

Модификация резонансного метода измерений: площадь под резонансной кривой как информативный параметр

А. С. СОВЛУКОВ

Институт проблем управления им. В. А. Трапезникова РАН, Москва, Россия,
e-mail: sovlukov@yandex.ru

Предложена модификация метода измерений различных физических величин с использованием площади под резонансной кривой в качестве информативного параметра измерительного резонатора. Модифицированный метод состоит в определении амплитудно-частотной характеристики на фиксированной частоте при изменении начальной резонансной частоты резонатора в фиксированных пределах. При реализации модифицированного метода не требуется девиация частоты колебаний генератора. Рассмотрена реализация модифицированного метода при измерениях с применением волноводных резонаторов.

Ключевые слова: измерительный резонатор, информативный параметр, амплитудно-частотная характеристика, резонансная частота, площадь под резонансной кривой, волноводный резонатор.

Modification of the measurement method using area under resonance curve in a resonator sensor as informative parameter is considered. The modified method implies determination of amplitude-frequency characteristic under the change of initial resonant frequency of a resonator in fixed limits. Deviation of oscillation frequency is not needed for realization of the method. If a waveguide resonator is applied then the change of its initial resonant frequency in fixed limits can be done via the change of initial value of end load of such a resonator in corresponding fixed limits.

Key words: resonator sensor, informative parameter, amplitude-frequency characteristic, resonant frequency, area under resonance curve, waveguide resonator.

Резонаторы широко используются для измерений различных физических величин [1, 2]. Информативными параметрами таких приборов обычно служат резонансная частота, добротность, входной импеданс и др. С применением резонаторов можно определять физические свойства, а также механические, геометрические, технологические, электрофизические, акустические и другие параметры контролируемых объектов (материалов, веществ).

Для измерений физических величин разработаны высокочастотные (ВЧ) и сверхвысокочастотные (СВЧ) радиоволновые измерительные резонаторы [3, 4]. Информативный параметр таких приборов – резонансная частота электромагнитных колебаний. Существует способ измерения, при котором контролируемый объект размещается в измерительном резонаторе (колебательном контуре с сосредоточенными параметрами, объемном или открытом ВЧ- или СВЧ-резонаторе, акустическом резонаторе и т. п.), а затем измеряются характеристики этого резонатора [3, 4]. К числу таких характеристик относятся собственная (резонансная) частота колебаний, добротность резонатора и другие, варьирующиеся в зависимости от изменений физических и (или) геометрических параметров контролируемого объекта.

Площадь под резонансной кривой как информативный параметр. Несмотря на эффективность применения измерительных резонаторов, их информационный потенциал можно повысить. Для этого в качестве информативного параметра можно использовать площадь под резонансной кривой – амплитудно-частотной характеристикой (АЧХ) резонатора [5].

Площадь

$$S(x) = \int_{f_1}^{f_2} A(x, f) df$$

под резонансной кривой $A(x, f)$ необходима для измерения параметра x контролируемого объекта. Здесь f – частота зондирующих объект сигналов (волн) генератора частотно-модулированных колебаний, изменяемая в пределах диапазона частот $[f_1, f_2]$, в котором наблюдается резонанс; $A(x, f)$ – амплитуда при текущем значении f частоты генератора. Для нахождения площади S , зависящей от измеряемой физической величины x , необходимо получить АЧХ для диапазона $[f_1, f_2]$.

Метод измерений по площади под резонансной кривой применим как при диссипации электромагнитной энергии в контролируемом объекте, так и при отсутствии диссипации. В полосе пропускания резонатора наблюдаются диссипативные эффекты, которые свидетельствуют о наличии АЧХ резонатора. Однако можно снять АЧХ, даже если резонатор пустой. Причина этого – диссипация в конструктивных элементах резонатора, а также внешних цепях (генераторе, детекторе и др.), обеспечивающих возбуждение электромагнитных колебаний в резонаторе и измерение информативного параметра (в данном случае – площади под резонансной кривой).

Метод, характеризуемый АЧХ резонатора, можно использовать при измерениях различных физических величин, в частности физических свойств контролируемых веществ. При этом не важно, есть ли диссипация электромагнитной энергии в веществе (исследуемом объекте), находящемся в электромагнитном поле резонатора, т. е. могут отсутствовать

диэлектрические потери в объекте. Применимость метода в данном случае подтверждается следующим примером. Для резонатора, в электромагнитном поле которого отсутствует контролируемый объект, соотношение для полосы пропускания резонатора имеет вид: $\Delta f = f_p/Q_0$, где f_p , Q_0 – резонансная (собственная) частота и добротность резонатора при отсутствии объекта [3, 6]. Если в электромагнитном поле резонатора находится контролируемый диэлектрический объект без диэлектрических потерь ($\text{tg} \delta = 0$), имеющий диэлектрическую проницаемость ε , то полоса пропускания $\Delta f(\varepsilon) = f_p(\varepsilon)/Q$. Значение общей добротности Q этого резонатора не включает частичную добротность Q_d , обусловленную диэлектрическими потерями в заполняющем резонатор веществе [3, 4]. Это означает, что при введении такого объекта в электромагнитное поле резонатора его резонансная частота изменяется без изменения амплитуды АЧХ. Происходят только смещение АЧХ по частотной оси, изменение $\Delta f(\varepsilon)$ и, соответственно, площади $S(\varepsilon)$ под кривой АЧХ, являющейся информативным параметром, в зависимости от значения ε . Следовательно, информацию о каком-либо параметре, функционально связанном с ε , можно получать и для объекта без диэлектрических потерь (диссипации электромагнитной энергии). Таким образом, описываемым методом можно решать задачу, например, измерения уровня диэлектрической жидкости. При контроле диссипативных объектов изменяются как полоса пропускания Δf резонатора, так и амплитуда A , что обуславливает изменение площади S .

Метод измерений по площади под резонансной кривой обладает существенно большей чувствительностью к измеряемому параметру по сравнению с методом, в котором информативным параметром служит резонансная частота колебаний. Недостаток метода – достаточно сложная реализация. При этом необходим генератор частотно-модулированных колебаний, соединяемый с резонатором, для обеспечения девиации частоты колебаний в достаточно широких пределах, соответствующих возможным значениям резонансной частоты, зависящей от измеряемого параметра.

Модифицированный метод измерения. Рассмотрим модификацию метода измерений по площади под резонансной кривой с использованием фиксированной частоты и определения АЧХ при изменении начальной собственной частоты резонатора в фиксированных пределах.

Резонатор возбуждается генератором колебаний на фиксированной частоте f . При совпадении f с резонансной (собственной) частотой f_p резонатора амплитуда A колебаний принимает максимальное значение A_0 . Согласно модифицированному методу получают АЧХ и вычисляют площадь S под ней по формуле

$$S = \int_{f_{p1}}^{f_{p2}} A(f_{p0}) df_{p0}. \quad (1)$$

По полученной площади оценивают значение измеряемой физической величины x . Диапазон частот $[f_{p1}, f_{p2}]$ должен соответствовать диапазону частот колебаний, возбуждаемых в резонаторе.

В модифицированном методе возбуждение колебаний осуществляется на фиксированной частоте f , и АЧХ определяется при изменении начального значения f_{p0} собственной частоты резонатора в фиксированных пределах $[f_{p1}, f_{p2}]$. Значение f_{p0} зависит минимум от одного параметра a резонатора, изменяющегося в фиксированных пределах $[a_1, a_2]$: $f_{p0} = f_{p0}(a)$. Пределы $[f_{p1}, f_{p2}]$, $[a_1, a_2]$ должны соответствовать диапазону возможных значений $[x_1, x_2]$ измеряемого параметра x . При измерениях с применением электромагнитного резонатора (с сосредоточенными параметрами, отрезка длинной линии, объёмного резонатора и др.) изменяемым параметром a резонатора, влияющим на начальное значение его резонансной частоты, может быть, например, геометрический параметр резонатора и (или) электрофизический параметр вещества, находящегося в электромагнитном поле резонатора. Изменяемым параметром акустического резонатора может являться какой-либо геометрический и (или) акустический параметр.

Пример реализации модифицированного метода измерения. Схема устройства для реализации данного метода содержит резонатор, в котором генератором возбуждают колебания на фиксированной частоте f . С помощью функционального элемента изменяют начальное значение резонансной (собственной) частоты резонатора, зависящее от одного (как минимум) параметра a резонатора. К выходу резонатора подсоединяют последовательно соединённые детектор, интегратор и регистратор. В регистраторе определяются получаемое на выходе интегратора значение функции S из (1) при девиации частоты f_{p0} в пределах диапазона $[f_{p1}, f_{p2}]$. Этот частотный диапазон должен соответствовать пределам изменения значений $[x_1, x_2]$ измеряемого параметра x .

В качестве иллюстрации реализации данного метода рассмотрим задачу измерения уровня диэлектрической жидкости (контролируемого объекта) в резервуаре с применением ВЧ-резонатора. Такой ВЧ-резонатор – колебательная система с ёмкостным коаксиальным датчиком уровня жидкости, расположенным вертикально в резервуаре. На рис. 1 представлена конструкция ёмкостного датчика 1 (коаксиального конденсатора) уровня контролируемой жидкости 2. Изменение уровня x жидкости приводит к соответствующему изменению информативного параметра – площади $S(x)$ под резонансной кривой [5]:

$$S(x)/S_0 = [1 + (\varepsilon - 1)x/l]^{-1}, \quad (2)$$

где S_0 – значение S при $x = 0$; l – длина коаксиального конденсатора.

В [5] приведён экспериментально полученный график зависимости относительного значения площади $S(x)/S_0$ от относительного уровня x/l жидкости. Для реализации модифицированного метода с целью изменения начального значения резонансной частоты в фиксированных пределах изменяют длину l датчика 1 (коаксиального конденсатора) в пределах $[l_1, l_2]$ от $l - l_1$ до $l + l_2$ (см. рис. 1). При этом $f_{p0} = f_{p0}(l)$.

Найдём значение $f_{p0}(l)$. Резонансная частота $f_p(x)$ данного резонатора выражается формулой

$$f_p(x) = (2\pi\sqrt{L_s C_s(x)})^{-1}, \quad (3)$$

где L_s , $C_s(x)$ – эквивалентные значения индуктивности и ёмкости резонатора.

При $x = 0$ выражение (3) приобретёт вид

$$f_p(0) = f_{p0} = (2\pi\sqrt{L_s C_{s,n} l})^{-1}, \quad (4)$$

где $C_{s,n}$ – погонная электрическая ёмкость датчика.

Из (4) следует равенство

$$f_{p0}(l) = k/\sqrt{l}, \quad (5)$$

где $k = (2\pi\sqrt{L_s C_{s,n}})^{-1} = \text{const}$.

С учётом (5) перепишем формулу (1):

$$S = \int_{l_1}^{l_1+l_2} A(l) k l^{-3/2} dl.$$

Изменение длины l датчика 1 уровня можно обеспечить с применением подвижной (например, телескопической) части этого датчика (функционального элемента), изменяющейся в пределах $[l_1, l_2]$ (см. рис. 1).

Реализация модифицированного метода при измерениях с применением волноводных резонаторов. В данном случае можно предложить изменять начальную собственную частоту резонатора в фиксированных пределах путём изменения параметров его оконечной нагрузки. При этом резонатором служит волноводный резонатор с оконечной нагрузкой с реактивным сопротивлением X_n . Площадь под АЧХ находят согласно соотношению

$$S = \int_{X_{n1}}^{X_{n2}} A(X_{n0}) dX_{n0}, \quad (6)$$

где $A(X_{n0})$ – амплитуда колебаний в волноводном резонаторе при значении X_{n0} оконечной нагрузки; X_{n0} – начальное (при номинальном значении измеряемой физической величины) значение X_n ; $[X_{n1}, X_{n2}]$ – фиксированные пределы изменения X_{n0} , соответствующие фиксированным пределам $[f_{p1}, f_{p2}]$.

В общем случае оконечной нагрузкой волноводного резонатора может являться комплексное сопротивление $Z_n = R_n + jX_n$, где R_n – активная составляющая Z_n . Именно реактивная составляющая X_n комплексного сопротивления Z_n влияет на значение f_{p0} и его изменение при изменении X_n .

Пределы $[f_{p1}, f_{p2}]$, как и $[X_{n1}, X_{n2}]$, должны соответствовать диапазону возможных значений $[x_1, x_2]$ измеряемой физической величины x . На рис. 2 приведена зависимость амплитуды A от X_{n0} в фиксированных пределах $[X_{n1}, X_{n2}]$, соответствующих пределам $[f_{p1}, f_{p2}]$. Максимальное значение A_0 амплитуды соответствует значению $X_{n0}(f)$ на частоте f_{p0} , равной фиксированной частоте f генератора.

Изменяемым параметром X_{n0} волноводного резонатора (отрезка длинной линии, объёмного волноводного резонатора и др.), влияющим на начальное значение его собственной

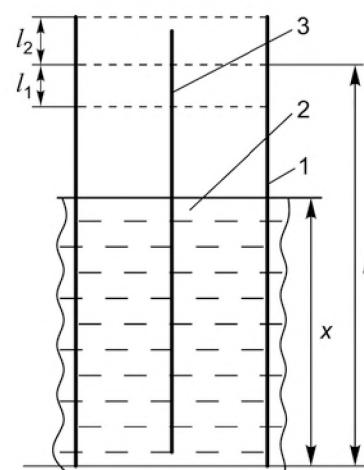


Рис. 1. Датчик уровня жидкости в резервуаре: 1 – датчик уровня (коаксиальный конденсатор); 2 – контролируемая жидкость; 3 – стержень конденсатора

частоты, может быть какой-либо геометрический параметр оконечной нагрузки резонатора и (или) электрофизический параметр вещества, находящегося в электромагнитном поле этой нагрузки. Для волноводного резонатора с колебаниями типов H_{mnp} или E_{mnp} применяются реактивные компоненты, в частности диафрагмы ёмкостного и индуктивного типов в волноводах [6–8]. Такой реактивный компонент может быть в данном случае оконечной нагрузкой волноводного резонатора, ей можно управлять и изменять значение f_{p0} . Однако проще и эффективнее осуществить электрически управляемую перестройку значения X_{n0} в фиксированных пределах $[X_{n1}, X_{n2}]$, изменив таким образом (выполнив частотную модуляцию) частоту f_{p0} волноводного резонатора в соответствующих пределах. В частности, для волноводного резонатора в виде отрезка длинной линии с колебаниями типа ТЕМ в качестве такого модулятора можно применять оконечную нагрузку в виде электрически управляемого сосредоточенного реактивного сопротивления X_n переменной индуктивности L ($X_n = 2\pi fL$) или переменной ёмкости C ($X_n = (2\pi fC)^{-1}$). Наличие на конце отрезка однородной длинной линии индуктивности L эквивалентно удлинению на значение $l_L = \text{carctg}(2\pi f_{p0} L / W) / (2\pi f_{p0})$ отрезка длинной линии, короткозамкнутого на конце, а наличие ёмкости C – удлинению на значение $l_C = \text{carctg}(2\pi f_{p0} C W) / (2\pi f_{p0})$ отрезка длинной линии, разомкнутого на конце. Здесь c – скорость света; W – волновое (характеристическое) сопротивление длинной

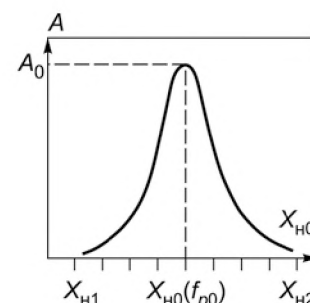


Рис. 2. Зависимость амплитуды A колебаний от начального значения X_{n0} реактивного сопротивления оконечной нагрузки волноводного резонатора

линии [3]. В качестве переменной ёмкости C может служить диод с управляемой ёмкостью – варикап [9]. Следовательно, по изменению оконечной реактивной нагрузки отрезка длинной линии – индуктивности L в пределах $[L_1, L_2]$ или ёмкости C в пределах $[C_1, C_2]$, соответствующих пределам изменения частоты волноводного резонатора, можно при фиксированной частоте f генератора определить площадь S под соответствующей резонансной кривой и искомое значение x измеряемой физической величины.

Схема устройства для реализации этого метода содержит измерительный волноводный резонатор в виде волновода с оконечной нагрузкой. К выходу резонатора подсоединяют последовательно соединённые детектор, интегратор и регистратор. В регистраторе определяется получаемое на выходе интегратора значение функции S из (6) при девиации значения $X_{н0}$ в пределах диапазона $[X_{н1}, X_{н2}]$. Этот частотный диапазон должен соответствовать пределам изменения значений $[x_1, x_2]$ измеряемого параметра x .

Оценка погрешностей измерений. Рассмотрим погрешность предложенного метода измерения на примере задачи измерения уровня диэлектрической жидкости. При использовании площади S резонатора в качестве информативного параметра зависимость S от уровня x выражается формулой (2). Если для этого применять резонансную частоту f резонатора, то справедливо равенство [3, 5]:

$$f_p(x)/f_{p0} = [1 + (\varepsilon - 1)x/l]^{-1/2}. \quad (7)$$

Оценим численно величины из (2), (7), характеризующие диапазон изменения информативного параметра модифицированным и немодифицированным методами, соответственно. Пусть $\varepsilon = 2$ (нефтепродукты и др.), $l = 1$ м, $x/l = 0 \dots 1$. Тогда $S/S_0 = 0,5 \dots 1$; $f_p/f_{p0} = 0,707 \dots 1$, т. е. диапазон изменения S/S_0 существенно больше, чем f_p/f_{p0} , – чувствительность первого метода выше, чем второго.

Относительная погрешность δ_f измерения резонансной частоты колебательного контура составляет 10^{-4} в диапазоне частот 1–100 МГц. С учётом реальных условий эксплуатации измерительных резонаторов (при возможном влиянии различных дестабилизирующих факторов: изменения температуры в пределах 0–50 °С и более, давления и пр.) погрешность $\delta_f = 10^{-3}$ [3]. Относительная погрешность измерения уровня диэлектрической жидкости по резонансной частоте $\delta_f f_{p0}/\Delta f_p = 0,03 \dots 0,33\%$. В модифицированном методе измерения по площади S в электронном блоке измерительного устройства эта величина преобразуется в постоянное

напряжение, относительная погрешность измерения постоянного напряжения современными цифровыми вольтметрами составляет 0,005–0,01 %. Относительная погрешность измерения уровня диэлектрической жидкости по площади S определяется как $\delta_S S_0/\Delta S = 0,01 \dots 0,02\%$. Таким образом, относительная погрешность измерения уровня жидкости по значению резонансной частоты f_p в несколько раз превышает эту погрешность при измерении уровня по значению площади S .

Заключение. Модифицированный метод измерения физической величины характеризуется упрощением процесса измерения за счёт использования в качестве информативного параметра площади под резонансной кривой (АЧХ) на фиксированной частоте и определения АЧХ при изменении начальной собственной частоты измерительного резонатора в фиксированных пределах. При реализации данного метода не требуется осуществлять девиацию частоты колебаний генератора.

Л и т е р а т у р а

1. Джексон Р. Г. Новейшие датчики. М.: Техносфера, 2012.
2. Датчики: Справочное пособие / Под общ. ред. В. М. Шарапова, Е. С. Полищука. М.: Техносфера, 2012.
3. Викторов В. А., Лункин Б. В., Совлуков А. С. Радиоволновые измерения параметров технологических процессов. М.: Энергоатомиздат, 1989.
4. Zoughi R. Microwave non-destructive testing and evaluation. Dordrecht, Netherlands: Kluwer Acad. Publ., 2000.
5. Викторов В. А., Минаев В. С., Совлуков А. С. Резонаторные измерения: площадь под резонансной кривой как информативный параметр // Измерительная техника. 2006. № 5. С. 56–60.
6. Пименов Ю. В., Вольман В. И., Муравцов А. Д. Техническая электродинамика. Под ред. Пименова Ю. В. М.: Радио и связь, 2000.
7. Шаров Г. А. Основы теории сверхвысокочастотных линий передачи, цепей и устройств. М.: Горячая линия – Телеком, 2016.
8. Шаров Г. А. Волноводные устройства сантиметровых и миллиметровых волн. М.: Горячая линия – Телеком, 2016.
9. Гуртов В. А. Твердотельная электроника. М.: Техносфера, 2008.

Дата принятия: 14.04.2017.