

АНАЛИЗ ВИБРАЦИОННЫХ ИЗМЕРИТЕЛЕЙ ПЛОТНОСТИ ДЛЯ КОНТРОЛЯ МОРСКОЙ ВОДЫ

Н.А. Греков, А.М. Сербин

Морской гидрофизический институт
НАН Украины
г. Севастополь, ул. Капитанская, 2
E-mail: oaotmhi@inbox.ru

В работе рассмотрены низкочастотные и высокочастотные вибрационные методы и средства, пригодные для измерения плотности природных вод. Предложена структурно-функциональная схема прибора для измерения плотности жидкости высокочастотным методом.

Введение. Дальнейшая работа в области создания вибрационных плотномеров для прямых измерений плотности вод *in situ* [1] ставит задачу провести сравнительный анализ методов и средств измерения плотности высокочастотными и низкочастотными методами. Четкой границы между низкочастотными и высокочастотными приборами еще не сформировалось. Некоторые авторы называют высокочастотными плотномеры работающие на частотах около 1 кГц [2], однако эта классификация требует дальнейшего уточнения.

Сделаем краткий анализ характеристик вибрационных плотномеров, низкочастотных. Многие фирмы выпускают низкочастотные плотномеры с трубчатыми резонаторами в которых исследуемая жидкость заливается внутрь трубы, а сам резонатор находится в воздухе. Такие приборы имеют высокие метрологические характеристики, особенно в лабораторных условиях.

Например, лабораторный вибрационный плотномер имеет точность, достигающую $0,5 \cdot 10^{-5}$ г/см 3 , что вполне устраивает исследователей при оксанографических работах [3].

Для полевых условий так же создан миниатюрный плотномер с кремниевой трубкой, в котором осуществляется одновременно контроль температуры с погрешностью 0,01 градуса и плотности с погрешностью 0,009 % (ISSYS

temperature controlled Micro Density Meter) [4].

Так же производители приборов выпускают плотномеры с погружными резонаторами, которые имеют различные конфигурации. Погруженные в жидкость резонаторы при воздействии на них внешних колебаний, которые создаются специальными генераторами, реагируют не только на плотность жидкости, но и на её вязкость. Плотность жидкости в погружных приборах вычисляют по частоте, а вязкость по добротности.

При прецизионных измерениях разделять сигналы от вязкости и плотности в погружных приборах практически невозможно.

Однако по конструктивным особенностям погружные резонаторы легко адаптировать в современные гидрофизические зонды. Из проспектов фирм можно заключить что уже на данный момент эти преобразователи конструктивно выполнены так, что выдерживают давление до 270 бар (Solartron Type 7826 densitometer) [5].

О высокочастотных измерителях плотности, работающих в жидких средах, только за последние два десятилетия появились публикации. Многие исследователи изучали данную проблему и получили эмпирическое уравнение, описывающее поведение высокочастотных пьезокристаллов в жидкости. Оказалось, что на частоту колебаний пьезокварца влияет много факторов, таких как плотность и жесткость материала кварца, а также плотность и вязкость жидкости. Формула, связывающая все эти параметры приведена в работе [6]

$$\Delta f_s = -f_0^{3/2} \sqrt{\frac{\rho_{liq} \eta_{liq}}{\pi \rho_q c_q}}, \quad (1)$$

где Δf_s – изменение резонансной частоты кварца; ρ_{liq} и η_{liq} – плотность и вязкость жидкости соответственно; c_q – модуль упругости кварца; ρ_q – плотность кварца; f_0 – частота механического резонанса кварцевой пластины. Эта формула, как показано в работе [7], справедлива для множества различных жидкостей и пьезокварцевых резонаторов.

Есть еще одна проблема для области высоких частот – это шероховатость поверхности пьезокварца, которая может изменить резонансную частоту кварца, работающего в контакте с жидкостью на несколько килогерц [8]. Поэтому, с одной стороны, для повышения чувствительности пьезодатчиков необходимо увеличить частоту, с другой стороны, для уменьшения влияния шероховатости необходимо эту частоту уменьшить.

При погружении кварцевого резонатора в жидкость, плотность которой необходимо определить, падение добротности может достигать двух порядков, а динамическое сопротивление возрастает в 10 раз [9]. Многие исследователи для возбуждения пьезокварцевых резонаторов в условиях демпфирующего воздействия жидкости разработали различные модификации автогенераторов, которые обеспечивают их устойчивую работу в необходимом диапазоне изменения эквивалентного сопротивления кварца. Исследованию характеристик таких автогенераторов и их устойчивости в условиях демпфирующего воздействия жидкости посвящена работа [10]. Однако все эти методы имеют общий недостаток, связанный с замкнутой следящей системой, позволяющей поддерживать колебания пьезокварцевого резонатора в условиях демпфирующего воздействия жидкости. При этом изменение электрических параметров генераторов вносит значительную погрешность в результаты измерений. Из всех описанных методов заслуживает внимания метод, разработанный и запатентованный японскими исследователями [11]. Суть его заключается в следующем: пьезокварцевый резонатор включают в цепь автогенератора, который включается и отключается в определенные промежутки времени. Этот метод называется методом затухания. При подаче частоты возбуждения на пьезокварц, сигнал с кварца отключается и с помощью специального переключателя кварц закорачивается, токовый сигнал с кварца через разделительный трансформатор передается на регистратор, где и производят обработку сигнала.

Однако эта схема имеет недостаток, который заключается в том, что электрические параметры элементов токового разделительного трансформатора оказывают влияние на пьезокварц. О характеристиках импульсного сигнала, подаваемого на пьезокварц в литературе ничего не сказано, однако можно предположить, что на пьезокварц подается электрический импульс со стабильной (предельно допустимой для пьезокварца) амплитудой и длительностью меньше четверти минимально возможного периода автоколебаний пьезокварца.

Для исключения влияния разделительного трансформатора предлагается акустическая связь между выходным сигналом кварцевого резонатора и блоком приема и обработки информации.

На рис. 1 приведена структурно-функциональная схема высокочастотного плотномера. Работает схема следующим образом: кварцевый резонатор QC заземленной стороной погружен в измеряемую жидкость. Импульсный сигнал с генератора импульсов, который управляет контроллером через открытый ключ 1, подается на резонатор. После окончания действия импульса ключ 1 закрывается и открывается ключ 2. На резонаторе QC образуются затухающие колебания, которые через жидкость, в виде акустического сигнала, попадают на широкополосную пьезокерамику PzC. После преобразования в PzC, электрический сигнал попадает на усилитель A1, где происходит его усиление и далее на аналого-цифровой преобразователь (АЦП) и временно-цифровой преобразователь (ВЦП), которые управляются контроллером. Преобразованные в соответствующие коды, сигналы с АЦП и ВЦП попадают на контроллер, где происходит преобразование сигналов в код RS232, а далее по линии информации о времени и амплитуде попадает на ПВМ. Затем цикл измерения снова повторяется.

Достоинство данной схемы измерения состоит в том, что на кварц QC не действуют входные цепи приемного устройства.

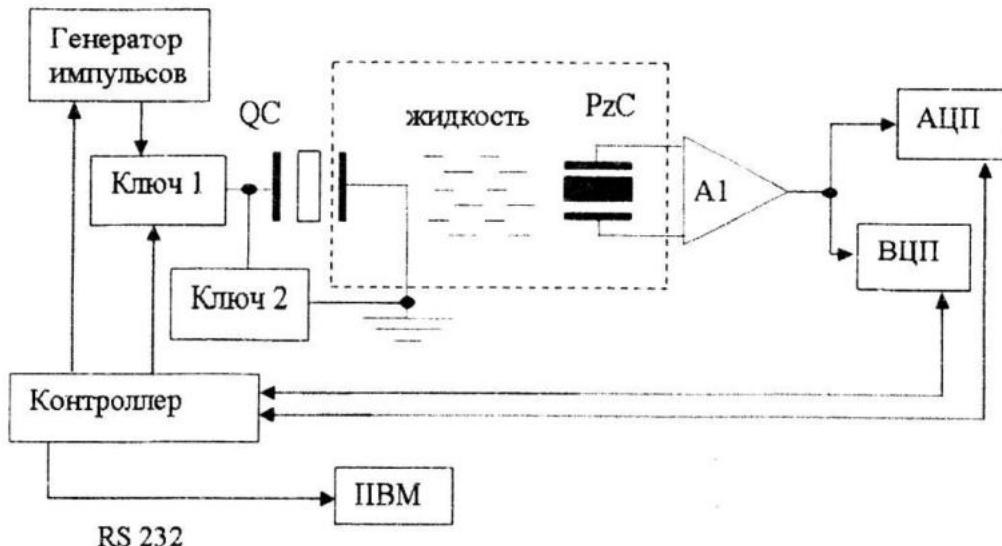


Рис. 1. Структурно-функциональная схема высокочастотного плотномера использующего метод затухания

Расчеты показывают, что при частоте колебаний 1 МГц необходимо измерить период этих колебаний с чувствительностью несколько пикосекунд. В настоящее время такие измерители уже созданы на базе известных ВЧП преобразователей GP2 и успешно применяются в МГИ НАНУ в измерителях скорости течений. В качестве АЦП можно использовать сигнальный процессор (из семейства MSP430).

Выводы. 1. Для измерения плотности жидкости *in situ* можно использовать низкочастотные плотномеры погружного и проточного типов и адаптировать их к созданным гидрофизическим приборам.

2. Для проведения измерений плотности высокочастотными методами необходимо провести дополнительные исследования предлагаемого в статье способа.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Греков А.Н. Греков Н.А. Возможности прямых измерений плотности вод *in situ* // Системы контроля окружающей среды. -- Севастополь: МГИ НАН Украины. – 2009. – С. 61 – 64.
2. Тараненко Ю.К., Петренко А.Н. Методика расчета высокочастотных плотномеров с их инвариантностью к колебаниям температуры и давления контролируемой среды // Методи та прилади контролю якості. № 20, 2008. – С. 41 – 46.
3. Mettler Toledo <http://www.mt.com>
4. <http://www.mems-issys.com>
5. <http://www.solartron.ru/density/>
6. Kanazawa K.K., Gordon J.G. The oscillation frequency of a quartz resonator in contact with a liquid // Anal. Chim. Acta 175, 1985. – P. 99 – 105.
7. Yoshimoto M., Kurosawa S. Effect of immersion angle of a one face sealed QCM in Liquid // Anal. Chem. 74, 2002. – 4306 p.
8. Daikhin L. Influence of Roughness on the admittance of the QCM immersed in Liquids // Anal. Chem. 74, 2002. – 554 p.
9. Lucklum R., Hauptmann P. The quartz crystal microbalance: mass sensitivity, viscoelasticity and acoustic amplification // Sensors and Actuators B 70, 2000. – P. 30 – 36.
10. Bruschi L., Delfitto G., Mistura G. Inexpensive but accurate driving circuits for quartz crystal microbalances // Review of scientific instruments V.70, N.1, 1999. – P. 987 – 992.
11. Antonio Arnao Vives Piezoelectric Transducers and Applications // Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2008 – 532 p.