

УДК 681.586.621.37:543.275.1

## Радиоволновый резонаторный метод измерения физических свойств жидкостей с диэлектрическими потерями

А.М. Ершов<sup>1</sup>, А.А. Маслов<sup>2</sup>, А.С. Совлуков<sup>2,3</sup>, В.Я. Фатеев<sup>3</sup>,  
В.В. Яценко<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Технологический факультет МГТУ, кафедра технологии пищевых производств

<sup>2</sup> Политехнический факультет МГТУ, кафедра автоматики и вычислительной техники

<sup>3</sup> Институт проблем управления им. В.А. Трапезникова РАН, Москва

**Аннотация.** Рассматривается метод измерения физических свойств жидкости с диэлектрическими потерями, основанный на определении добротности радиоволновых резонаторов, являющихся датчиками физических свойств. Особенности данного метода измерений заключаются в возбуждении в резонаторе частотно-модулированных электромагнитных колебаний, измерении максимального и минимального значений их амплитуды и суждении о физических параметрах жидкости по отношению данных амплитуд.

**Abstract.** The method of measurement of physical properties of liquids with dielectric losses has been considered. It is based on quality determination of radiofrequency/microwave resonators being sensors of physical properties. The features of this method are excitation of frequency-modulated electromagnetic oscillation in a resonator, measurement of maximal and minimal values of their amplitudes and determination of a physical property through ratio between these amplitudes.

### 1. Введение

В различных отраслях промышленности большое значение имеет высокоточное определение различных физических свойств (концентрации смеси веществ, влагосодержания, плотности и др.) жидкостей, находящихся в емкостях (технологических резервуарах, измерительных ячейках и т.п.). Это, в частности, имеет место в пищевой промышленности, где необходимо производить технологические измерения концентрации копильных препаратов, водо-спиртовых растворов и др.

Для определения физических свойств жидкостей находят применение методы измерений на основе радиоволновых высокочастотных (ВЧ) и сверхвысокочастотных (СВЧ) резонаторов, содержащих контролируемую жидкость (Брандт, 1963; Викторов и др., 1989). Эти методы основаны на измерении электрофизических параметров (диэлектрической проницаемости или/и тангенса угла диэлектрических потерь) жидкостей. Их недостатком является ограниченная область применения, обусловленная возможностью контроля жидкостей, являющихся достаточно хорошими диэлектриками. Для диэлектрических жидкостей с большими диэлектрическими потерями добротность резонаторов может быть малой величиной и, соответственно, амплитуда информативных сигналов мала для надежной регистрации.

В то же время имеется возможность определять физические свойства жидкости путем измерения функционально с ними связанной добротности резонаторов. В зависимости от конструкции резонатора и характера размещения жидкости в его электромагнитном поле имеет место соответствующая функциональная связь добротности  $Q$  с электрофизическими параметрами контролируемой жидкости – тангенсом угла диэлектрических потерь  $\operatorname{tg} \delta$ , электропроводностью  $\sigma$  (Брандт, 1963). Наличием диэлектрических потерь характеризуются многие жидкости, в частности, пищевые продукты (Рогов и др., 1981).

Так, если контролируемая жидкость, имеющая диэлектрические потери, заполняет полностью полость объемного резонатора или пространство между проводниками резонатора на основе отрезка длинной линии, то справедлива следующая формула:

$$\operatorname{tg} \delta = 1/Q - 1/Q_0, \quad (1)$$

где  $Q_0$  и  $Q$  – добротность пустого и полностью заполненного контролируемой жидкостью резонатора, соответственно.

Если жидкость имеет достаточно большие диэлектрические потери (электропроводность), то  $Q \ll Q_0$  и, следовательно,

$$\operatorname{tg} \delta \approx 1/Q. \quad (2)$$

В свою очередь, электрофизические параметры жидкости ( $\operatorname{tg} \delta, \sigma$ ) зависят функционально от тех или иных, подлежащих измерению, физических свойств жидкости (концентрации, плотности и др.). В частности, это имеет место в случае измерения концентрации различных водосодержащих растворов (Доброхотов, 1965).

## 2. Сущность метода измерения физических свойств жидкости

Рассмотрим метод измерения физических свойств жидкости, заключающийся в измерении добротности радиоволновых (ВЧ и СВЧ) резонаторов. Для измерения добротности радиоволновых резонаторов известен ряд методов (Двинских, Науменко, 1975; Pandrangi et al., 1982; Gevorgian et al., 1997; Kajfez, 1999). Так, согласно методу измерений (Константинов, 1989), электромагнитные колебания, модулированные по частоте пилообразным низкочастотным сигналом, возбуждают в СВЧ-резонаторе, измеряют резонансную частоту и ширину резонансной кривой на уровне половинной мощности; при этом данный уровень определяют по положению вершины резонансной кривой при подаче на вход резонатора СВЧ-сигнала, модулированного по частоте пилообразным низкочастотным сигналом и низкочастотным гармоническим сигналом с индексом модуляции, соответствующим уменьшению мощности резонансного отклика в два раза. Недостатком этого метода является сложность его реализации, обусловленная необходимостью выполнения совокупности следующих операций: измерения индекса модуляции; установки индекса модуляции, равного 1.126; визуальной фиксации уровня половинной мощности по экрану индикатора и последующего отключения генератора синусоидального напряжения; визуального измерения ширины резонансного импульса на уровне половинной мощности и визуальной фиксации резонансной частоты по экрану индикатора. Все эти операции выполняются вручную, и поэтому реализация автоматического устройства на основе данного метода представляет существенные трудности. Кроме того, измерение по экрану индикатора ширины резонансного импульса и фиксации резонансной частоты имеют существенную погрешность, которая присуща любым осциллоскопическим измерениям.

Рассматриваемый здесь метод измерения характеризуется, по сравнению с методом, описанным в (Kajfez, 1999), повышенной точностью измерений и упрощенной реализацией. Отличие данного метода состоит в суждении о физических параметрах жидкости по отношению максимального и минимального значений амплитуды частотно-модулированных колебаний. Это обуславливает возможность проведения измерений только максимального и минимального значений амплитуды колебаний.

Рассмотрим сущность предлагаемого метода измерений, поясняемого схемой реализующего его устройства (рис. 1). После прохождения частотно-модулированного (ЧМ) сигнала через резонатор 2 этот сигнал оказывается дополнительно промодулирован по амплитуде в соответствии с известным выражением, которое описывает амплитуду  $U_{\text{вых}}$  напряжения на выходе резонатора 2 при подаче на его вход ЧМ сигнала с амплитудой  $U_{\text{вх}}$ , частотой модуляции  $f_M$  и девиацией частоты  $\Delta f$ :

$$U_{\text{вых}}(t) = \frac{KQU_{\text{вх}}}{\sqrt{1 + \left( 2 \frac{\Delta f Q}{f_0} \cos 2\pi f_M t \right)^2}}, \quad (3)$$

где  $K$  – коэффициент передачи резонатора при резонансе;  $Q$  – добротность резонатора;  $f_0$  – резонансная частота;  $t$  – время.

При  $f_M t = (n+1)/4$ , где  $n = 0, 1, 2, \dots$ ,  $U_{\text{вых}}(t)$  принимает максимальное значение  $U_{\text{max}}$ :

$$U_{\text{max}} = K \cdot Q \cdot U_{\text{вх}}, \quad (4)$$

а при  $f_M t = n/2$ , где  $n = 0, 1, 2, \dots$ ,  $U_{\text{вых}}(t)$  принимает минимальное значение  $U_{\text{min}}$ :

$$U_{\text{min}} = \frac{KQU_{\text{вх}}}{\sqrt{1 + \left( 2 \frac{\Delta f Q}{f_0} \right)^2}}. \quad (5)$$

Взяв отношение  $U_{\text{max}}/U_{\text{min}}$  и используя (2) и (3), можно вывести формулу для определения  $Q$ :

$$Q = \frac{f_0}{2\Delta f} \sqrt{\left(\frac{U_{\max}}{U_{\min}}\right)^2 - 1}. \quad (6)$$

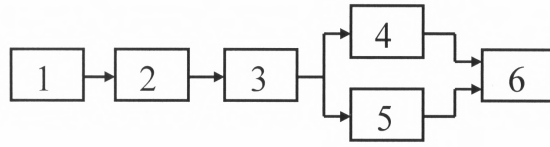


Рис. 1. Схема устройства для измерения физических свойств жидкости.

- |                             |   |
|-----------------------------|---|
| 1 – генератор ЧМ-колебаний; | 4 – измеритель максимального значения напряжения; |
| 2 – резонатор;              | 5 – измеритель минимального значения напряжения;  |
| 3 – амплитудный детектор;   | 6 – вычислительное устройство.                    |

Таким образом, при известных значениях  $f_0$  и  $\Delta f$ , измеряя только напряжения  $U_{\max}$  и  $U_{\min}$ , можно определить добротность  $Q$  и связанные с ней функционально физические свойства жидкости. При реализации предлагаемого способа следует иметь в виду, что формулой (6) можно пользоваться только в случае применения детектора с линейной характеристикой. Для детектора с квадратичной характеристикой справедлива формула

$$Q = \frac{f_0}{2\Delta f} \sqrt{\frac{U_{\max}}{U_{\min}} - 1}. \quad (7)$$

Резонатор 2 может представлять собой объемный СВЧ-резонатор, ВЧ-резонатор в виде отрезка длинной линии и др. Контролируемая жидкость находится в электромагнитном поле резонатора, заполняя полость объемного СВЧ-резонатора, пространство между проводниками отрезка длинной линии, пространство между обкладками конденсатора, являющегося оконечной нагрузкой длинной линии, и др.

### 3. Функциональная схема устройства для реализации метода измерений

Работа схемы устройства на рис. 1 поясняется графиками на рис. 2. Здесь генератор 1 вырабатывает ЧМ сигнал с девиацией  $\Delta f$  и настраивается на резонансную частоту  $f_0$  (рис. 2а). Этот ЧМ сигнал подается на резонатор 2 и возбуждает в нем колебания, которые в соответствии с (1) оказываются промодулированными еще и по амплитуде (рис. 2б). С помощью детектора 3 выделяется низкочастотная составляющая этих колебаний, в амплитуде которых содержится информация о добротности резонатора (рис. 2в). С помощью устройств для измерения максимального 4 и минимального 5 значений напряжения определяют, соответственно, максимальную  $U_{\max}$  и минимальную  $U_{\min}$  амплитуду этих колебаний. В качестве таких устройств могут быть использованы компенсационные вольтметры (Доброхотов, 1965). Данные этих измерений поступают в вычислительное устройство 6, в котором производится вычисление добротности  $Q$  в соответствии с формулой (6) или формулой (7).

Поскольку измерения всех входящих в формулы (6) или (7) величин могут быть осуществлены с высокой точностью с помощью соответствующих цифровых устройств, то погрешность измерения физических свойств жидкости предлагаемым методом определяется, главным образом, только неидеальностью характеристики амплитудного детектора, вид которой влияет на величину показателя степени в подкоренном выражении формулы (6). Уменьшить влияние этого фактора можно путем выбора оптимального режима работы детектора, либо, вообще, исключением этого детектора из схемы при работе на частотах до 1 ГГц, так как современная цифровая техника позволяет производить амплитудные измерения на таких частотах.

На рис. 3 показаны графики зависимости  $U(f)$  для резонатора, соответственно, в отсутствие в его электромагнитном поле контролируемой жидкости (этому случаю соответствуют резонансная частота  $f_1$  и добротность  $Q_1$  резонатора) и при размещении в нем контролируемой жидкости. Эта жидкость является несовершенным диэлектриком, в частности, водосодержащим раствором (этому случаю соответствуют резонансная частота  $f_2$  и добротность  $Q_2$  резонатора).

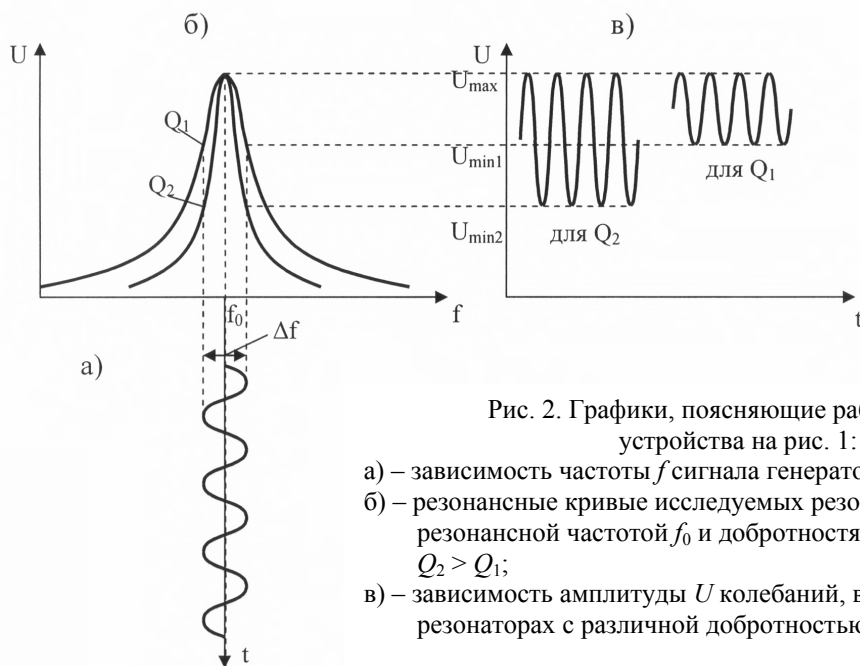


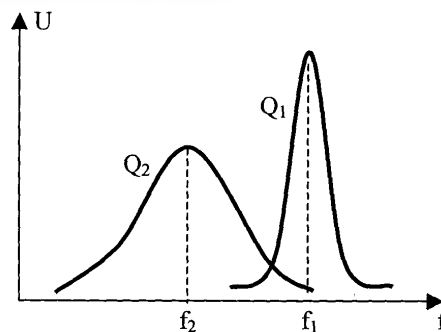
Рис. 2. Графики, поясняющие работу схемы устройства на рис. 1:

- а) – зависимость частоты  $f$  сигнала генератора 1 от времени  $t$ ;
- б) – резонансные кривые исследуемых резонаторов с резонансной частотой  $f_0$  и добротностями  $Q_1$  и  $Q_2$ , причем  $Q_2 > Q_1$ ;
- в) – зависимость амплитуды  $U$  колебаний, возбуждаемых в резонаторах с различной добротностью, от времени  $t$ .

Рис. 3. Графики зависимости  $U(f)$  для резонатора, соответственно:

в отсутствие в его электромагнитном поле контролируемой жидкости (этому случаю соответствуют резонансная частота  $f_1$  и добротность  $Q_1$  резонатора)

и при размещении в нем контролируемой жидкости (при этом резонансная частота  $f_2$  и добротность  $Q_2$ ).



#### 4. Заключение

Преимуществом рассматриваемого метода является также его достаточно простая реализация, обеспечивающая автоматическое измерение как непосредственно добротности резонатора, так и физических свойств жидкости. В реализуемых на основе данного метода устройствах не требуется проведение таких операций, как переключение режимов работы генератора, последовательная фиксация определенных уровней резонансной кривой и измерение частот, соответствующих этим уровням.

#### Литература

**Gevorgian S., Kollberg E., Carlson E.** Evaluation of the unloaded Q-factor of a resonator from impedance measurements. *Proc. of the 27<sup>th</sup> European Microwave Conference*, v.2, p.886-890, 1997.

**Kajfez D.** Q-factor measurement techniques. *RF Design*, N 8, p.56-66, 1999.

**Pandurangi R.K., Stuchly S.S., Barski M.** A digital system for measurement of resonant frequency and Q-factor. *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, v.ИМ-31, N 1, p.18-21, 1982.

**Брандт А.А.** Исследование диэлектриков на сверхвысоких частотах. М., Физматгиз, с.37-144, 1963.

**Викторов В.А., Лункин Б.В., Совлуков А.С.** Радиоволновые измерения параметров технологических процессов. М., Наука, с.168-177, 1989.

**Двинских В.А., Науменко Ю.П.** Измерение динамических параметров СВЧ резонаторов автогенераторным методом. Саратов, изд-во Саратовского ун-та, 112 с., 1975.

**Доброхотов Б.А.** Измерения в электронике. М.-Л., Энергия, т.1, с.33, 1965.

**Константинов В.И.** Способ измерения добротности СВЧ-резонаторов. *Авт. свид. СССР № 1493958.* Булл. изобрет., № 26, 1989.

**Рогов И.А., Адаменко В.Я., Некрутман С.В.** Электрофизические, оптические и акустические характеристики пищевых продуктов. *Справочник. Под ред. Рогова И.А.* М., Легкая промышленность, 288 с., 1981.