

УДК 681.586.621.37:543.275.1

## Резонаторный метод измерения физических свойств жидкостей с применением полосковых линий

А.С. Совлуков<sup>1,2</sup>, А.А. Маслов<sup>1</sup>, В.В. Яценко<sup>1</sup>, А.Р. Власова<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Политехнический факультет МГТУ, кафедра автоматики и вычислительной техники

<sup>2</sup> Институт проблем управления им. В.А. Трапезникова РАН, Москва

**Аннотация.** Предлагается резонаторный метод измерения физических свойств жидкостей, основанный на применении модифицированных полосковых линий в качестве датчиков. Отрезок несимметричной полосковой линии рассматривается в качестве резонаторного датчика. Приводятся структурные схемы измерительных устройств с такими датчиками.

**Abstract.** The resonator method for measurement of physical properties of liquids has been proposed. The method implies application of modified striplines as sensors. According to the method a section of a non-symmetric stripline is considered as a resonator sensor. Structural schemes of measuring devices containing these sensors have been presented.

**Ключевые слова:** измерение, жидкость, физическое свойство, резонатор, полосковая линия  
**Key words:** measurement, liquid, physical property, resonator, stripline

### 1. Введение

Важными параметрами, подлежащими высокоточному определению во многих отраслях промышленности, являются различные физические свойства жидкостей (плотность, влагосодержание и др.). В частности, требуется высокоточное определение концентрации влагосодержащих смесей (растворов). К их числу можно отнести, в частности, копильные жидкости, в которых переменной является степень содержания одного из компонент, например, карбонильных соединений, при фиксированных значениях других компонент (фенолов, кислот и др.). С учетом существенного различия электрофизических характеристик веществ, образующих технологическую смесь, целесообразно осуществлять синтез концентратомеров на базе радиоволновых методов, обладающих известными преимуществами по сравнению с другими электрическими методами (Викторов и др., 1978; 1989). Наряду с синтезом датчиков на основе отрезков длинной линии (Ершов и др., 2007; Совлуков, Фатеев, 2007) представляет интерес их реализация с применением полосковых линий (Ершов и др., 2008а; 2008б).

### 2. Несимметричная полосковая линия

На рис. 1 изображена полосковая линия, называемая несимметричной полосковой линией (НПЛ), у которой одним проводником является металлическая зигзагообразная полоска, длина которой составляет около 1 м, второй проводник – слой меди, покрывающий всю площадь обратной стороны подложки (Ершов и др., 2008а; 2008б).

На рис. 2а изображена НПЛ, представляющая собой двухпроводную полосковую линию, состоящую из полоски шириной  $w$  и толщиной  $t$ , помещенной на расстоянии  $h$  от экранирующей пластины, имеющей ширину  $a$ . Пространство между проводниками и над полоской заполнено воздухом. Основной волной в НПЛ является основная волна  $ТЕМ$ , для которой критическая длина волны  $\lambda_{кр} = \infty$ . На практике находит применение несколько измененная конструкция (рис. 2б), в которой между полоской 1 и экранирующей пластиной 2 помещается подложка из диэлектрика 3 (Ершов и др., 2008б). Если сравнивать передачу энергии по НПЛ с воздушным и диэлектрическим заполнением, то в последнем случае уровень излучения в окружающее пространство гораздо ниже, что связано с увеличением концентрации электромагнитного поля в диэлектрике подложки, особенно при больших значениях диэлектрической проницаемости ее материала. Приближенно можно считать, что структура основной волны в полосковой линии с диэлектрическим заполнением, называемой квази- $ТЕМ$ , совпадает со структурой  $ТЕМ$ -волны. Дисперсия (зависимость характеристик распространения основной волны  $ТЕМ$  от частоты) не проявляется при значениях частоты  $f < 1$  ГГц (Лименов и др., 2000).

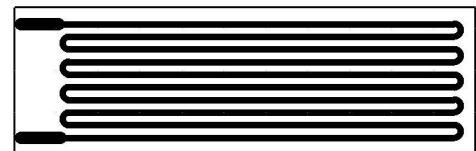


Рис. 1. Несимметричная полосковая линия с одним из проводников в виде зигзагообразной полоски

Рассматриваемую здесь полосковую линию с зигзагообразной металлической полоской можно рассматривать как длинную линию; взаимным влиянием электромагнитных полей участков этой линии можно пренебречь при расчете характеристик распространения электромагнитных волн вдоль такого отрезка линии. Волна квази-ТЕМ в рассматриваемой полосковой линии переносит часть электромагнитной энергии в подложке, а часть – в окружающем пространстве, в данном случае в жидкости, концентрация которой подлежит определению.

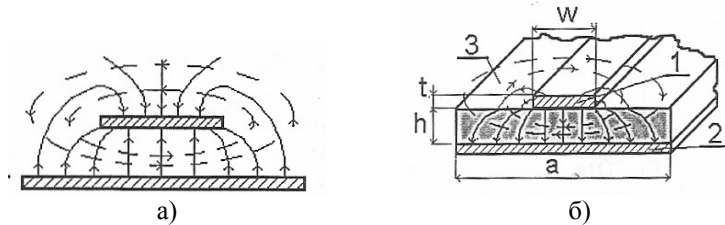


Рис. 2. Несимметричная полосковая линия:  
а) с воздушным заполнением между проводниками;  
б) с диэлектрической подложкой между проводниками

Эффективную диэлектрическую проницаемость  $\varepsilon_{эфф0}$  для волны квази-ТЕМ в НПЛ с диэлектриком 3 между проводниками 1 и 2, имеющим диэлектрическую проницаемость  $\varepsilon$ , и окружающим линию воздушным пространством можно выразить следующей формулой, если считать толщину  $t$  полоски 1 пренебрежимо малой (Пименов и др., 2000):

$$\varepsilon_{эфф0} = \frac{\varepsilon + 1}{2} + \frac{\varepsilon + 1}{2(1 + 10h/w)^{\frac{1}{2}}}. \quad (1)$$

Волновое сопротивление  $W_{л}$  данной НПЛ можно выразить следующей формулой с относительной погрешностью, не превышающей 0,6 % (Пименов и др., 2000):

$$W_{л} \sqrt{\varepsilon_{эфф0}} = \frac{120\pi}{w/h + (2/\pi) \ln[17,08(w/2h + 0,92)]} \quad \text{при } w/h > 2, \quad (2)$$

$$W_{л} \sqrt{\varepsilon_{эфф0}} = 60[\ln(8h/w) + w^2/(32h^2)] \quad \text{при } w/h \leq 2. \quad (3)$$

При конечной толщине  $t$  полоски 1, в случае  $0 < t/h < 0,1$ , сопротивление  $Z_{л}$  можно определить по формулам (2) и (3), если вместо  $w/h$  подставить  $w'/h$ , где

$$w'/h = w/h + t [1 + \ln(2h/t)] / (\pi h) \quad \text{при } w/h > 0,16, \quad (4)$$

$$w'/h = w/h + t [1 + \ln(4\pi w/t)] / (\pi h) \quad \text{при } w/h \leq 0,16. \quad (5)$$

Для определения концентрации датчик в виде отрезка полосковой линии следует подсоединить к электрической схеме в качестве ее элемента и, измеряя тот или иной параметр этой схемы, судить об измеряемом параметре. При этом, в зависимости от выбранных структурной схемы измерения и информативного параметра датчика, возможны различные реализации схем устройств для измерения тех или иных физических свойств жидкостей. Информативными параметрами резонаторных датчиков могут, в частности, служить: резонансная частота электромагнитных колебаний отрезка полосковой линии, рассматриваемого в качестве резонатора; резонансная частота электромагнитных колебаний отрезка полосковой линии, рассматриваемого в качестве оконечной нагрузки отрезка длинной линии. Рассмотрим возможные методы реализации резонаторных измерительных устройств, соответствующие этим информативным параметрам.

### 3. Резонаторные датчики концентрации в виде отрезков полосковой линии

Для измерения физических свойств жидкостей могут быть применены резонаторные датчики на основе отрезков длинных линий. Датчики на базе отрезков длинной линии – это ВЧ-резонаторы с резонансными частотами, как правило, до 100 МГц. Информативными параметрами резонаторных датчиков на основе рассматриваемых полосковых линий могут служить собственная (резонансная) частота  $f$  электромагнитных колебаний, а также добротность  $Q$  резонатора.

Для жидкостей, являющихся достаточно хорошими диэлектриками, целесообразно использовать в качестве информативного параметра резонансную частоту  $f$ , а в случае контроля жидкостей, обладающих существенными диэлектрическими потерями, целесообразно использовать добротность  $Q$  резонатора. Для контроля жидкостей с произвольными электрофизическими параметрами, в том числе и обладающих большими диэлектрическими потерями (вода, спирты и др.), могут быть применены резонаторы на основе отрезков полосковой линии с покрытием поверхности с полоской 1 слоем диэлектрического вещества определенной толщины.

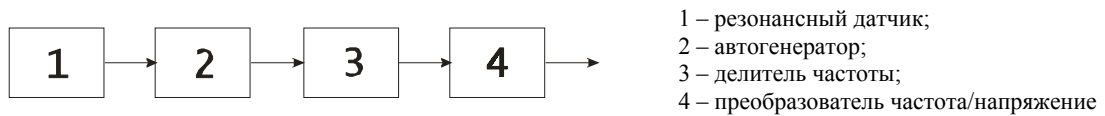


Рис. 3. Структурная схема одноканального измерительного устройства

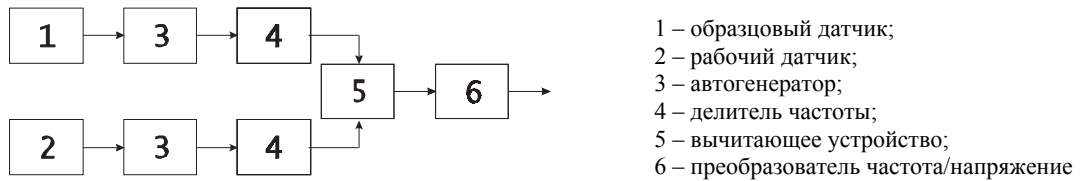


Рис. 4. Структурная схема двухканального измерительного устройства

Анализ известных структурных схем измерителей с преобразованием резонансных частот (Викторов и др., 1978) показывает, что наиболее приемлемыми для построения измерителей физических свойств жидкостей является автогенераторные схемы. Эти схемы выгодно отличаются от остальных простотой реализации и высокими метрологическими характеристиками. Основным фактором, ограничивающим область применения таких схем, является требование, чтобы добротность датчика была бы не менее 10. Однако это требование можно выполнить достаточно легко с помощью датчиков с диэлектрической оболочкой.

На рис. 3 представлена структурная схема одноканального измерительного устройства, состоящая из резонансного датчика 1, автогенератора 2, делителя частот 3 и преобразователя частота/напряжения 4. Датчик включается в частотообразующую цепь автогенератора и определяет его частоту генерации. Обычно генерируемые частоты лежат в диапазоне от единиц до сотен мегагерц и зависят в основном от геометрических размеров датчика. Высокочастотные колебания затем поступают на делитель частоты, в котором происходит понижение частоты генератора до требуемой величины (обычно ~ 10 кГц). После этого сигнал подается на преобразователь частота/напряжения.

Для технической реализации этой системы требуется всего 3 микросхемы и один транзистор, поэтому эта схема занимает небольшой объем и легко может быть размещена в головке датчика. Недостатком одноканальной схемы является необходимость подстройки "нуля", т.к. параметры как самой контролируемой среды, так и параметры автогенератора подвержены различного рода возмущающим воздействиям (температура, влажность, старение и т.д.).

От этого недостатка в значительной степени свободна схема двухканального измерительного устройства (рис. 4), которое от одноканального устройства отличается наличием двух датчиков: датчика образцовой жидкости 1 и датчика контролируемой жидкости 2. Датчики находятся в одинаковых условиях и поэтому все возмущающие воздействия приводят к одинаковым изменениям резонансной частоты, которые компенсируются в схеме вычитания 5. Помимо указанных выше узлов эта схема состоит из двух автогенераторов 3, двух делителей частоты 4 и преобразователя частота/напряжения 6.

Датчик представляет собой отрезок полосковой линии, разомкнутый или короткозамкнутый на одном из концов. Другим концом этот отрезок линии подключен к электронному блоку, осуществляющему возбуждение в отрезке линии электромагнитных колебаний и измерение его резонансной частоты  $f$  как функции измеряемого физического параметра  $K$  жидкости, например, концентрации бинарной смеси (раствора). Для такого отрезка линии зависимость  $f(K)$  имеет вид:

$$f(K) = f[\dot{\epsilon}_{эфф}(\dot{\epsilon}_{см}), f_0], \quad (6)$$

где  $\dot{\epsilon}_{см} = \epsilon'_{см} - i\epsilon''_{см}$  – комплексная диэлектрическая проницаемость жидкости, в частности, бинарной смеси (раствора);  $\epsilon'_{см}$  и  $\epsilon''_{см}$  – действительная и мнимая составляющие  $\dot{\epsilon}_{см}$ ;  $\dot{\epsilon}_{эфф}(\dot{\epsilon}_{см})$  – эффективная комплексная диэлектрическая проницаемость для полосковой линии, зависящая от диэлектрической проницаемости жидкости  $\dot{\epsilon}_{см}$ ;  $f_0$  – начальное значение резонансной частоты  $f$ , соответствующее отсутствию контролируемой жидкости.

Как следует из (Никулин, Седельникова, 1992), зависимость  $\dot{\epsilon}_{эфф}(\dot{\epsilon}_{см})$  может быть представлена так:

$$\dot{\epsilon}_{эфф} = \epsilon_{эфф0} + \frac{a(\dot{\epsilon}_{см} - 1)}{\dot{\epsilon}_{см} + b}, \quad (7)$$

где  $\epsilon_{эфф0}$  – эффективная диэлектрическая проницаемость для полосковой линии в отсутствие контролируемого вещества; ее величина выражается формулой (1); параметры  $a$  и  $b$  в (7) находят методом наименьших квадратов при помощи модели трехслойной полосковой структуры, описанной в (Yamashita, Mittra, 1968; Yamashita, 1968).

Для разомкнутого на конце отрезка рассматриваемой линии его резонансная частота  $f_0$  может быть выражена следующей формулой (Викторов и др., 1978):

$$f_0 = \frac{cn}{2\sqrt{\epsilon_{эфф0}}l}, \quad n = 1, 2, \dots, \quad (8)$$

где  $n = 1, 2, \dots$  – номер типа колебаний (гармоники), возбужденного в отрезке длиной линии;  $l$  – длина отрезка длиной линии;  $c = 3 \cdot 10^8$  м/с – скорость света.

Для отрезка полосковой линии, короткозамкнутого на одном из концов, будем иметь:

$$f_0 = \frac{c(2n+1)}{4\sqrt{\epsilon_{эфф0}}l}, \quad n = 0, 1, 2, \dots, \quad (9)$$

Для отрезка полосковой линии, короткозамкнутого на обоих концах, выражение для  $f_0$  имеет следующий вид:

$$f_0 = \frac{cn}{2\sqrt{\epsilon_{эфф0}}l}, \quad n = 1, 2, \dots, \quad (10)$$

Данная формула идентична (8). В обоих случаях резонатор является полуволновым; его длина пропорциональна числу полуволн вдоль отрезка длиной линии в соответствии со значением  $n$  (номером типа колебаний, или гармоники).

Для разомкнутого на конце отрезка полосковой линии его резонансная частота  $f$ , соответствующая присутствию контролируемого вещества, может быть выражена следующей формулой:

$$f = \frac{cn}{2\sqrt{\epsilon_{эфф}}l}, \quad n = 1, 2, \dots, \quad (11)$$

где  $n = 1, 2, \dots$  – номер типа колебаний (гармоники), возбужденного в отрезке длиной линии;  $l$  – длина отрезка длиной линии;  $c = 3 \cdot 10^8$  м/с – скорость света.

Для отрезка полосковой линии, короткозамкнутого на одном из концов:

$$f = \frac{c(2n+1)}{4\sqrt{\epsilon_{эфф}}l}, \quad n = 0, 1, 2, \dots, \quad (12)$$

Для отрезка полосковой линии, короткозамкнутого на обоих концах:

$$f = \frac{cn}{2\sqrt{\epsilon_{эфф}}l}, \quad n = 1, 2, \dots, \quad (13)$$

Значение резонансной частоты  $f_0$  можно определить экспериментально для рассматриваемых резонаторов в виде отрезков полосковой линии, в частности, в виде короткозамкнутого или разомкнутого отрезков полосковой линии. Тогда, согласно формулам (8), (9) или (10) можно найти значение  $\epsilon_{эфф}$ . При экспериментах с контролируемым веществом, в частности, с влагосодержащей жидкостью, измеряя значение резонансной частоты  $f$  рассматриваемого резонатора, можно, согласно (11), (12) или (13), определить с помощью функциональной зависимости  $f(\epsilon_{эфф})$  значение  $\epsilon_{эфф}$ . Затем, подставив найденные значения  $\epsilon_{эфф}$  и  $\epsilon_{эфф0}$  в формулу (7), можно получить значение диэлектрической проницаемости жидкости  $\epsilon_{см}(K)$ , где  $K$  – величина измеряемого параметра, в частности, концентрация контролируемой смеси (раствора). Для расчета диэлектрической проницаемости  $\epsilon_{см}$  бинарных смесей предложено большое число формул, вывод которых базируется на различных теоретических и экспериментальных данных (Богородицкий, 1965; Тареев, 1982). Их практическое применение, как правило, имеет место после экспериментального подтверждения для конкретных смесей контролируемых веществ.

Следовательно, зная параметры измерительной ячейки в виде отрезка несимметричной полосковой линии – резонатора, а также начальные параметры данной ячейки, можно, измерив резонансную частоту заполненной жидкостью измерительной ячейки (полосковой линии) и используя рассмотренные выше методику измерений и полученные соотношения, найти величину того или иного измеряемого физического параметра контролируемой жидкости, в частности, концентрацию смеси веществ (раствора).

#### 4. Заключение

Рассмотренный резонаторный метод измерения может быть применен для контроля концентрации смесей веществ (растворов), в том числе влагосодержания жидкостей, и других

физических свойств веществ. Как датчики на основе отрезков полосковой линии, так измерительные устройства в целом достаточно просты в реализации.

### Литература

- Yamashita E.** Variational method for the analysis of microstriplike transmission lines. *IEEE Transactions on Microwave theory and Techniques*, v. MTT-16, N 8, p.529-535, 1968.
- Yamashita E., Mittra R.** Variational method for the analysis of microstrip lines. *IEEE Transactions on Microwave theory and Techniques*, v. MTT-16, N 4, p.251-256, 1968.
- Богородицкий Н.П., Волокобинский Ю.М., Воробьев А.А., Тареев Б.М.** Теория диэлектриков. М.-Л., Энергия, 344 с., 1965.
- Викторов В.А., Лункин Б.В., Совлуков А.С.** Высокочастотный метод измерения неэлектрических величин. М., Наука, 280 с., 1978.
- Викторов В.А., Лункин Б.В., Совлуков А.С.** Радиоволновые измерения параметров технологических процессов. М., Энергоатомиздат, 208 с., 1989.
- Ершов А.М., Маслов А.А., Курамшина А.Р., Яценко В.В.** Метод диэлектрической спектроскопии физических свойств жидкости. *Межвузовский сборник трудов по матер. Междунар. научно-техн. конференции "Наука и образование – 2008". [Электронный ресурс] МГТУ. Электрон. текст.дан. Мурманск, МГТУ, 2008а.*
- Ершов А.М., Маслов А.А., Курамшина А.Р., Яценко В.В.** Метод диэлектрической спектроскопии измерения физических свойств жидкостей. *Труды Росс. конф. с междунар. участием "Технические и программные средства систем управления, контроля и измерения". М., ИПУ, с.620-627, 2008b.*
- Ершов А.М., Маслов А.А., Совлуков А.С., Фатеев В.Я., Яценко В.В.** Радиочастотная концентратометрия технологических водных растворов. *Датчики и системы*, № 11, с.17-21, 2007.
- Никулин С.М., Седельникова И.М.** Экспресс-контроль влажности материалов в промышленности и сельском хозяйстве. *2-я Крымская конф. "СВЧ-техника и спутниковый прием". Материалы конф., Севастополь, с.167-172, 1992.*
- Пименов Ю.В., Вольман В.И., Муравцов А.Д.** Техническая электродинамика. Учеб. пособие для вузов. Под ред. Пименова Ю.В. М., Радио и связь, 536 с., 2000.
- Совлуков А.С., Фатеев В.Я.** Радиочастотные резонаторные измерения концентрации водных растворов. *Измерительная техника*, № 10, с.65-67, 2007.
- Тареев Б.М.** Физика диэлектрических материалов. М., Энергоиздат, 320 с., 1982.