

Техника диэлектрических измерений водонасыщенных систем

Ю. Г. ПОДКИН *, О. М. РОЗЕНТАЛЬ**

* Сарепульский политехнический институт, Сарепул, Россия,

** Институт водных проблем РАН, Москва, Россия,

e-mail: orosental@rambler.ru

Предложены методы и техника диэлектрических измерений водно-минеральных систем, сформулированы требования к построению и разработана конструкция емкостного первичного измерительного преобразователя для контроля минеральных водонасыщенных природных и техногенных систем. Разработана методика расчета эквивалентной входной проводимости и ее составляющих на основе каскадного соединения элементов протяженного коаксиального первичного измерительного преобразователя. Проведено математическое моделирование и экспериментальное исследование предложенного преобразователя, подтвердившее эффективность его применения для контроля состояния связанной воды водонасыщенных минеральных систем природного и техногенного генезиса.

Ключевые слова: водно-минеральная система, диэлектрическая характеристика, первичный измерительный преобразователь, электродная поляризация.

The methods and technology of dielectric measurements of water-mineral systems have been developed. The requirements to the construction were formulated and the design of capacitive primary measuring converter to control the mineral water-saturated natural and man-made systems — soil and hydro constructions — was developed. The procedure of calculation of equivalent input conductivity and its components based on a cascade connection of elements of long coaxial primary measuring converter (PMC) was worked out. Mathematical modeling and an experimental study of capacitive PMC confirming the efficiency of its application for control monitoring of bound water of mineral water-saturated systems of natural and anthropogenic origin — were carried out.

Key words: water-mineral system, dielectric characteristic, primary measuring converter (PMC), electrode polarization.

Водонасыщенные среды распространены в природе и используются в технике — это грунты, породы, осадки, строительные и керамические смеси. В одних случаях они образуют ложе и берега водных объектов, в других представляют сырье для гидротехнических сооружений. При всем многообразии указанных сред их наиболее значимые на практике механические свойства (реологические, прочностные и др.) определяются протекающими в них коллоидно-химическими процессами коагуляции, агрегации, сорбции и т. д., зависящими от входящей в эти системы водной матрицы, интенсивно взаимодействующей с минеральной дисперсной фазой. Взаимное притяжение или отталкивание частиц этой фазы через водные прослойки определяет такие надмолекулярные (механические) свойства, как, например, склонность к взмучиванию мелкоалевритовых и глинистых илов, устойчивость береговых зон рек из глинисто-песчаных отложений или прочность осадочных и вязких пород. Естественным способом решения возникающих перед исследователями задач контроля и прогноза эксплуатационных свойств рассматриваемых сред является наблюдение за состоянием водной матрицы как компонента, наиболее динамично меняющего свои свойства при изменении состояния среды. В [1—6] показано, что такие наблюдения целесообразно вести путем измерений диэлектрической проницаемости ϵ и удельной проводимости σ . Однако, в отличие от [5, 6], где объектом исследования были гомогенные среды (водные растворы), здесь возникает необходимость выделения сигнала дисперсионной фазы (водной матрицы) гетерогенных объектов, к которым относятся водонасыщенные среды с переменной вязкостью. Техника измерений в этом случае рассмотрена ниже.

Типовые диэлектрические характеристики водонасыщенных сред с переменной вязкостью (на примере гидратационных вязких сред в процессе затвердения) представлены на рис. 1. Электродная поляризация (ЭП) повышает зна-

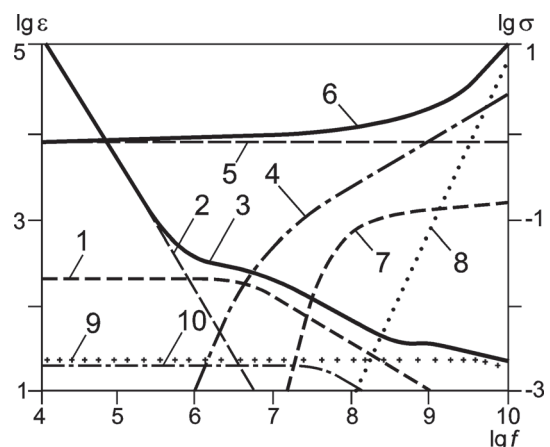


Рис. 1. Типовые диэлектрические характеристики водонасыщенных сред с переменной вязкостью:

3, 6 — $\epsilon(f)$, $\sigma(f)$, диэлектрическая проницаемость и удельная проводимость, соответственно; 1, 4 — $\epsilon_{\text{КВ}}$, $\sigma_{\text{КВ}}$, характеристики широкополосной коротковолновой релаксации (в области 1 МГц); 7, 10 — $\epsilon_{\text{УКВ}}$, $\sigma_{\text{УКВ}}$, узкополосной ультракотковолновой релаксации (около 100 МГц); 2, 5 — ЭП, СП, электродная поляризация и сквозная ионная проводимость; 8, 9 — $\sigma_{\text{СВЧ}}$, $\epsilon_{\text{СВЧ}}$, характеристики релаксации свободной воды (около 20 ГГц)

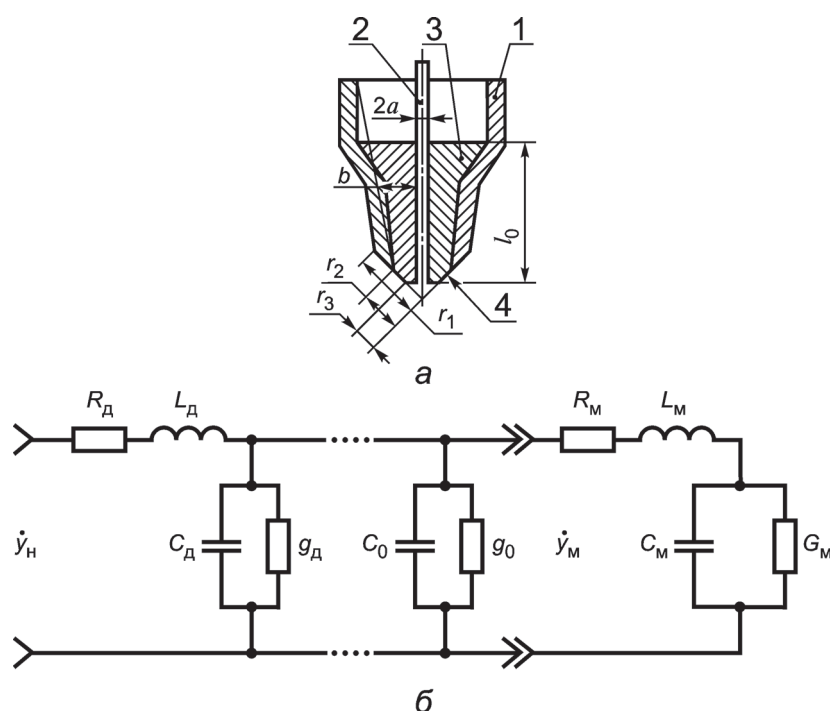


Рис. 2. Конструкция — (а) и эквивалентная схема — (б) ПИП для диэлектрических измерений водонасыщенных сред с переменной вязкостью

чения ε на частотах ниже 7 МГц со скоростью 30 дБ/дек, сквозная ионная проводимость (СП) задает базовый уровень σ , практически фиксированный в полосе частот 0—20 МГц. Из приведенных данных следует, что ЭП и СП инвариантны относительно процессов структурообразования водонасыщенных сред, а наиболее информативна коротковолновая область, в которой изменение диэлектрических спектров в процессах перестройки структуры происходит особенно интенсивно.

Методике интерпретации результатов диэлектрических измерений водонасыщенных сред с переменной вязкостью посвящены многочисленные исследования [3, 4, 7—10], однако приведенные в них данные зачастую существенно различаются, как правило, из-за некорректного выбора первичного измерительного преобразователя (ПИП).

Для непрерывного контроля диэлектрических характеристик неравновесных диссипативных сред следует использовать емкостные ПИП с распределенным в исследуемой системе электромагнитным полем так, чтобы зона контроля воспринималась как однородная [11]. С другой стороны, необходимо обеспечить возможность извлечения датчика из твердого контролируемого образца без разрушения. Первое требование удовлетворяется при условии погружения датчика в образец не менее, чем на глубину $h \approx 3...5d$, где d — расстояние между электродами в зоне контакта материал—датчик. Второе же обеспечивается применением накладных датчиков [3, 4, 12—15]. Однако затверждение образцов сопровождается их деформацией, трещинообразованием, даже выделением пузырьков газа, что при недостаточном эффективном объеме электромагнитного поля приводит к недопустимому увеличению шумов измерительного преобразования. Даже широкое распространение одноразовых погружных неизвлекаемых коаксиальных датчиков с плоской торцевой рабочей поверхностью не позволяет по-

высить точность измерений до уровня приемлемой воспроизводимости результатов [3, 4, 12—13].

Удовлетворить противоречивые требования к датчику позволяет использование коаксиального конического преобразователя (рис. 2, а) поскольку в этом случае глубина погружения ограничивается только длиной рабочей поверхности и толщиной образца. Система электродов 1, 2 такого ПИП состоит из корпусного 1 и центрального 2 электродов, разделенных диэлектрическим вкладышем 3. Цилиндрическая часть ПИП вводится в разъем измерительного блока С, Г. Рабочий зазор между электродами создает распределенное электромагнитное поле в объеме контролируемой среды. Корпусной электрод 1 в области рабочего зазора перекрывает центральный электрод 2, обеспечивая локализацию поля и экранирование от внешних электромагнитных воздействий. Коническая форма погружной части ПИП обеспечивает удаление всплывающих пузырьков газа и загрязнителей. Для снижения адгезии электроды 1, 2 изготовлены из нержавеющей стали и отполированы, а вкладыш 3 — из тефлона.

Исследуемая среда загружается в тефлоновую ювкету со сферической внутренней поверхностью, обеспечивающей возможность извлечения затвердевшего образца. При повышенном уровне внешнего электромагнитного поля ювкета помещается в

электростатический экран. Преобразователь (см. рис. 2, а) подключается к измерителю адмитанса, обеспечивающему двухканальное преобразование диэлектрической проницаемости ε_m материала в емкость C_m и удельной проводимости σ_m в проводимость G_m в параллельной схеме замещения.

Из рис. 2, а следует, что система электродов 1, 2 ПИП представляет протяженную конструкцию, а поле ее компонентов распределено в пространстве. Для определения эквивалентного адмитанса ПИП необходимо учесть распределенные параметры электродов и приведенные параметры поля, создаваемого в контролируемом объеме. Датчик с материалом может быть представлен эквивалентной схемой замещения (рис. 2, б), стационарная часть которой содержит распределенные продольные сопротивление R_d и индуктивность L_d , поперечные емкость C_d и проводимость g_d системы электродов 1, 2. Контролируемую среду моделируют соответствующие параметры приведения: R_m , L_m , C_m , G_m . Собственные параметры электродной системы и приведенные параметры контролируемой среды соединены каскадно.

Исключая область разъема, стационарную часть датчика можно рассматривать как коаксиальный конденсатор высотой h_0 , ограниченный по торцам магнитными стенками. Пренебрегая R_d и g_d ввиду малости, и используя известные методы оценки [16—18], получаем

$$L_d = [\mu_0 \mu l_0 / (2\pi)] \ln(b/a); C_d = 2\pi \varepsilon_0 \varepsilon_d l_0 / \ln(b/a),$$

где $\varepsilon_0 = 8,85 \cdot 10^{-12}$ Ф/м — электрическая постоянная; $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7}$ Гн/м — магнитная постоянная; μ — относительная магнитная проницаемость материала электродов 1, 2; ε_d — относительная диэлектрическая проницаемость вкладыша 3 между электродами 1, 2.

Рабочая емкость ПИП (см. рис. 2, а) образована в зазоре 4 торцевой поверхностью электродов 1, 2 с острыми угла-

ми ($\approx 30^\circ$) кромок на срезе. Из-за такой конфигурации при высокой диэлектрической проницаемости контролируемого вещества $\epsilon_m > \epsilon$ в зазоре взамен квазисферического поля формируется вытянутый в ортогональном к зазору направлении волновой пучок, и глубина проникновения в вещество возрастает [17]. Рассматривая теперь рабочую поверхность как планарный конденсатор с кольцевым зазором, находим его емкость

$$C_{03} = 0,5 \epsilon_0 \epsilon w K(k') / K(k), \quad k' = \sqrt{1 - k^2}, \quad k = s / r_1,$$

где $K(k)$ — полный эллиптический интеграл первого рода; k — модуль эллиптического интеграла; $s = r_2 - r_3$ — величина зазора; w — его длина.

В работе исследовали ПИП со следующими параметрами: $r_1 = 8$ мм, $r_2 = 5$ мм, $r_3 = 2,2$ мм, $w = 23$ мм. Поскольку для такого ПИП $k^2 < 0,5$, справедлива аппроксимация емкости зазора в воздухе:

$$C_{03} = (\epsilon_0 w / \pi) \ln[2(1 + (1 - k^2)^{0,25}) / (1 - (1 - k^2)^{0,25})],$$

откуда $C_{03} = 0,31$ пФ. В полупространстве вкладыша $C_0 = 0,5\epsilon C_{03}$. Поскольку здесь $\sigma \rightarrow 0$, находим, что погонные продольное сопротивление и поперечная проводимость самого датчика определяются только реактивными элементами $\dot{Z}_d = j\omega L_d$;

$\dot{Y}_d = j\omega(C_d + C_0)$. Таким образом, коэффициент распространения первого четырехполюсника $\gamma = \sqrt{\dot{Z}_d \dot{Y}_d}$, а характеристическое сопротивление $\dot{Z}_c = \dot{Y}_c^{-1} = \sqrt{\dot{Z}_d / \dot{Y}_d}$.

Приведенная изменяемая емкость ПИП $C_{и} = 0,5C_{03}$. Эквивалентная глубина поля в исследуемом материале $h \approx C_{и} s / [\epsilon_0 \pi(r_2 + r_3)] \approx 1,1$ мм. При таком объеме можно полагать, что $\dot{Z}_m = R_m + j\omega L_m$; $\dot{Y}_m = G_m + j\omega C_m$ — сосредоточенные параметры контролируемой среды, а модельная система (рис. 2, б) отображает комплексную нагрузку $\dot{Y}_n = \dot{Y}_m + (1 + \dot{Y}_m \dot{Z}_m)^{-1}$, подключаемую к измерительному прибору через четырехполюсник в виде отрезка длинной линии с параметрами $\gamma, \dot{Z}_c$.

Сопротивление R_m , определяется параметрами модифицированного слоя материала на поверхности электродов 1, 2 и зазором. Вследствие высокой коррозионной стойкости поверхности ПИП обеспечивается ее надежный контакт с образцом и минимизируется влияние на активную проводимость материала, поэтому можно принять $R_m \rightarrow 0$. Емкость $C_m = \epsilon_m C_{и}$, проводимость $G_m = \sigma_m C_{и} / \epsilon_0$. Если относительная магнитная проницаемость контролируемого материала $\mu_m \approx 1$, то распределенная индуктивность рабочего зазора $L_m < 1$ нГн [19], тогда в коротковолновом диапазоне $\dot{Z}_m \rightarrow 0$ и адмитанс нагрузки $\dot{Y}_n \approx \dot{Y}_m$.

Формулы приведения емкости C_m и проводимости G_m материала ко входу датчика определим через гиперболические A — коэффициенты четы-

рехполюсника (см. рис. 2, б) [16]. Поскольку в принятой модели коэффициент распространения γ мнимый, а характеристическое сопротивление Z_c — вещественное, то

$$A_{11} = \text{ch}(\gamma l_d) = A_{22} = 1; A_{12} = Z_c \text{sh}(\gamma l_d); A_{21} = Y_c \text{sh}(\gamma l_d) = \dot{Y}_d l_d;$$

где l_d — эквивалентная длина преобразователя, не контактирующая с веществом. Эквивалентная входная проводимость линии, нагруженной на ПИП

$$\dot{Y}_{\text{вх}} = (A_{21} + \dot{Y}_n A_{22}) / (A_{11} + \dot{Y}_n A_{12}) = (\dot{Y}_d l_d + \dot{Y}_n) / (1 + \dot{Y}_n \dot{Z}_d l_d) \approx \dot{Y}_n / (1 + \dot{Y}_n jM), \quad (1)$$

где M — параметр, имеющий размерность сопротивления.

Адмитанс измерительной цепи с подключенным датчиком, активная составляющая входной проводимости, измеренная емкость и тангенс угла диэлектрических потерь определяются выражениями

$$Y_{\text{вх}} = |\dot{Y}_{\text{вх}}|; G = \text{Re}(\dot{Y}_{\text{вх}}); C = \text{Im}(\dot{Y}_{\text{вх}}) / (2\pi f). \quad (2)$$

На рис. 3 приведены обзорные частотные характеристики приведенных к входному разъему модельных значений G и C , полученные для материала с параметрами $\sigma_m = 0,578$ См/м, $\epsilon_m = 80$, и, соответственно, $G_m = 0,01$ См и $C_m = 11,95$ пФ.

Протяженные центральный и корпусной электроды даже при использовании диамагнитных материалов и минимизации объема ПИП имеют значительную распределенную индуктивность L_d . В результате приведенные к входному разъему значения проводимостей и емкостей сильно искажены и не монотонны на частотах более 100 МГц, а емкость, кроме того, имеет систематический сдвиг. Подобные искажения возникают при любом конструктивном оформлении ПИП и должны исключаться при калибровке средств измерений. Сравнивая эти результаты с данными, приведенными на рис. 1, можно предположить, что некоторые участки абсорбционных и дисперсионных кривых обусловлены не только физическими свойствами контролируемых сред, но и некомпенсированной погрешностью использованных ПИП. Из рис. 3 следует, что в частотной области наиболее чувствительны к L_d приведенные ко входу значения проводимости (до 40 дБ/дек). Неравномерность функции $C(f)$ в исследо-

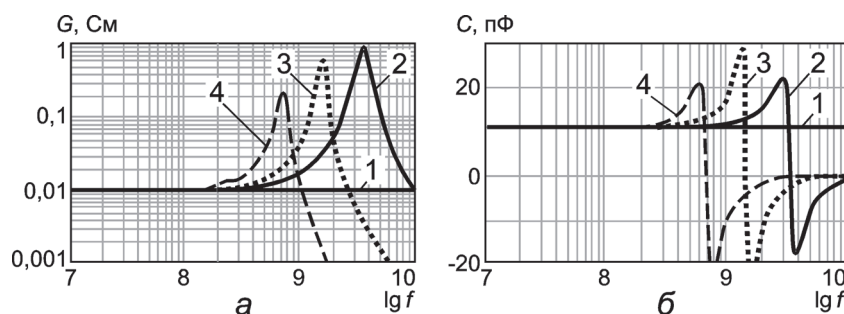


Рис. 3. Частотные характеристики проводимости (а) и емкости (б) контролируемой среды:

1 — моделируемые G_m и C_m ; 2, 3, 4 — приведенные ко входу значения при магнитной проницаемости материала ПИП $\mu = 1, 10, 50$, соответственно

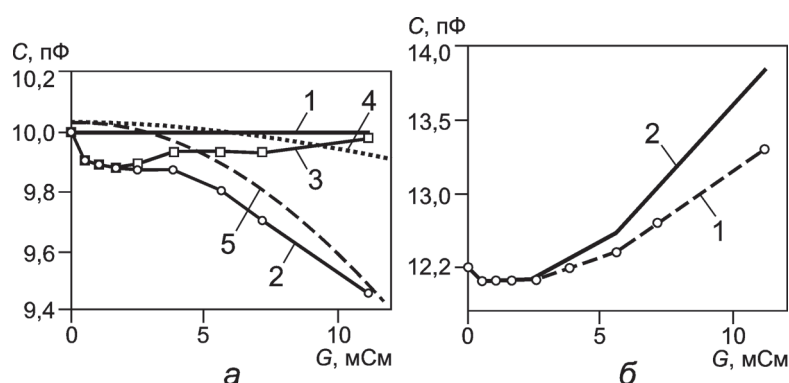


Рис. 4. Семейство характеристик $C(G)$:

а — 4, 5 — расчетные; 1, 2, 3 — экспериментальные с использованием двухполюсников; б — экспериментальные с применением водного раствора NaCl

ванной модели не превышает 3 дБ, однако на частотах $f > 10^8$ Гц возможно резкое снижение емкости, вплоть до смены знака.

В результате обеспечить независимое измерение обеих составляющих комплексной диэлектрической проницаемости в заданных условиях можно только в ограниченной полосе частот 10^5 — 10^8 Гц. При $f < 10^5$ Гц емкостная составляющая, т. е. сигнал диэлектрической проницаемости практически подавляется сигналом удельной проводимости [5], а при $f > 10^7$ Гц включаются гетерогенные релаксационные механизмы. Поэтому достоверно исследовать динамику диэлектрических характеристик водонасыщенных систем можно только в узкой полосе частот вблизи 10 МГц. Однако и в этом случае распределенные параметры ПИП вносят значительные погрешности.

На рис. 4, а изображены приведенные к разряду ПИП рассчитанные при $f = 10$ МГц, $r = 0,1$ Ом, $L_m = 10$ пГн, $\epsilon_m = 65,3$ значения емкости в функции проводимости материала $C(G)$. Кривые 4, 5 получены при $L_d = 58$ и 292 нГн, соответственно. Распределенная индуктивность датчика при увеличении проводимости контролируемой среды вызывает системное снижение наблюдаемого значения емкости, возрастающее при увеличении индуктивности.

Характеристики 1—3 получены при калибровке конического ПИП (см. рис. 2, а), изготовленного из нержавеющей стали с неизвестной магнитной проницаемостью. Использовались двухполюсники, содержащие образцовые конденсатор емкостью $C = 10,0$ пФ и резисторы с проводимостями $0,5$ — 11 мСм. Номинальная характеристика 1 должна быть инвариантна к проводимости. Отмеченное снижение наблюдаемого значения емкости с повышением проводимости (кривая 2) в основном соответствует характеристике 5, что подтверждает необходимость учета распределенных реактивностей датчика. В результате относительная погрешность калибровки составляет 1,8 %. Снизить эту погрешность можно, если по результатам калибровки определить корректирующий параметр M . Из (1) имеем

$$M = \text{Im} \left(\frac{\dot{Y}_H - \dot{Y}_{BX}}{\dot{Y}_{BX} \dot{Y}_H} \right), \quad (3)$$

следовательно, адмитанс измеряемого двухполюсника

$$\dot{Y}_x = \dot{Y}_{BX} / (1 - \dot{Y}_{BX} jM). \quad (4)$$

Из (4) с учетом (2) по формулам

$$G_x = \text{Re}(\dot{Y}_x); C_x = \text{Im}(\dot{Y}_x) / (2\pi f)$$

находим скорректированные значения емкости (кривая 3 на рис. 4, а). Погрешность калибровки при этом снижается до 0,7 %.

На рис. 4, б приведены результаты калибровки конического ПИП с использованием водного раствора NaCl. Для обеспечения сопоставимости результатов концентрацию раствора подбирали по проводимости. В конце выбранного диапазона проводимостей относительный рост наблюдаемых значений (кривая 1) составлял 6,2 %. Коррекция данных (кривая 2) приводит лишь к незначительному увеличению емкости и, следовательно, диэлектрической проницаемости ϵ до 10,2 %, хотя некоторые авторы отмечают возрастание ϵ более чем на 100 % [20].

Таким образом, при проведении диэлектрических измерений водонасыщенных сред в КВ диапазоне любую конструкцию ПИП следует рассматривать как протяженную и рассчитывать ее функции измерительного преобразования на основе теории длинных линий. Для обеспечения многократного применения и минимизации влияния конструктивных факторов на результаты измерений целесообразно использовать конический коррозионно-стойкий ПИП. Предложенная методика расчета его функции измерительного преобразования на основе учета распределенных параметров позволяет повысить точность измерений нестационарных диссипативных диэлектрических сред и проводить корректные исследования закономерностей структурообразования водонасыщенных систем.

Литература

1. Дворкин Л.И., Дворкин О. Л. Основы бетоноведения. СПб: Строй Бетон, 2006.
2. Дворкин Л.И., Дворкин О. Л. Специальные бетоны. М.: Инфра-Инженерия, 2012.
3. Beek van A. Dielectric properties of young concrete Non-destructive dielectric sensor for monitoring the strength development of young concrete. Ph.D. thesis, Delft University, 2000.
4. Hager N. E. III, Domszy R. C. Monitoring of cement hydration by broadband time-domain-reflectometry dielectric spectroscopy. // J. Appl. Phys. 2004. V. 96. N. 9. P. 5117—5129.
5. Подкин Ю. Г., Розенталь О. М. Диэлектрические измерения водных растворов электролитов // Измерительная техника. 2013. № 12. С. 57—62; Podkin Yu. G., Rozental O. M. Dielectric Measurements of Aqueous Solutions of Electrolytes // Measurement Techniques. 2014. V. 56. N. 12. P. 1439—1447.
6. Розенталь О. М., Подкин Ю. Г. Методы и средства диэлектрических измерений водных растворов электролитов // Измерительная техника. 2014. № 1. С. 67—70; Podkin Yu. G. Methods and Means of Dielectric Measurements of Aqueous Solutions of Electrolytes // Measurement Techniques. 2014. V. 57. N. 1. P. 103—108.
7. Olson R. A. e. a. Interpretation of the impedance spectroscopy of cement paste via computer modeling III: Microstructural analysis of frozen cement paste Journal of Materials Science // 1995. V. 30. P. 5078—5086.
8. Clark P. E., Shaughnessy III R. J. Rheological Evaluation of Dense Suspensions: Simulation of a Fresh Cement Paste // SPE Production Engineering. 1990. V. 5. N. 2. P. 180—186.

9. **Asano M. e. a.** Dielectric Relaxation Spectroscopy to Investigate Structured Water in Mortar // BB 85-CD Intern. Symp. Non-Destructive Testing in Civil Engineering (NDT-CE), Berlin, 2003. [Электрон. ресурс]. <http://www.dgzfp.de/> (дата обращения 06.06.2014).

10. **Voigt T., Shah S. P.** Nondestructive Monitoring of Setting and Hardening of Portland Cement Mortar with Sonic Methods // BB 85-CD Intern. Symp. Non-Destructive Testing in Civil Engineering (NDT-CE), Berlin, 2003. [Электрон. ресурс]. <http://www.dgzfp.de/> (дата обращения 06.06.2014 г.).

11. **Мишков М. Ю., Подкин Ю. Г.** Особенности проектирования емкостных первичных измерительных преобразователей диссипативных жидких сред 1. Анализ принципиальных особенностей // Датчики и системы. 2013. № 8. С. 21—26.

12. **Hager N. E. III.** Broadband time-domain-reflectometry dielectric spectroscopy using variable-time-scale sampling // Rev. Sci. Instrum. 1994. V. 65. N. 4. P. 887—891.

13. **Skierucha W., Andrzej Wilczek A.** A FDR Sensor for Measuring Complex Soil Dielectric Permittivity in the 10-500 MHz Frequency Range // Sensors. 2010. № 10. P. 3314—3329.

14. **Иванов В. К. и др.** Определение комплексной диэлектрической проницаемости жидкостей коаксиальными зондами с использованием подложек из метаматериала // Радиопизика и электроника. 2011. Т. 16. № 1. С. 92—99.

15. **Bobowski J. S. Johnson T.** Permittivity measurements of biological samples by an open-ended coaxial line // Progress In Electromagnetics Research. 2012. V. 40, P. 159—183.

16. **Корис Р., Шмидт-Вальтер Х.** Справочник инженера схемотехника. М: Техносфера, 2006.

17. **Иванченко И. В., Попенко Н. А.** Исследование распределений электромагнитных полей как метод исследования характеристик электродинамических структур // Физические основы приборостроения. 2013. Т. 2. № 1. С. 18—33.

18. **Вендик О. Г., Зубко С. П., Никольский М. А.** Моделирование и расчет емкости планарного конденсатора, содержащего тонкий слой сегнетоэлектрика // Журнал технической физики. 1999. Т. 69. Вып. 4. С. 1—7.

19. **Сапогин В. Г. и др.** Погонная индуктивность цилиндрических проводников с аксиальной плотностью тока в сложных функциональных блоках // Инженерный вестник Дона. 2012. № 4. Ч. 1. [Электрон. ресурс]. <http://www.ivdon.ru/magazine/archive/n4t1y2012/1264> (дата обращения 6.06.2014 г.).

20. **Вичкань А. В., Мельяновский П. А.** Высокочастотная комплексная диэлектрическая проницаемость водных растворов солей // Microwave & Telecom. Technol.: Proc. 12th Int. Crimean Conf. (CriMiCo'2002). P. 542—543.

Дата принятия 22.05.2014 г.

621.3.084.2

Исследование динамических свойств широкодиапазонных пьезосорбционных датчиков влажности органических жидкостей

Ю. А. ЛИПНИН, В. Г. МАЗУР, А. Д. ПУДАЛОВ

Ангарская государственная техническая академия, Ангарск, Россия,
e-mail: puddim@rambler.ru

Предложена конструкция широкодиапазонного пьезосорбционного датчика влажности органических жидкостей, основанная на использовании двух сорбентов на одной кварцевой пластине. Определен наиболее эффективный способ нанесения сорбентов, исходя из анализа динамических характеристик чувствительных элементов.

Ключевые слова: влажность, сорбционно-частотный метод, широкодиапазонный пьезосорбционный чувствительный элемент, сорбент, динамические характеристики.

A design of wide-range piezo-sorption sensor of organic liquids humidity based on the use of two sorbents on one quartz plate is suggested. The most effective way of sorbents coating on the plate based on analysis of the dynamic characteristics of the sensors — is determined.

Key words: humidity, sorption-frequency method, wide-range piezo-sorption sensor, sorbent, dynamic characteristics.

В автоматических системах управления технологически процессами значительная часть измерений приходится на аналитические, среди которых особую роль играет контроль влажности веществ [1]. В ряде случаев для газовых и жидких сред необходим одновременный контроль влаги как в низком, так и высоком диапазонах ее концентрации. В настоящее время отсутствуют приборы, охватывающие весь диапазон измерений влажности, включая низкие, средние и макроконцентрации, что приводит к затруднениям на про-

изводстве. Разработка такого устройства позволит существенно уменьшить номенклатуру измерителей влажности, и решить многие задачи с помощью лишь одного широкодиапазонного прибора. Кроме того, он может стать базой для унификации и разработки ряда модификаций измерителей влажности, в результате чего уменьшатся затраты на разработку и производство влагомеров и гигрометров [2, 3].

Принцип действия ряда чувствительных элементов датчиков основан на явлении сорбции влаги из анализируемой