

УДК 532.57; 621.371.3

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПАРАМЕТРОВ СЛОИСТОЙ СРЕДЫ ПО РЕЗОНАНСНЫМ ЧАСТОТАМ РАДИОВОЛНОВОГО ЗОНДА

Б.В. Лункин

Институт проблем управления им. В.А. Трапезникова РАН
Россия, 117997, Москва, Профсоюзная ул., 65
E-mail: lunbv@ipu.ru

Н.А. Криксунова

Институт проблем управления им. В.А. Трапезникова РАН
Россия, 117997, Москва, Профсоюзная ул., 65
E-mail: krikni@ipu.ru

Ключевые слова: слоистые среды, границы раздела, радиочастотный зонд, резонансные частоты, алгоритм измерения.

Аннотация: Для измерения параметров слоистых сред – положения границ раздела между слоями и их диэлектрических проницаемостей предложен радиочастотный зонд в виде W-образного отрезка длинной линии. Зонд возбуждают на нескольких низших резонансных частотах. Установлены зависимости резонансных частот от контролируемых параметров для двух типов приближений. Проведены их сравнительные оценки по точности. Получены системы уравнений, которые позволяют определить параметры двух- и трехслойных сред по измеренным резонансным частотам зонда, погруженного в эти среды.

1. Введение

Для измерений физических параметров в расслоенных средах с переменными границами раздела между слоями применяют несколько датчиков с отличающимися функциями преобразования первичной информации; при этом система измерения существенно усложняется.

Последнее обстоятельство обуславливает исследование тех методов измерения, которые позволяют формировать несколько каналов получения информации в одном зонде. К ним, в частности, относится радиочастотный метод. На базе зависимостей собственных частот от параметров среды формируется система уравнений для нахождения из нее положений границ раздела (ПГР) и диэлектрических проницаемостей (ДП) по измеренным собственным частотам.

2. О приближенных зависимостях резонансных частот зонда

Резонансные частоты радиоволновых зондов, погруженных в слоистую среду, являются интегральными характеристиками, определяемыми структурой возбуждаемого в нем поля и граничными условиями. Сложность нахождения векторов электрических и

магнитных составляющих поля и трудности их математического описания вынуждают обращаться к методам, устанавливающим приближенные зависимости резонансных частот от контролируемых параметров. Эти зависимости, позволяют найти по измеренным частотам не только оценочные величины параметров, но в некоторых случаях близкие к их точным значениям.

Определение резонансных частот можно существенно упростить, если предположить неизменяемость распределения электрической напряженности при перемещениях границ раздела между слоями (первое приближение [1]).

В качестве зонда будем рассматривать направляющую электромагнитную систему в виде короткозамкнутой на концах однородной длинной линии с изломами на крайних границах диапазона измерения (W-зонд). Выбор такой конфигурации обусловлен возможностью получения гладких функций, описывающих зависимости низких собственных частот от положения границы раздела двухслойной среды для разных соотношений диэлектрических проницаемостей слоев.

Более точные значения резонансных частот могут быть получены последовательным вычислением входных сопротивлений в линии, начиная с ее левого и правого концов и приравниванием их реактивных составляющих в каком-либо сечении линии. Этот метод также является приближенным, но с более высокой точностью (второе приближение [2]).

Соотношения, полученные по двум приближениям, пригодны для диэлектрических слоев, однако они могут быть применены для вычисления параметров зонда при заполнении его средами, содержащими проводящий слой, но в этом случае зонд должен быть покрыт диэлектрической оболочкой по всей высоте диапазона измерения. При этом диэлектрические параметры всех слоев должны быть заменены на эквивалентные значения диэлектрических проницаемостей, которые могут быть найдены вычислением частичных погонных емкостей этих зондов, погруженных в слоистую среду.

3. Приближенные алгоритмы измерения параметров слоев

Алгоритмы определения параметров слоев исследованы на примерах конкретных задач измерения с применением зависимостей резонансных частот первого и второго приближений. Для некоторых из них моделированием погрешностей измерения резонансных частот [3] получены оценки погрешностей определения параметров.

3.1. Зонд погружен в двухслойную среду

Задача измерения формулируется следующим образом. В резервуаре содержится среда, расслоенная на два слоя с неизвестными параметрами – положением границы раздела между слоями и их диэлектрическими проницаемостями. Исследуются алгоритмы определения этих параметров по измеренным резонансным частотам первых трех возбуждаемых в зонде типов колебаний с учетом погрешностей их измерения. Соотношения, устанавливающие связь между контролируемыми параметрами и резонансными частотами зонда по первому приближению, имеют следующий вид (1), где $\varepsilon_1, \varepsilon_2$ – ДП сред, соответственно, нижнего и верхнего слоев, x – ПГР, отнесенное к диапазону измерения, $F_i = (f_{0i} / f_{1i})^2 - 1$, f_{0i} – частоты зонда, полностью заполненного воздухом, f_{1i} – частоты зонда для промежуточных значений параметров ($i = 1, 2, 4$).

$$(1) \quad \begin{cases} (\varepsilon_1 - \varepsilon_2) * x + (\varepsilon_2 - 1) = F_1 \\ (\varepsilon_1 - \varepsilon_2) * \left[x + \frac{1}{\pi} \sin(\pi x) \right] + (\varepsilon_2 - 1) = F_2 \\ (\varepsilon_1 - \varepsilon_2) * \left[x + \frac{1}{2\pi} \sin(2\pi x) \right] + (\varepsilon_2 - 1) = F_4 \end{cases},$$

Такие же соотношения получены для второго приближения в виде (2), где $l/4$ – диапазон измерения ПГР (м), c – скорость света (м/сек).

$$(2) \quad \frac{\operatorname{tg}\left(\frac{2\pi f_{i2} \sqrt{\varepsilon_2}}{c} \left(\frac{l}{4} - x\right)\right) + \sqrt{\frac{\varepsilon_2}{\varepsilon_1}} \operatorname{tg}\left(\frac{2\pi f_{i2} \sqrt{\varepsilon_1}}{c} 2x\right)}{1 - \sqrt{\frac{\varepsilon_2}{\varepsilon_1}} \operatorname{tg}\left(\frac{2\pi f_{i2} \sqrt{\varepsilon_2}}{c} \left(\frac{l}{4} - x\right)\right) \operatorname{tg}\left(\frac{2\pi f_{i2} \sqrt{\varepsilon_1}}{c} 2x\right)} = \operatorname{ctg}\left(\frac{2\pi f_{i2} \sqrt{\varepsilon_2}}{c} \left(\frac{l}{4} - x\right)\right).$$

Для сравнительной оценки типов приближения вычислены значения резонансных частот зонда по формулам (1) и (2) при заполнении его двухслойной средой с разными ДП. Разность вычисленных функций растет с увеличением ДП и достигает максимальных значений в окрестности $x \approx 0,4 - 0,6$. Эти значения зависят от типа колебаний: среди возбуждаемых в зонде колебаний значения отклонений на четвертой частоте в пять раз превышают отклонения на двух других частотах.

Практический интерес представляет задача измерения параметров слоистой среды «пар – дистиллированная вода» в замкнутом резервуаре, существенно изменяющих свои значения в зависимости от температуры и давления. Соответственно, диэлектрические проницаемости могут изменяться для воды от 81 до 12,5, для пара от 1,001 до 2,5.

Исследованы возможности определения ПРГ и ДП по резонансным частотам зондов двух типов – в изолирующей оболочке и без нее. На рис. 1 приведены графики зависимостей первой низшей частоты, умноженные на 10^{-7} , от ПГР для разных ДП воды и пара по формуле (2): график 1- для зонда без оболочки, $\varepsilon_1 = \varepsilon_B = 81$, $\varepsilon_2 = \varepsilon_{II} = 1,0$; график 2 – для зонда в оболочке, те же ε_B и ε_{II} , но в формулу нужно подставлять эквивалентные ДП $\varepsilon_B^* = 5,438$ и $\varepsilon_{II}^* = 1,554$; график 3 – для зонда в оболочке, $\varepsilon_B^* = 4,547$ ($\varepsilon_B = 12,57$), $\varepsilon_{II}^* = 2,512$ ($\varepsilon_{II} = 2,751$); ДП изолирующей оболочки $\varepsilon_{II} = 3,0$.

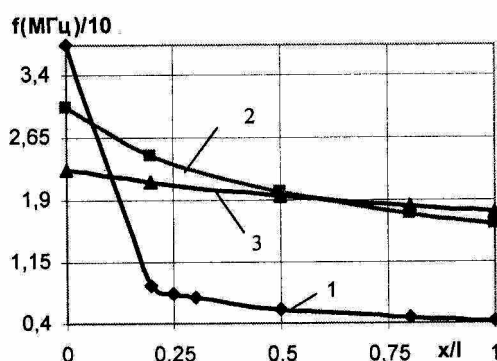


Рис. 1. Графики зависимостей первой резонансной частоты от положения границы раздела «пар-вода» для разных диэлектрических проницаемостей.

Потери в дистиллированной воде невелики, и нет надобности применять в зонде оболочку. Однако, если учитывать погрешность измерения резонансных частот, то не для всех значений параметров системы (1) и (2) имеют решения. Для зонда с оболочкой этой проблемы не существует.

Рассматриваемый метод «идеален» как с точки зрения конструкции зонда (не требуется оболочка), так и точности приближенных алгоритмов, для задач измерения параметров криогенных жидкостей, расслоенных на жидкую и газовую составляющие, в замкнутых резервуарах в условиях изменяющихся температуры и давления.

3.2. Зонд погружен в трехслойную среду

Рассматривается трехслойная диэлектрическая среда в резервуаре. В общем случае не известны пять параметров слоев – два ПГР и три ДП. Один из слоев может быть проводящим, но покрытием проводников изолирующей оболочкой задачу можно свести к измерениям диэлектрических слоев, заменяя значения физических величин ДП на их эквивалентные.

Структурная схема зонда с трехслойной средой и с необходимыми обозначениями, ее эквивалентная электрическая схема для расчета входных сопротивлений и резонансных частот по второму типу приближения показаны на рис. 2. Разбиением на условные участки линии от ее левого конца к правому, входное сопротивление определяется таким образом, что предыдущий участок оказывается нагрузкой для следующего. Т.к. линия симметричная, можно рассматривать только половину линии. При этом ее левый конец замкнут, а правый – для первой частоты разомкнут, а для всех четных замкнут (в рассматриваемой задаче эти частоты имеют номера – от второй до восьмой).

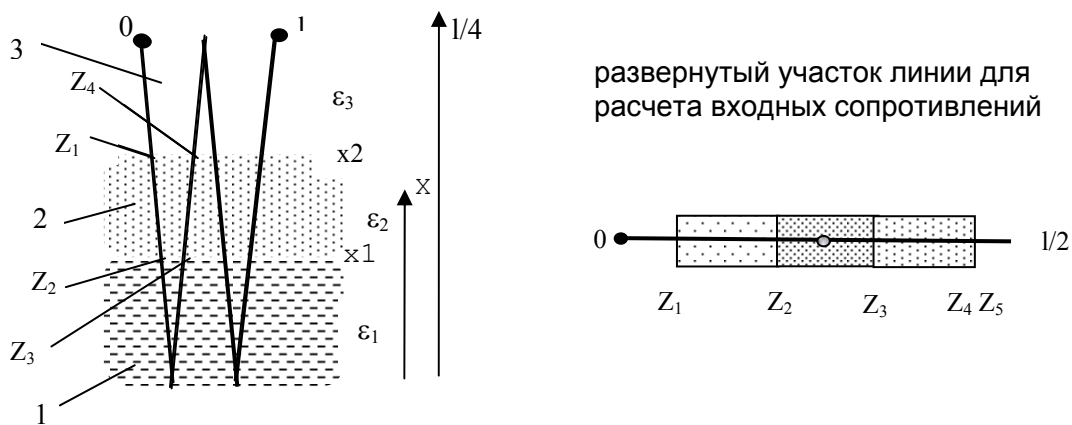


Рис. 2. Схема зонда, погруженного в трехслойную среду.

В общем виде входное сопротивление первых четырех участков определяется как (3), где n – номер участка, ($i=1, 2, 4, 6, 8$); $W_m = W/\varepsilon_m^{1/2}$ – волновое сопротивление участка

$$(3) \quad Z_n = j|Z_{n-1}| \frac{1 + \frac{W_m}{Z_{n-1}} \operatorname{tg} \left(\frac{2\pi f_i \sqrt{\varepsilon_m}}{c} \zeta_n \right)}{1 - \frac{Z_{n-1}}{W_m} \operatorname{tg} \left(\frac{2\pi f_i \sqrt{\varepsilon_m}}{c} \zeta_n \right)}$$

линии, погруженного в среду ε_m , ($m=1, 2, 3$). Условием резонанса является равенство входных сопротивлений в четвертой точке, в которой входное сопротивление четверто-

го участка слева равно входному сопротивлению пятого справа, $Z_4=Z_5$. Для первой частоты $Z_5 = -jW_3 \operatorname{ctg}(2\pi f_1 \varepsilon_3^{1/2} \zeta_5 / c)$, для четных частот $-Z_5 = jW_3 \operatorname{tg}(2\pi f_i \varepsilon_3^{1/2} \zeta_5 / c)$.

Подставляя последовательно Z_n получим сложное трансцендентное уравнение для вычисления резонансных частот для заданных ПГР и ДП (из-за объемности эта формула в данной статье не приводится).

Более простые соотношения, устанавливающие зависимости пяти параметров слоев и пяти резонансных частот можно получить по первому приближению, в виде (4).

$$(4) \quad (\varepsilon_1 - \varepsilon_2) \left\{ x_1 - \frac{1}{\pi * i} \sin\left(\frac{\pi}{2} i x_1\right) * \left[\cos\left(\frac{\pi * i}{2}\right) + \cos\left(\frac{3\pi * i}{2}\right) \right] \right\} + (\varepsilon_2 - \varepsilon_3) * \\ \left\{ x_2 - \frac{1}{\pi * i} \sin\left(\frac{\pi}{2} i x_2\right) * \left[\cos\left(\frac{\pi * i}{2}\right) + \cos\left(\frac{3\pi * i}{2}\right) \right] \right\} + \varepsilon_3 - 1 = F_i, \quad i = 1, 2, 4$$

Из них можно составить систему уравнений, решением которых по измеренным частотам можно определить параметры слоистой среды. Как показали исследования, приемлемые по точности решения могут быть получены при высоких показателях точности измерения резонансных частот.

В частных случаях, когда один, два параметра известны и не меняются в процессе измерения, соответственно уменьшается число измеряемых резонансных частот возбуждаемых в зонде колебаний можно получить погрешности измерения параметров, соизмеримые с погрешностями определения резонансных частот. Примером является задача измерения количества топлива в баках транспортных средств и нефтепродуктов в стационарных резервуарах, содержащих слои воды и газа [3].

4. Заключение

Полученные формулы для резонансных частот пригодны для диэлектрических слоев, однако они могут быть применены при заполнении его средами, содержащими проводящий слой, но в этом случае зонд должен быть покрыт диэлектрической оболочкой по всей высоте диапазона измерения.

При измерениях всех пяти параметров трехслойной среды приемлемые по точности решения могут быть получены при высоких показателях точности измерения резонансных частот. При их практически возможных точностях измерения вопрос получения решений остается открытым.

В частных случаях трехслойной среды, когда один, два параметра известны и не меняются в процессе измерения, соответственно уменьшается число измеряемых резонансных частот возбуждаемых в зонде колебаний, а также при измерениях параметров двухслойной среды можно получить погрешности измерения параметров, соизмеримые с погрешностями определения резонансных частот.

Список литературы

1. Никольский В.В. Электродинамика и распространение радиоволн. М.: Наука, 1978. 543 с.
2. Викторов В.А., Лункин Б.В., Совлуков А.С. Высокочастотный метод измерения неэлектрических величин. М.: Наука, 1973. 279 с.
3. Lunkin B.V., Kriksunova N/A. Algorithm for Determining the Dielectric Constant and the Amount of Fuel in Three-Layer Media by Radio-Frequency Monitoring // Measurement Techniques. 2016. Vol. 59, No 4. P. 416-422.