

УДК 681.586.621.37:543.275.1

Радиочастотное резонаторное устройство для измерения физических свойств жидкостей

А.А. Маслов¹, А.С. Совлуков^{1,2}, В.Я. Фатеев², В.В. Яценко¹, А.Р. Власова¹

¹ Политехнический факультет МГТУ, кафедра автоматики

и вычислительной техники

² Институт проблем управления им. В.А. Трапезникова РАН, г. Москва

Аннотация. Рассматривается радиочастотное резонаторное измерительное устройство для определения физических свойств жидкостей. Устройство содержит отрезок коаксиальной линии с U-образным внутренним проводником. Электронный блок устройства может быть расположен на значительном расстоянии от контролируемого объекта. Предложена математическая модель чувствительного элемента устройства, позволяющая рассчитывать выходную характеристику устройства и оптимизировать конструктивные параметры чувствительного элемента с точки зрения повышения его чувствительности к измеряемым физическим свойствам жидкости и обеспечения однозначности измерений.

Abstract. Radiofrequency (RF) resonator measuring device for determination of physical properties of liquids has been proposed. The device contains RF sensor that is a section of modified coaxial line with U-shaped inner conductor. Distant location of electronic unit of the device from a monitored object can be provided. Mathematical model of the RF sensor has been proposed. It gives ability to calculate output characteristic of the device and to optimize parameters of the RF sensor in order to increase its sensitivity to measured physical properties of a liquid and to provide unambiguity of measurement results.

Ключевые слова: радиочастотное резонаторное устройство, коаксиальная линия, U-образный внутренний проводник, определение физических свойств жидкости

Key words: radiofrequency resonator, coaxial line, U-shaped inner conductor, determination of physical properties of liquids

1. Введение

Во многих отраслях промышленности необходимо с высокой точностью определять различные физические свойства (концентрацию смеси веществ, влагосодержание, плотность и др.) жидкостей, находящихся в емкостях (технологических резервуарах, измерительных ячейках и т.п.). В частности, в пищевой промышленности требуется измерять концентрацию копильных препаратов, водно-спиртовых растворов и др.

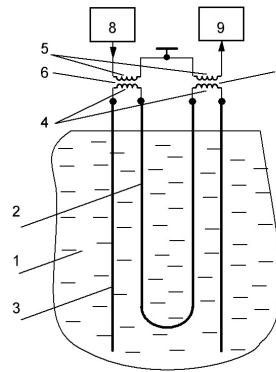
Известны различные устройства для определения физических свойств жидкостей, основанные на измерении электрофизических параметров (диэлектрической проницаемости или/и тангенса угла диэлектрических потерь) жидкостей с применением радиоволновых ВЧ и СВЧ резонаторов, содержащих контролируемую жидкость (Брандт, 1963; Викторов и др., 1978; 1989). Такие измерительные устройства имеют, однако, ограниченную область применения, обусловленную 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 известном устройстве (Ершов и др., 2007) содержится располагаемый в контролируемой жидкости чувствительный элемент (ЧЭ), представляющий собой отрезок длинной линии в виде совокупности металлического цилиндра и расположенного внутри него и параллельно ему внутреннего проводника U-образной формы, подключенных к электронному блоку для возбуждения в отрезке длинной линии электромагнитных колебаний и измерения его резонансной частоты. Однако данное устройство имеет ограниченную область применения, что обусловлено необходимостью расположения электронного блока непосредственно вблизи ЧЭ и контролируемого объекта: в качестве электронного блока применяется автогенератор, в частотоподающую цепь которого подключен рассматриваемый отрезок длинной линии. Частота автогенератора, зависящая функционально от резонансной частоты отрезка длинной линии, служит информативным параметром. На практике же существует много задач, связанных с необходимостью расположения электронного блока на значительном расстоянии (несколько метров и более) от контролируемого объекта. Схема автогенератора с рассматриваемым ЧЭ не позволяет это сделать.

Рассматриваемое здесь устройство характеризуется расширенной областью применения и обеспечивает возможность проведения измерений при удалении электронного блока от контролируемого объекта и уменьшение влияния на погрешность измерения параметров кабелей, связывающих генератор и блок для измерения резонансной частоты с соответствующими индуктивностями связи.

Рис. 1. Функциональная схема измерительного устройства

- 1 – контролируемая жидкость,
- 2 – внутренний проводник отрезка длинной линии,
- 3 – наружный проводник отрезка длинной линии,
- 4 – нагрузочные индуктивности,
- 5 – индуктивности связи,
- 6 и 7 – высокочастотные трансформаторы,
- 8 – генератор частотно-модулированных колебаний,
- 9 – блок измерения резонансной частоты



2. Функциональная схема измерительного устройства

На рис. 1 изображена функциональная схема измерительного устройства. Здесь чувствительный элемент в виде отрезка длинной линии размещается в емкости с контролируемой жидкостью 1; он может быть также заполнен этой жидкостью для проведения измерений. Такой ЧЭ содержит внутренний проводник 2, имеющий U-образную форму, и наружный проводник (металлический экран) 3. Внутренний проводник 2 может быть покрыт диэлектрической оболочкой определенной толщины, изготовленной из фторопласта, полиэтилена и др., что важно при контроле жидкостей с большими диэлектрическими потерями.

Каждый из концов данного отрезка длинной линии подключен к соответствующей нагрузочной индуктивности 4. Эти нагрузочные индуктивности 4 вместе с соответствующими индуктивностями связи 5 образуют высокочастотные трансформаторы 6 и 7, которые работают на частотах ~ 1 МГц и более высоких частотах. К одной из индуктивностей связи 5 подключен генератор частотно-модулированных колебаний 8, с помощью которого в данном отрезке длинной линии – полуволновом резонаторе – возбуждают электромагнитные колебания (обычно в мегагерцовом диапазоне частот электромагнитных волн) на основной резонансной частоте. К другой индуктивности связи 5 подключен блок измерения резонансной частоты 9. Величина индуктивной связи между первичной (индуктивностью связи 5) и вторичной (нагрузочной индуктивностью 4) обмотками каждого из высокочастотных трансформаторов 6 и 7 выбирается из условий обеспечения большого значения нагрузочной (т.е. при подключении внешних элементов к отрезку длинной линии) добротности резонатора (отрезка длинной линии) и достаточно большого значения амплитуды сигнала на выходе данного резонатора, т.е. на входе блока измерения резонансной частоты 9.

В частности, при измерении физических свойств жидкости, являющейся диэлектриком с большими диэлектрическими потерями, собственная (т.е. в отсутствие внешних элементов) добротность резонатора (отрезка длинной линии) имеет малую величину ($\sim 10 \div 20$). В этом случае основной задачей является обеспечение достаточно большого значения амплитуды выходного сигнала, поступающего в блок измерения резонансной частоты 9. Поэтому в данном случае требуется обеспечить достаточно сильную индуктивную связь между обмотками каждого трансформатора. Это достигается расположением обмотки индуктивности связи 5 каждого из трансформаторов 6 и 7 в непосредственной близости от обмотки соответствующей нагрузочной индуктивности 4 (например, одна из этих обмоток располагается поверх другой обмотки или между витками другой обмотки).

3. Принцип действия измерительного устройства

При совпадении частоты частотно-модулированных колебаний и резонансной частоты полуволнового резонатора амплитуда этих электромагнитных колебаний достигает максимума. Этот максимум фиксируется в блоке измерения резонансной частоты 9, и в нем происходит преобразование измеряемой частоты в какой-либо из электрических сигналов (напряжение, ток) или цифровой код. При расположении полуволнового отрезка длинной линии в контролируемой жидкости 1 его резонансная частота изменяется. Поскольку эта резонансная частота функционально зависит от электрофизических параметров контролируемой жидкости 1, в частности, от диэлектрической проницаемости, которая, в свою очередь, зависит от физических свойств этой жидкости (концентрации смеси веществ, влагосодержания, плотности и др.), то по ее значению определяют соответствующее значение измеряемого физического свойства жидкости.

В общем случае ЧЭ в виде отрезка длинной линии можно представить в виде эквивалентного LC-контура с сосредоточенными параметрами, резонансная частота которого ω_p определяется по формуле

$$\omega_p = \frac{1}{\sqrt{LC}} \quad (1)$$

Измеряемый физический параметр чаще всего воздействует на электрическую емкость C данного эквивалентного LC -контура, в результате чего она изменяется на величину ΔC , а резонансная частота – на величину $\Delta\omega_p$. Дифференцируя функцию (1) по C , можно получить приближенную формулу, связывающую величины $\Delta\omega_p$ и ΔC

$$\frac{\Delta\omega_p}{\omega_p} \approx -\frac{\Delta C}{2C}. \quad (2)$$

Величина $\Delta\omega_p/\omega_p$ определяет частотное перекрытие датчика, т.е. относительное изменение информативного параметра (резонансной частоты) от относительного изменения измеряемого параметра.

Следует заметить, что емкость C состоит из рабочей емкости C_p и паразитной емкости C_n . Паразитную емкость составляют емкости различных элементов конструкции датчика, не участвующие в преобразовании "измеряемый параметр $\rightarrow C \rightarrow \omega_p$ ", например, емкости проходных изоляторов, фиксаторов и линий связи. Очевидно, что максимальную чувствительность и минимальную погрешность измерения можно получить только при максимально возможном значении $\Delta C/(2C)$. Поэтому необходимо стремиться к уменьшению влияния паразитной емкости C_n на величину частотного перекрытия (2). В частности, уменьшения влияния емкости линий связи можно добиться при подключении их к точкам резонатора, в которых величина электрического поля минимальная. В полуволновом резонаторе такими точками являются короткозамкнутые концы этого резонатора или концы резонатора, нагруженные на индуктивность L_n .

В этом случае входное сопротивление Z_{ex} отрезка длиной линии, имеющего длину l и нагруженного на противоположном конце на индуктивность L_n , можно определить из следующего выражения (Викторов и др., 1978):

$$Z_{ex} = jW \operatorname{tg} \beta \cdot (l+x_0), \quad (3)$$

где W – волновое сопротивление длиной линии; $\beta = \omega/v_\phi$ – коэффициент фазы; ω – угловая частота; v_ϕ – фазовая скорость распространения электромагнитных волн в вакууме; x_0 – эквивалентное удлинение отрезка длиной линии, нагруженного на индуктивность L_n , которое выражается следующей формулой:

$$x_0 = (1/\beta) \cdot \operatorname{arctg}(\omega L_n/W). \quad (4)$$

Из формулы (3) видно, что при $\lambda/4 \leq l+x_0 \leq \lambda/2$ входное сопротивление отрезка длиной линии приобретает емкостной характер, при этом эквивалентная электрическая емкость $C_p \rightarrow \infty$ при $l+x_0 \rightarrow \lambda/2$. Поэтому всегда можно выбрать такие значения длины l отрезка длиной линии или индуктивности L_n , при которых $C_n \ll C_p$, и, тем самым, обеспечить требуемое минимальное влияние C_n на частотное перекрытие (3) и, следовательно, на точность измерения физической величины во всем диапазоне ее изменения.

Отметим, что эксперименты с различными жидкостями подтверждают эффективность устройства, рассмотренного в статье (Еришов и др., 2007), для измерения различных физических свойств жидкостей. Например, в экспериментах применялась конструкция отрезка длиной линии длиной 100 мм, внутренним диаметром металлического цилиндра из нержавеющей стали 20 мм с U-образным внутренним проводником, покрытым диэлектрической (полихлорвиниловой) оболочкой. Диаметр U-образного медного проводника вместе с оболочкой равен 2 мм, а без оболочки – 1,2 мм. Части U-образного проводника расположены симметрично относительно продольной оси металлического цилиндра; расстояние между этими частями внутреннего проводника равно 7 мм. Такая же конструкция ЧЭ применима и с иным, рассмотренным выше, способом возбуждения и съема электромагнитных колебаний.

4. Расчет выходной характеристики измерительного устройства и оптимизация конструктивных параметров чувствительного элемента

Выходной характеристикой рассматриваемого измерительного устройства является зависимость резонансной частоты чувствительного элемента от измеряемого параметра, в данном случае от концентрации смеси веществ. Для получения такой зависимости, выраженной либо функционально, либо графически, прежде всего, необходимо построить теоретическую модель ЧЭ, которую можно представить в виде эквивалентной электрической схемы, изображенной на рис. 2 и состоящей из индуктивностей L_1 , L_2 и отрезка длиной линии, имеющего волновое сопротивление W и длину l . В точке подключения L_1 (или L_2 , в зависимости от выбора точки подключения электронного блока) полное комплексное сопротивление этой схемы Z_i будет складываться из параллельного соединения индуктивности L_1 и входного сопротивления отрезка длиной линии, нагруженного на оконечную индуктивность L_2 .

Рис. 2. Эквивалентная электрическая схема чувствительного элемента

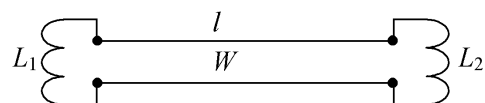


Рис. 3. Поперечное сечение коаксиальной линии передачи с изолированным эксцентричным внутренним проводником.

- 1 – экран;
- 2 – изолирующая оболочка внутреннего проводника;
- 3 – внутренний проводник

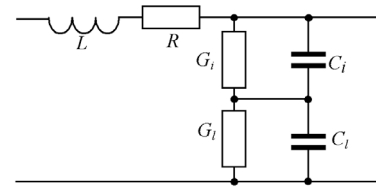
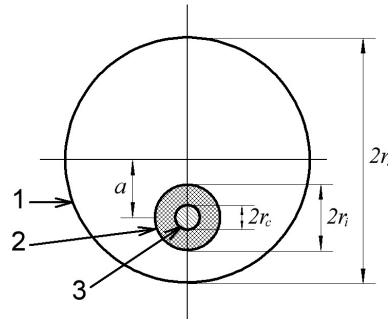


Рис. 4. Эквивалентная схема элементарного участка длинной линии

Сопротивление Z_L индуктивности L_1 определяется по формуле

$$Z_L = j\omega L_1, \quad (5)$$

а для сопротивления Z_1 отрезка длинной линии в точке подключения L_1 , нагруженного на оконечную индуктивность L_2 , справедлива следующая формула (Ефимов, 1964)

$$Z_1 = W(j\omega L_2 \operatorname{ch} \gamma l + W \operatorname{sh} \gamma l) / (W \operatorname{ch} \gamma l + j\omega L_2 \operatorname{sh} \gamma l), \quad (6)$$

где γ – коэффициент распространения электромагнитной волны в отрезке длинной линии.

Учитывая (5) и (6), полное сопротивление Z_t может быть рассчитано по формуле

$$Z_t = Z_1 Z_L / (Z_1 + Z_L). \quad (7)$$

Поскольку объектом исследования являются, как правило, жидкости с диэлектрическими потерями, то γ и W в формуле (6) являются комплексными величинами и могут быть представлены в следующей форме:

$$\gamma = \sqrt{(R + j\omega L)(G + j\omega C)}, \quad (8)$$

$$W = \sqrt{(R + j\omega L) / (G + j\omega C)}, \quad (9)$$

где R – погонное сопротивление длинной линии, обусловленное омическими потерями в проводниках этой линии; L – погонная индуктивность длинной линии; G, C – погонные эквивалентные проводимость жидкости, заполняющей ЧЭ, и емкость длинной линии, соответственно.

Внутренний проводник длинной линии имеет изоляционное покрытие, и поэтому жидкость, заполняющая ЧЭ, является двухслойной. На рис. 3 изображено поперечное сечение длинной линии с двухслойным диэлектриком. Для упрощения теоретического рассмотрения ЧЭ на этом рисунке представлен в виде отрезка длинной линии с одним эксцентричным внутренним проводником. Длина этой линии должна вдвое превышать длину двухпроводной линии, изображенной на рис. 1. Это обусловлено требованием обеспечения эквивалентности основных параметров этих двух линий. Исходя из этого, элементарный участок длинной линии (рис. 3) можно представить в виде эквивалентной схемы (рис. 4), на которой обозначено: G_i, C_i – погонные проводимость и емкость области длинной линии, занимаемой изоляционным покрытием; G_l, C_l – погонные проводимость и емкость области длинной линии, занимаемой контролируемой жидкостью. В этом случае комплексная погонная проводимость линии будет составлять

$$G_d = (G_i + j\omega C_i)(G_l + j\omega C_l) / (G_i + G_l + j\omega C_i + j\omega C_l). \quad (10)$$

В соответствии с (Ефимов, 1964), погонные проводимости G_l и G_i можно определить из соотношений:

$$G_l = \omega C_l \operatorname{tg} \delta_l \text{ и } G_i = \omega C_i \operatorname{tg} \delta_i, \quad (11)$$

где $\operatorname{tg} \delta_i, \operatorname{tg} \delta_l$ – тангенс угла диэлектрических потерь в изолирующей оболочке проводника и в контролируемой жидкости, соответственно.

Величиной G_l в (10) можно пренебречь, так как проводимость изоляции в большинстве случаев намного меньше, чем проводимость измеряемой среды, и тогда можно записать

$$G_d = j\omega C_i (G_i + j\omega C_i) / (G_i + j\omega C_i + j\omega C_l), \quad (12)$$

или, подставляя (11) в (12),

$$G_d = j\omega C_i / \{1 + jC_l / [C_i(j + \operatorname{tg} \delta_i)]\}. \quad (13)$$

Для составления полной математической модели ЧЭ необходимы еще формулы для C_l и C_i (Иоссель и др., 1969).

Погонная емкость конденсатора с эксцентричным внутренним проводником равна

$$C_i = 2\pi\epsilon_0\epsilon_i / \text{arch}[(r_w^2 + r_s^2 - a^2)/(2r_w r_s)], \quad (14)$$

где r_w – радиус изолирующей оболочки внутреннего проводника; a – расстояние между центрами внутреннего проводника и внешней оболочки.

Погонная емкость коаксиального конденсатора, состоящего из внутреннего проводника с радиусом r_c и воображаемого внешнего проводника с радиусом r_w равна

$$C_i = 2\pi\epsilon_0\epsilon_i / \ln(r_w/r_c). \quad (15)$$

Погонную индуктивность L можно определить, используя формулу для волнового сопротивления линии с эксцентричным внутренним проводником и воздушным заполнением W_0 (Мейнке, Гундлах, 1960)

$$W_0 = 60 \text{arch}[(r_s^2 + r_c^2 - a^2)/(2r_s r_c)], \quad (16)$$

и формулу для погонной емкости линии с эксцентричным внутренним проводником и воздушным заполнением C_0 , используя следующее соотношение:

$$C_0 = 2\pi\epsilon_0 / \text{arch}[(r_s^2 + r_c^2 - a^2)/(2r_s r_c)]. \quad (17)$$

Используя формулы (16), (17), а также формулу (9), записанную для длинной линии без потерь, т.е. без членов R и G , можно получить формулу для L :

$$L = W_0^2 C_0 = 2 \cdot 10^{-7} \text{arch}[(r_s^2 + r_c^2 - a^2)/(2r_s r_c)]. \quad (18)$$

Резонансная частота ЧЭ определяется по максимуму резонансной кривой или по экстремальному значению полного входного сопротивления Z_i . Это входное сопротивление имеет максимальное значение при равенстве нулю его мнимой части. Также резонансную частоту можно найти, приравняв нулю производную от реальной составляющей входного сопротивления Z_i . Следовательно, для определения резонансной частоты необходимо решить относительно ω одно из уравнений

$$\text{Im}(Z_i) = 0 \text{ либо } d(\text{Re}(Z_i))/d\omega = 0. \quad (19)$$

Решение каждого из этих уравнений в виде функциональных зависимостей $\omega = \omega(N)$, где N – измеряемый параметр (например, концентрация бинарного раствора), представляет значительные трудности, поскольку уравнения (19) являются трансцендентными. Поэтому были использованы методы численного анализа, заложенные в программе Matlab 7.

Приведенная выше совокупность формул вполне достаточна для составления на основе Matlab 7 соответствующей программы вычисления резонансной частоты в зависимости от N . В качестве контролируемой жидкости был взят водный раствор хлористого натрия (NaCl), концентрация которого изменялась в диапазоне 0,05÷5 моль/л. Значения ϵ_i и $\text{tg}\delta_i$ этого раствора при температуре 20 °С в зависимости от его концентрации N , выраженной в моль/литр раствора, приведены в таблице (Ахадов, 1977). При этом значения $\text{tg}\delta_i$, которые в этом справочнике отсутствуют, были вычислены по известной формуле (Ахадов, 1977)

$$\text{tg}\delta = \epsilon''/\epsilon',$$

где ϵ' , ϵ'' – действительная и мнимая части диэлектрической проницаемости контролируемой жидкости, соответственно.

Таблица

| N | 0,05 | 0,2 | 0,5 | 1 | 1,5 | 2 | 2,5 | 3 | 3,5 | 4 | 4,5 | 5 |
|---------------------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|
| ϵ' | 61,9 | 60,7 | 58,4 | 55,2 | 52,4 | 49,8 | 47,5 | 45,2 | 42,9 | 40,5 | 38,5 | 36,6 |
| ϵ'' | 31,5 | 32,7 | 35,6 | 38,8 | 42,5 | 45,8 | 48,5 | 51,0 | 53,0 | 53,5 | 54,2 | 55,4 |
| $\text{tg}\delta_i$ | 0,51 | 0,54 | 0,61 | 0,70 | 0,81 | 0,92 | 1,02 | 1,13 | 1,24 | 1,32 | 1,41 | 1,51 |

На основе числовых данных таблицы и конкретных конструктивных параметров ЧЭ, а именно: $r_s = 20$ мм, $r_c = 1,2$ мм, $l = 200$ мм, $a = 5$ мм, с помощью программы Matlab 7 было получено семейство соответствующих графиков нормированных зависимостей $\omega(N)/\omega(N_{\min})$ (рис. 5 и рис. 6), где $N_{\min} = 0,05$ моль/л – минимальное значение концентрации раствора. На этих графиках величины r_w и ϵ_i являются варьируемыми и изменяются в диапазоне: $r_w = 1,6\div 4$ мм, $\epsilon_i = 2,2\div 10$.

Из рассмотрения рис. 5 и рис. 6 видно, что максимальная чувствительность достигается при $r_w = 2,5$ мм и $\epsilon_i = 6$. Следовательно, эти параметры и являются оптимальными для данной конструкции ЧЭ. Однако, следует отметить, что физически проще варьировать значение r_w , чем ϵ_i , так как в последнем случае необходимо подбирать диэлектрические материалы с соответствующим значением ϵ_i .

Таким образом, используя предложенную математическую модель данного ЧЭ, с помощью программы Matlab можно достаточно легко рассчитать выходные характеристики измерительного устройства для различных значений конструктивных параметров этого ЧЭ.

Рис. 5. Семейство выходных характеристик измерительного устройства для различных значений диэлектрической проницаемости ϵ_i изолирующей оболочки при $r_w=2,0$ мм центрального провода

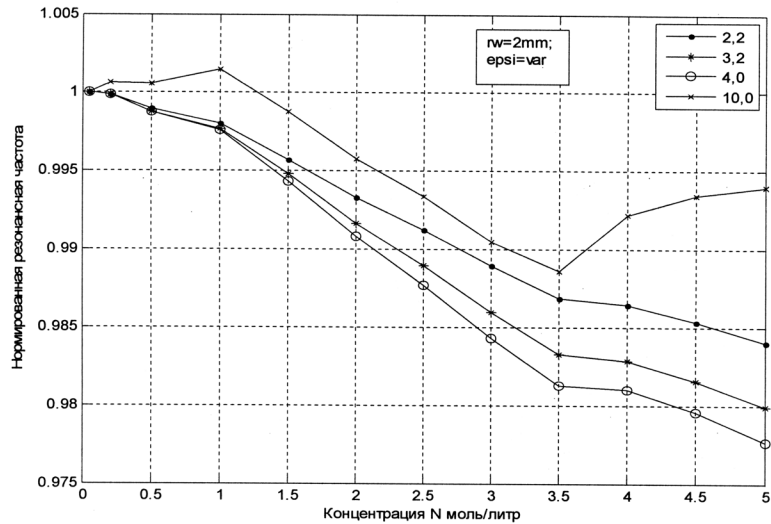
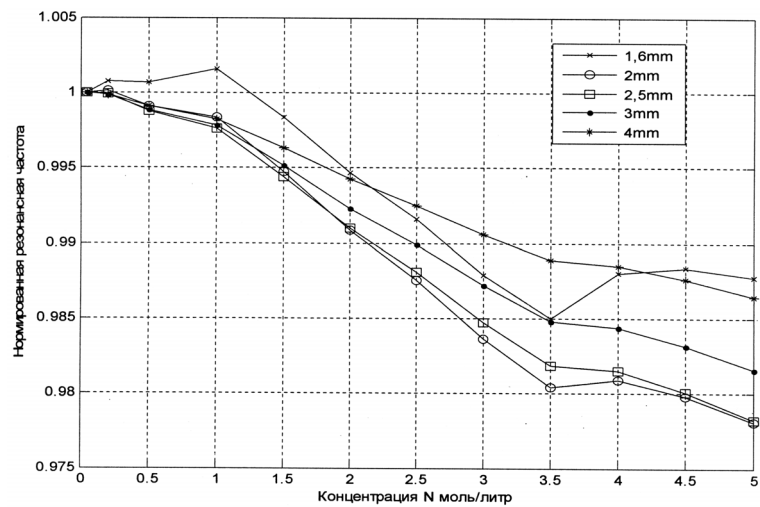


Рис. 6. Семейство выходных характеристик измерительного устройства при различных значениях радиуса изолирующей оболочки r_w для $\epsilon_i=6$



5. Заключение

Таким образом, рассмотренное радиочастотное устройство обеспечивает расширение области применения, позволяя производить измерения физических свойств жидкости при значительном удалении электронного блока от контролируемого объекта и при минимальном влиянии кабелей связи на точность измерения. Предложенная математическая модель чувствительного элемента позволяет оптимизировать его конструктивные параметры с точки зрения повышения чувствительности к измеряемым физическим свойствам жидкости и обеспечения однозначности измерений. Это устройство может быть применено для контроля концентрации смесей (растворов) жидкостей, в том числе влагосодержания жидкостей, и других физических свойств веществ.

Литература

- Ахадов Я.Ю. Диэлектрические свойства бинарных растворов. М., Наука, 400 с., 1977.
 Брандт А.А. Исследование диэлектриков на сверхвысоких частотах. М., Физматгиз, 404 с., 1963.
 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., Наука, 208 с., 1989.
 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.
 Ефимов И.Е. Радиочастотные линии передачи. М., Советское Радио, 600 с., 1964.
 Иосель Ю.Я., Кочанов Э.С., Струнский М.Г. Расчет электрической емкости. М., Энергия, Ленингр. отделение, 240 с., 1969.
 Мейнке Х., Гундлах Ф. Радиотехнический справочник. М., Госэнергоиздат, 416 с., 1960.