о том, что неопределенность результатов воспроизведения ЭП эталоном Украины – одна из самых низких среди ведущих стран мира [6].

1. *Гаврилкін В.Г та ін.* Державний первинний еталон одиниці електричної провідності рідин. // Український метрологічний журнал – 2006. – №3. – С. 47–51.

Gavrylkin V.G. et al. The state primary standard of unit of electrolytic conductivity of liquids // Ukrainskyi metrologichnyi zhurnal. – 2006. – №3. – P. 47–51. (Ukr.)

2. *Глухенький А.И., Михаль А.А.* Расчетная оценка составляющих импеданса цилиндрического проводника при их измерении на переменном токе // Технічна електродинаміка. – 2010. – № 1. – С. 15–22.

Glukhenkii A.I., Mykhal A.A. Analysis of circular conductor impedance component within AC measurement // Tekhnichna elektrodynamika. – 2010. – № 1. – P. 15–22. (Rus.)

3. *Карандеев К.Б., Штамбергер Г.А.* Обобщенная теория мостовых цепей переменного тока. – Новосибирск: Изд-во СО АН СССР, 1961. – 224 с.

Karandeev K.B., Shtamberger G.A. **The generalized theory of AC bridge circuits.** – Novosibirsk: Izdatelstvo Sibirskogo Otdeleniia Akademii Nauk SSSR, 1961. – 224 p. (Rus.)

4. *Brinkmann F., Ebbe Dam N., Deák E., Durbiano F., Ferrara E., Fükö J., Jensen H. D., Máriássy M., Shreiner R. H., Spitzer P., Sudmeier U., Surdu M., Vyskočil L.* General paper: Primary methods for the measurement of electrolytic conductivity // Accred Qual Assur. – 2003. – 8:346 – 353 DOI 10.1007/s00769-003-0645-5.

5. *Wu Y.C.* A DC method for the absolute determination of conductivities of the primary standard KCl solution from 0°C to 50°C // "J. Res. Natl. Inst. Stand. Technol.". – 1994. – 99. – №3. – P. 241–246.

6. http://kcdb.bipm.org/AppendixB/appbresults/ccqm-k36/ccqm-k36_final_report.pdf

УДК 621.317

О.І.Глухенький¹, канд.техн.наук, **О.О.Міхаль²**, канд.техн.наук

^{1,2} – Інститут електродинаміки НАН України,

Пр. Перемоги, 56, Київ-57, 03680, Україна

Оцінка похибки еталонної кондуктометричної комірки, що зумовлена нееквіпотенційністю поверхні електродів

Розроблено математичну модель для розрахунку похибки перетворення еталонної чотириелектродної кондуктометричної комірки, що зумовлена нееквіпотенційністю поверхні електродів. Визначено умови, за яких ця похибка не перевищує 10 ppm. Бібл. 6, рис. 5.

Ключові слова: похибка, кондуктометрична комірка, опір, геометрія електродів.

A.I.Glukhenkyi¹, A.A.Mykhal²

^{1,2} – Institute of Electrodynamics National Academy of Science of Ukraine,

Peremogy, 56, Kyiv-57, 03680, Ukraine

Error estimation of standard conductometric cell conditional on non-equipotentiality of electrode face

The mathematical model for error estimation of the conversion of standard four-electrode conductometric cell conditional on non-equipotentiality of electrode face has been worked out. The conditions under which this error does not exceed 10 ppm have been specified. References 6, figures 5.

Key words: error, conductometric cell, resistivity, configuration of electrodes.

Надійшла 18.05.2010

Received 18.05.2010