УДК 621.372.413–42

ВЫБОР РАБОЧЕГО ВИДА КОЛЕБАНИЙ ПРЯМОУГОЛЬНОГО РЕЗОНАТОРА ПРИ ОПРЕДЕЛЕНИИ МАЛЫХ ИЗМЕНЕНИЙ ДИЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ПРОНИЦАЕМОСТИ ВЕЩЕСТВ

М. П. Пархоменко, И. С. Еремин, В. М. Колесникова

ФИРЭ им. В. А. Котельникова РАН, г. Фрязино

Проведен анализ резонаторного метода, использующего прямоугольный резонатор на видах колебаний H_{10p}, при определении малых изменений диэлектрической проницаемости исследуемого вещества. Показано, что наибольшая чувствительность получается для резонатора, работающего на виде колебаний H_{101}.

КС: резонаторный метод, вид колебаний, диэлектрическая проницаемость вещества, миллиметровый диапазон

The analysis of a resonator method using the rectangular resonator on H_{10p} oscillation modes was made while defining small changes of dielectric permeability of the substance under investigation. It was shown that resonator operating on H_{101} oscillation mode had the highest sensitivity.

Keywords: resonator method, oscillation mode, dielectric permeability of the substance, millimeter range

Для определения комплексной диэлектрической проницаемости материалов широко используются резонаторные методы, одним из достоинств которых является возможность регистрировать малые изменения диэлектрической проницаемости исследуемых материалов. Эта проблема имеет важное значение при исследовании, например, состава крови, водных растворов с малым содержанием глюкозы, соли и т. д. В данной работе для решения этой проблемы предлагается резонаторный метод, построенный на базе резонатора отражательного типа, в котором исследуемый сильно поглощающий материал выполняет роль задней стенки резонатора (рис. 1). В этом случае, используя резонансную зависимость резонатора, а также данные по резонансной частоте и коэффициенту отражения на резонансной частоте, путем решения обратной задачи находятся составляющие ε_1 и ε_2 комплексной диэлектрической проницаемости $\varepsilon = \varepsilon_1 - j\varepsilon_2$ исследуемого материала.

Отражательный резонатор с подводящим волноводом, построенный на основе прямоугольного металлического волновода с рабочим типом волны H_{10}, показан на рис. 1. Он включает в себя: индуктивную диафрагму *1*, прямоугольный волновод резонатора *2*, заполненный фторопластом *3*, и исследуемый объект *4*. В данной конструкции исследуемый объект размещен в емкости *5*, которая располагается на волноводе резонатора. Индуктивная диафрагма выполняет роль передней стенки резонатора, а объект

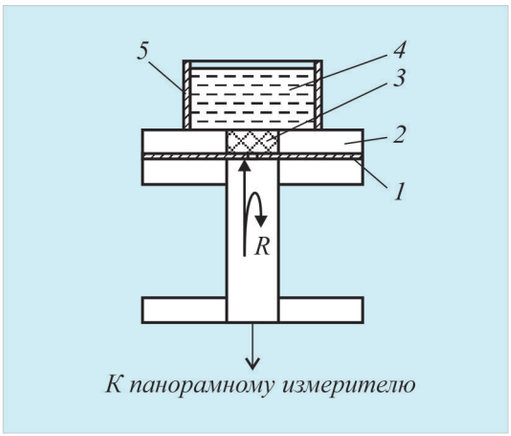

Рис. 1. Резонатор отражательного типа (с подводящим волноводом):

1 – индуктивная диафрагма; *2* – волновод резонатора; *3* – фторопласт; *4* – исследуемый объект в ёмкости *5*; *R* – коэффициент отражения резонатора

4(527).indd 91 17.12.2015 11:26:36

– задней. В резонаторе используется вид колебаний H_{10p}, где индекс p определяет число полуволн, укладывающихся на длине резонатора l_p.

Далее представим решение важной практической задачи – определить вид колебаний H_{10p} в резонаторе, на котором малые изменения диэлектрической проницаемости вещества (на одинаковую величину) приводят к наибольшим изменениям частоты резонансного минимума и коэффициента отражения в минимуме резонансной кривой. Для этого рассчитаем для каждого вида колебаний резонансные кривые резонатора, т. е. зависимости коэффициента отражения R резонатора от частоты f. Расчет произведем для резонатора, нагруженного на *дистиллированную воду* при температурах 37 и 36 °С в миллиметровом диапазоне волн (в диапазоне частот 30,5… 31,5 ГГц). Значения составляющих комплексной диэлектрической проницаемости воды возьмем из [1]. Все расчеты проводились с использованием трехмерного электродинамического программного пакета HFSS.

Сначала рассчитаем резонансные кривые при температуре воды 37 °С. На частоте 30,71 ГГц при этой температуре составляющие диэлектрической проницаемости воды равны: $\varepsilon_1 = 33{,}0127$, $\varepsilon_2 = 33{,}7927$ [1]. Волновод имеет поперечные размеры $a \times b = 7{,}11 \times 3{,}56$ мм. Толщина медной индуктивной диафрагмы составляет 0,28 мм, ее поперечные размеры раскрыва обозначим как $a_1 \times b_1$; причем $b_1 = b = 3{,}56$ мм. Диэлектрическая проницаемость фторопласта равна 2,04; тангенс угла потерь – $2{,}5 \cdot 10^{-4}$. Расчет проведем для трех длин l_p резонатора, а именно, когда на длине резонатора укладывается одна, три и семь полуволн (т. е. $p = 1; 3; 7$).

Для случая $p = 1$ (вид колебаний H_{101}) зададим длину резонатора 3,00 мм. Изменяя размер раскрыва a_1 индуктивной диафрагмы, рассчитаем для каждого размера резонансные кривые и определим режим критической связи. Расчетные резонансные кривые резонатора для трех режимов его работы (критической связи, а также недосвязи и пересвязи по уровням минимумов коэффициента отражения минус 30 и 40 дБ) представлены на рис. 2. Критическая связь наблюдается при $a_1 = 3{,}476$ мм на частоте 30,8490 ГГц, минимум коэффициента отражения составляет минус 60,1016 дБ. В табл. 1 собраны данные по каждой расчетной резонансной кривой. Здесь a_1 – ширина раскрыва диафрагмы, f_{min} – частота минимума и R_{min} – значение коэффициента отражения резонатора в минимуме резонансной кривой.

Для случая $p = 3$ (вид колебаний H_{103}) вначале определялась длина резонатора. Для этого устанавливался фиксированный размер раскрыва диафрагмы $a_1 = 3{,}476$ мм (т. е. равный размеру в случае критической связи при $p = 1$) и путем изменения длины резонатора находился режим

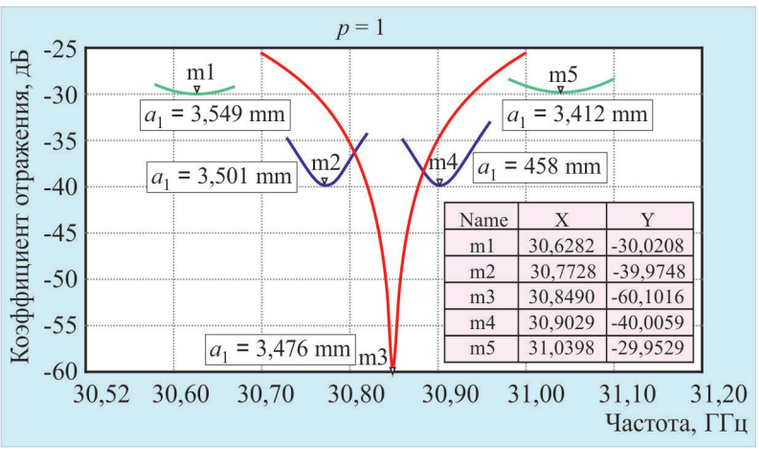

Рис. 2. Расчетные резонансные кривые резонатора для случая $p = 1$ при различных размерах раскрыва a_1 индуктивной диафрагмы ($b_1 = 3{,}56$ мм, $t = 37$ °С)

4(527).indd 92 17.12.2015 11:26:36

Таблица 1

p = 1 (вид колебаний H_{101}), l_p = 3,00 мм		
a_1, мм	f_{min}, ГГц	R_{min}, дБ
3,549	30,6282	-30,0208
3,501	30,7728	-39,9748
3,476	**30,8490**	**-60,1016**
3,458	30,9029	-40,0059
3,412	31,0398	-29,9529

критической связи. Режим критической связи обнаружился при длине резонатора 10,71 мм на частоте минимума резонансной кривой 30,9287 ГГц, коэффициент отражения составил минус 65,3505 дБ. После этого фиксировалась длина резонатора и рассчитывались резонансные зависимости при размерах a_1 диафрагмы в режимах недосвязи и пересвязи. Графики этих зависимостей при критической связи, а также в режимах недосвязи и пересвязи по уровням минимумов коэффициента отражения минус 30 и 40 дБ показаны на рис. 3. В табл. 2 представлены данные по этим расчетным резонансным кривым.

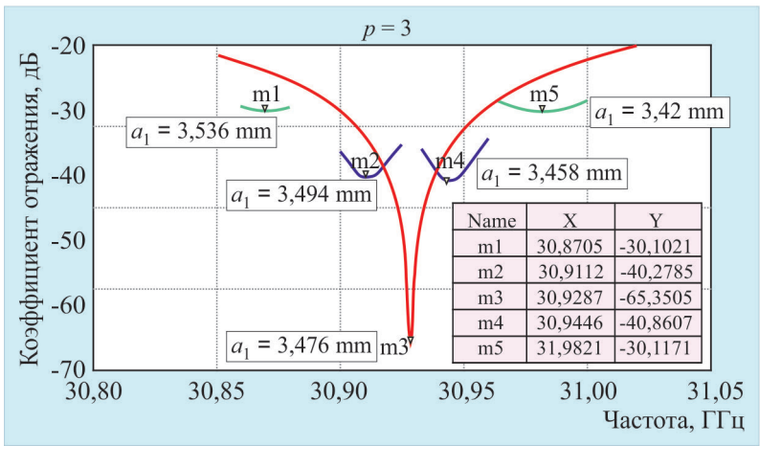

Рис. 3. Расчетные резонансные кривые резонатора для случая p = 3 при различных размерах раскрыва a_1 индуктивной диафрагмы (b_1 = 3,56 мм, t = 37 °С)

Таблица 2

p = 3 (вид колебаний H_{103}), l_p = 10,71 мм		
a_1, мм	f_{min}, ГГц	R_{min}, дБ
3,536	30,8705	-30,1021
3,494	30,9112	-40,2785
3,4760	**30,9287**	**-65,3505**
3,458	30,9446	-40,8607
3,420	30,9821	-30,1171

Аналогично проводились расчеты для случая p = 7 (вид колебаний H_{107}). При фиксированном размере a_1 = 3,476 мм диафрагмы путем изменения длины резонатора находился режим критической связи. Критическая связь наблюдалась при длине резонатора 25,953 мм на часто-

4(527).indd 93 17.12.2015 11:26:37

на частоте минимума резонансной кривой 31,1088 ГГц, коэффициент отражения составил минус 83,4390 дБ. Затем, как и в предыдущем случае, фиксировалась длина резонатора и рассчитывались резонансные зависимости при размерах a_1 диафрагмы в режимах недосвязи и пересвязи. Графики этих зависимостей показаны на рис. 4, а в табл. 3 приведены данные по этим расчетным резонансным кривым.

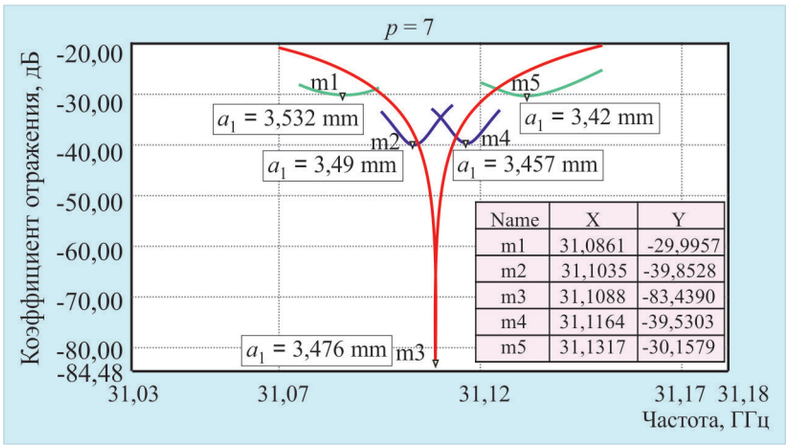

Рис. 4. Расчетные резонансные кривые резонатора для случая $p = 7$ при различных размерах раскрыва a_1 индуктивной диафрагмы ($b_1 = 3{,}56$ мм, $t = 37$ °С)

Таблица 3

$p = 7$ (вид колебаний H_{107}), $l_p = 25{,}953$ мм		
a_1, мм	f_{min}, ГГц	R_{min}, дБ
3,532	31,0861	-29,9957
3,490	31,1035	-39,8528
3,476	**31,1088**	**-83,4390**
3,457	31,1164	-39,5303
3,420	31,1317	-30,1579

Далее рассчитывались резонансные зависимости каждого резонатора, нагруженного на дистиллированную воду, при температуре 36 °С. Для каждого случая длина l_p резонатора и размеры раскрыва a_1 диафрагмы оставались такими же, как и при температуре 37 °С. Диэлектрическая проницаемость дистиллированной воды при температуре 36 °С на частоте 30,71 ГГц равна: $\varepsilon_1 = 32{,}4964$; $\varepsilon_2 = 33{,}8090$ [1]. Затем, сравнивая резонансные зависимости при температурах растворов 36 и 37 °С, находились изменения частоты резонансного минимума и коэффициента отражения в минимуме резонансных кривых. Как сказано выше, основная цель этого исследования заключалась в том, чтобы определить вид колебаний H_{10p} резонатора (т. е. фактически длину l_p резонатора в диапазоне частот 30,5…31,5 ГГц), на котором изменения частоты резонансного минимума и коэффициента отражения в минимуме резонансной кривой будут наибольшими при изменении диэлектрической проницаемости исследуемого вещества на одинаковую величину. Обратимся к полученным результатам.

4(527).indd 94 17.12.2015 11:26:37

Вначале проведем сравнение резонансных зависимостей на полуволновом резонаторе (т. е. $p = 1$, вид колебаний H_{101}) в режиме недосвязи. На рис. 5 представлены расчетные резонансные кривые резонатора по уровню минимума коэффициента отражения минус 30 дБ, нагруженного на дистиллированную воду при температурах поочередно 36 и 37 °С. Длина резонатора $l_p = 3{,}0$ мм, размер диафрагмы $a_1 = 3{,}412$ мм.

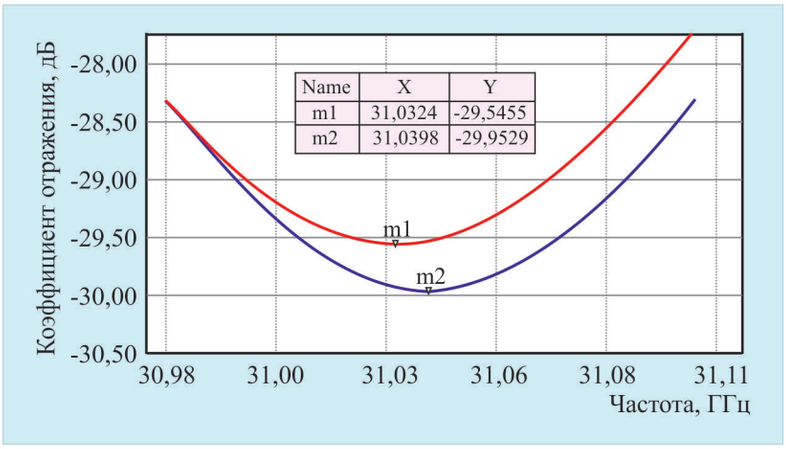

Рис. 5. Сравнение резонансных кривых резонатора в режиме недосвязи по уровню минимума коэффициента отражения минус 30 дБ ($p = 1$) при температуре воды 36 (красная кривая) и 37 °С (синяя) ($l_p = 3{,}0$ мм, $a_1 \times b_1 = 3{,}412 \times 3{,}56$ мм)

При температуре 36 °С частота минимума равнялась 31,0324 ГГц, а значение коэффициента отражения на резонансной частоте составляло минус 29,5455 дБ. При температуре 37 °С частота минимума – 31,0398 ГГц, а значение коэффициента отражения на резонансной частоте – минус 29,9529 дБ. Мы видим, что в этом случае при изменении температуры воды на один градус смещение резонансной частоты минимума составило $\Delta f_{min1} = 7{,}4$ МГц, а изменение коэффициента отражения равно $\Delta R_{min1} = 0{,}4074$ дБ.

А теперь проведем сравнение резонансных кривых по уровню минус 40 дБ. Расчетные резонансные кривые резонатора показаны на рис. 6 (режим недосвязи: $p = 1$, $l_p = 3{,}0$ мм, $a_1 = 3{,}458$ мм). При температуре 36 °С частота минимума равнялась 30,8955 ГГц, а значение коэффициента отражения на резонансной частоте составляло минус 38,7657 дБ. При температуре 37 °С частота минимума – 30,9029 ГГц, а значение коэффициента отражения на резонансной частоте – минус 40,0059 дБ. В этом случае при изменении температуры воды на один градус $\Delta f_{min1} = 7{,}4$ МГц, а $\Delta R_{min1} = 1{,}2402$ дБ.

А теперь сравним резонансные зависимости этого резонатора в режиме пересвязи. На рис. 7 представлены расчетные резонансные кривые резонатора по уровню минимума коэффициента отражения минус 30 дБ, нагруженного на воду при температурах поочередно 36 и 37 °С (режим пересвязи: $p = 1$, $l_p = 3{,}0$ мм, $a_1 = 3{,}549$ мм). При температуре 36 °С частота минимума равнялась 30,6209 ГГц, а значение коэффициента отражения на резонансной частоте составляло минус 30,4480 дБ. При температуре 37 °С частота минимума – 30,6282 ГГц, а значение коэффициента отражения на резонансной частоте – минус 30,0208 дБ. Как видно из графиков, при изменении температуры воды на один градус $\Delta f_{min1} = 7{,}3$ МГц, а $\Delta R_{min1} = 0{,}4272$ дБ.

4(527).indd 95 17.12.2015 11:26:37

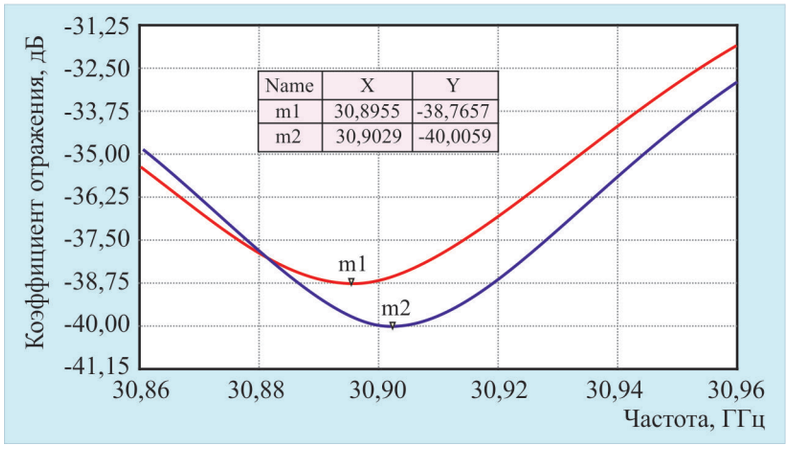

Рис. 6. Сравнение резонансных кривых резонатора в режиме недосвязи по уровню минимума коэффициента отражения минус 40 дБ (p = 1) при температуре воды 36 (красная кривая) и 37 °С (синяя) (l_p = 3,0 мм, $a_1 \times b_1$ = 3,458 × 3,56 мм)

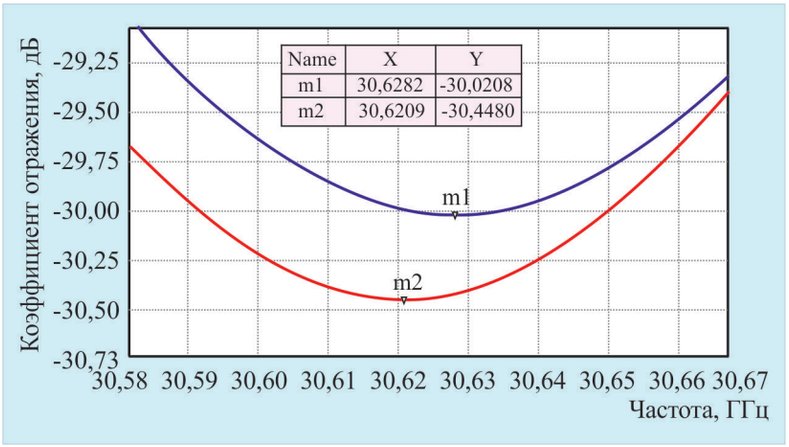

Рис. 7. Сравнение резонансных кривых резонатора в режиме пересвязи по уровню минимума коэффициента отражения минус 30 дБ (p = 1) при температуре воды 36 (красная кривая) и 37 °С (синяя) (l_p = 3,0 мм, $a_1 \times b_1$ = 3,549 × 3,56 мм)

На рис. 8 приведены расчетные резонансные кривые резонатора по уровню минимума коэффициента отражения минус 40 дБ (режим пересвязи: p = 1, l_p = 3,0 мм, a_1 = 3,501 мм). При температуре 36 °С частота минимума равнялась 30,7655 ГГц, а значение коэффициента отражения на резонансной частоте составляло минус 41,3873 дБ. При температуре 37 °С частота минимума – 30,7728 ГГц, а значение коэффициента отражения на резонансной частоте – минус 39,9748 дБ.

В этом случае при изменении температуры воды на один градус Δf_{min1} = 7,3 МГц, а ΔR_{min1} = = 1,4125 дБ.

Теперь обратимся к резонатору на три полуволны (т. е. p = 3, вид колебаний H_{103}) и проведем сравнение резонансных зависимостей вначале в режиме недосвязи, а затем – пересвязи.

4(527).indd 96 17.12.2015 11:26:37

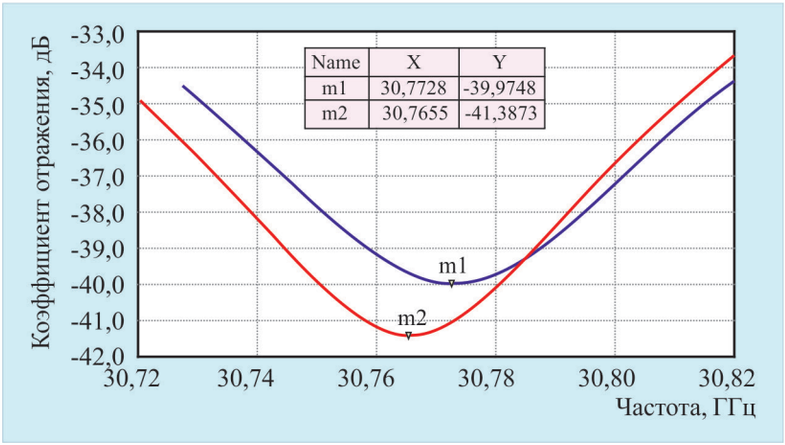

Рис. 8. Сравнение резонансных кривых резонатора в режиме пересвязи по уровню минимума коэффициента отражения минус 40 дБ (p = 1) при температуре воды 36 (красная кривая) и 37 °С (синяя) (l_p = 3,0 мм, $a_1 \times b_1$ = 3,501×3,56 мм)

Расчетные резонансные кривые резонатора по уровню минимума коэффициента отражения минус 30 дБ, нагруженного на воду при температурах поочередно 36 и 37 °С, представлены на рис. 9 (режим недосвязи: p = 3, l_p = 10,71 мм, a_1 = 3,42 мм). При температуре 36 °С частота минимума равнялась 30,9796 ГГц, а значение коэффициента отражения на резонансной частоте составляло минус 29,7560 дБ. При температуре 37 °С частота минимума – 30,9821 ГГц, а значение коэффициента отражения на резонансной частоте – минус 30,1171 дБ. В этом случае при изменении температуры воды на один градус Δf_{min3} = 2,5 МГц, а ΔR_{min3} = 0,3611 дБ.

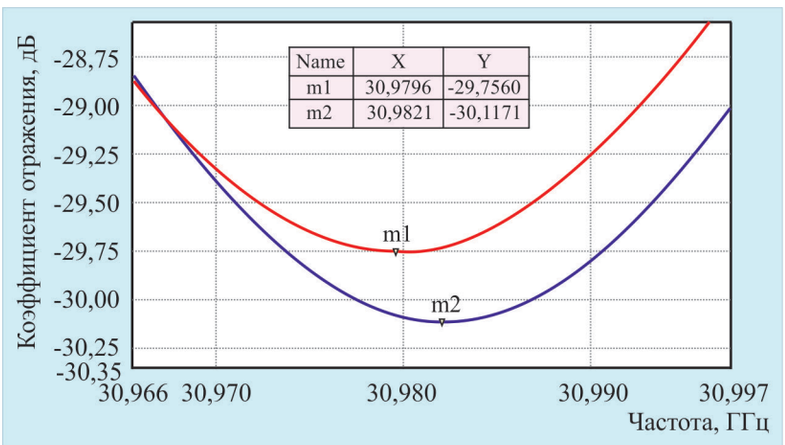

Рис. 9. Сравнение резонансных кривых резонатора в режиме недосвязи по уровню минимума коэффициента отражения минус 30 дБ (p = 3) при температуре воды 36 (красная кривая) и 37 °С (синяя) (l_p = 10,695 мм, $a_1 \times b_1$ = 3,42 × 3,56 мм)

Расчетные резонансные кривые резонатора в режиме недосвязи по уровню минимума коэффициента отражения минус 40 дБ приведены на рис. 10 (режим недосвязи: p = 3, l_p = 10,71 мм, a_1 = 3,458 мм). При температуре 36 °С частота минимума равнялась 30,9422 ГГц, а значение

4(527).indd 97 17.12.2015 11:26:38

коэффициента отражения на резонансной частоте составляло минус 39,6889 дБ. При температуре 37 °С частота минимума – 30,9446 ГГц, а значение коэффициента отражения на резонансной частоте – минус 40,8607 дБ. Как видно из графиков, при изменении температуры воды на один градус Δf_{min3} = 2,4 МГц, а ΔR_{min3} = 1,1718 дБ.

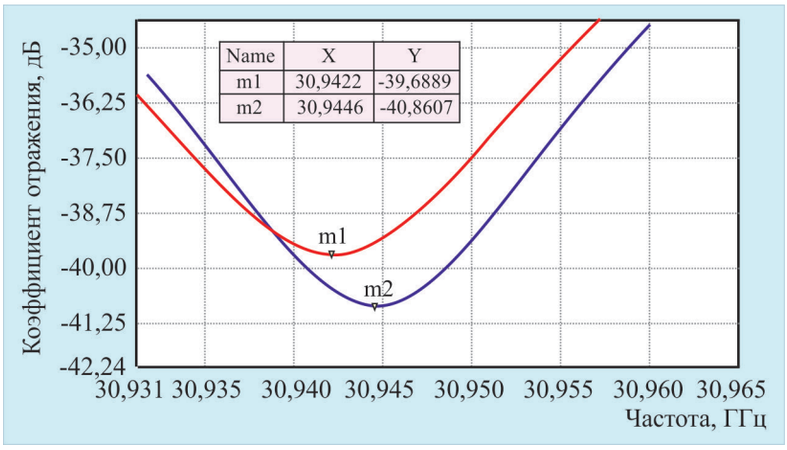

Рис. 10. Сравнение резонансных кривых резонатора в режиме недосвязи по уровню минимума коэффициента отражения минус 40 дБ (p = 3) при температуре воды 36 (красная кривая) и 37 °С (синяя) (l_p = 10,71 мм, $a_1 \times b_1$ = 3,458 × 3,56 мм)

В режиме пересвязи расчетные резонансные зависимости этого резонатора по уровню минимума коэффициента отражения минус 30 дБ показаны на рис. 11 (режим пересвязи: p = 3, l_p = 10,71 мм, a_1 = 3,536 мм). При температуре 36 °С частота минимума равнялась 30,8680 ГГц, а значение коэффициента отражения на резонансной частоте составляло минус 30,4699 дБ. При температуре 37 °С частота минимума – 30,8705 ГГц, а значение коэффициента отражения на резонансной частоте – минус 30,1021 дБ. В этом случае при изменении температуры воды на один градус Δf_{min3} = 2,5 МГц, а ΔR_{min3} = 0,3678 дБ.

На рис. 12 приведены резонансные кривые резонатора в режиме пересвязи по уровню минимума коэффициента отражения минус 40 дБ (режим пересвязи: p = 3, l_p = 10,71 мм, a_1 = 3,494 мм). Как видно из графиков, при температуре 36 °С частота минимума равнялась 30,9087 ГГц, а значение коэффициента отражения на резонансной частоте составляло минус 41,5488 дБ. При температуре 37 °С частота минимума – 30,9112 ГГц, а значение коэффициента отражения на резонансной частоте – минус 40,2785 дБ. Здесь при изменении температуры воды на один градус Δf_{min3} = 2,5 МГц, а ΔR_{min3} = 1,2703 дБ.

И наконец, рассмотрим резонатор, на длине которого укладывается семь полуволн (т. е. p = 7, вид колебаний H_{107}), и проведем сравнение его резонансных зависимостей вначале в режиме недосвязи, а затем пересвязи. Расчетные резонансные кривые резонатора в режиме недосвязи по уровню минимума коэффициента отражения минус 30 дБ, нагруженного на воду при температурах поочередно 36 и 37 °С, приведены на рис. 13 (режим недосвязи: p = 7, l_p = 25,953 мм, a_1 = 3,42 мм). При температуре 36 °С частота минимума равнялась 31,1306 ГГц, а значение коэффициента отражения на резонансной частоте составляло минус 29,8080 дБ. При температуре 37 °С частота минимума – 31,1317 ГГц, а значение коэффициента отражения на резонансной частоте – минус 30,1579 дБ. Изменение температуры воды на один градус приводит

4(527).indd 98 17.12.2015 11:26:38

к смещению резонансной частоты минимума на Δf_{min7} = 1,1 МГц и изменению коэффициента отражения на ΔR_{min7} = 0,3499 дБ.

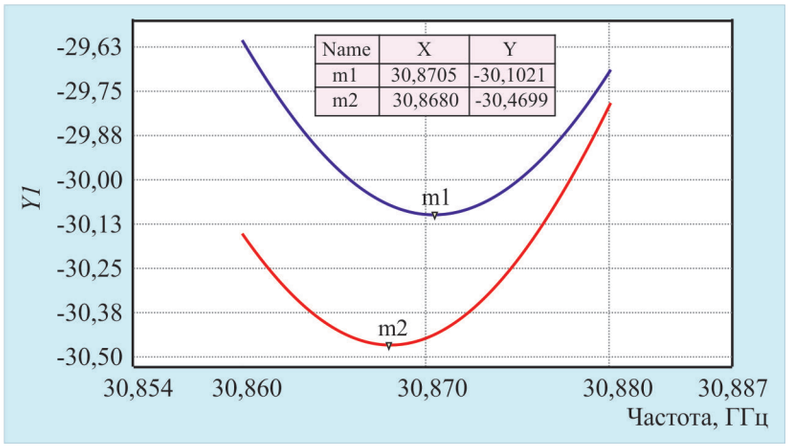

Рис. 11. Сравнение резонансных кривых резонатора в режиме пересвязи по уровню минимума коэффициента отражения минус 30 дБ (p = 3) при температуре воды 36 (красная кривая) и 37 °С (синяя) (l_p = 10,71 мм, $a_1 \times b_1$ = 3,536 × 3,56 мм)

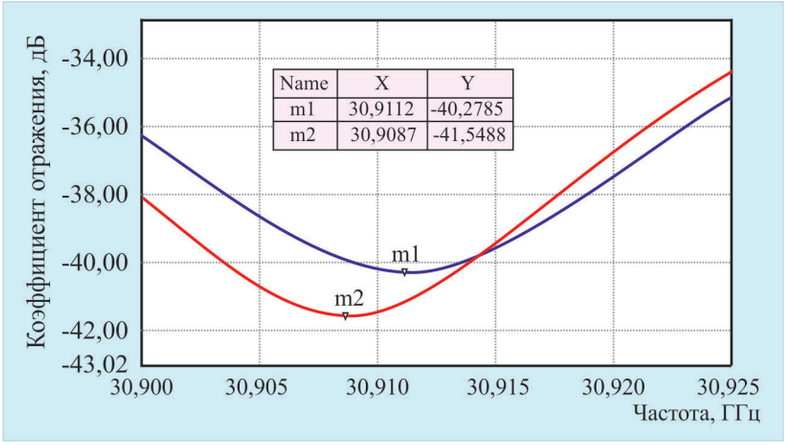

Рис. 12. Сравнение резонансных кривых резонатора в режиме пересвязи по уровню минимума коэффициента отражения минус 40 дБ (p = 3) при температуре воды 36(красная кривая) и 37 °С (синяя) (l_p = 10,71 мм, $a_1 \times b_1$ = 3,494 × 3,56 мм)

По уровню минимума коэффициента отражения минус 40 дБ расчетные резонансные кривые приведены на рис. 14 (режим недосвязи: p = 7, l_p = 25,953 мм, a_1 = 3,457 мм).

При температуре 36 °С частота минимума равнялась 31,1153 ГГц, а значение коэффициента отражения на резонансной частоте составляло минус 38,5870 дБ. При температуре 37 °С частота минимума – 31,1164 ГГц, а значение коэффициента отражения на резонансной частоте – минус 39,5703 дБ. Здесь при изменении температуры воды на один градус Δf_{min7} = 1,1 МГц, а ΔR_{min7} = = 0,9433 дБ.

4(527).indd 99 17.12.2015 11:26:38

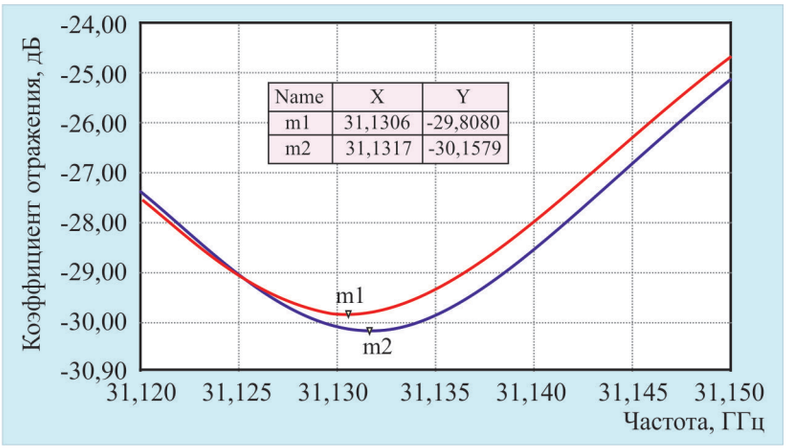

Рис. 13. Сравнение резонансных кривых резонатора в режиме недосвязи по уровню минимума коэффициента отражения минус 30 дБ (p = 7) при температуре воды 36 (красная кривая) и 37 °С (синяя) (l_p = 25,953 мм, $a_1 \times b_1$ = 3,42 × 3,56 мм)

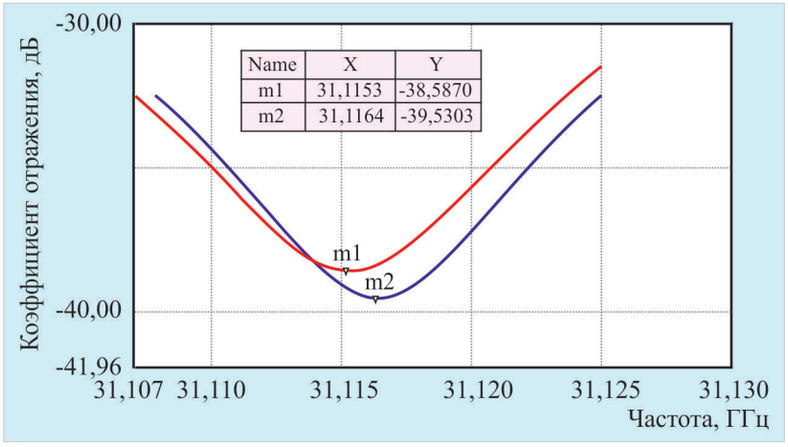

Рис. 14. Сравнение резонансных кривых резонатора в режиме недосвязи по уровню минимума коэффициента отражения минус 40 дБ (p = 7) при температуре воды 36(красная кривая) и 37 °С (синяя) (l_p = 25,953 мм, $a_1 \times b_1$ = 3,457 × 3,56 мм)

В режиме пересвязи расчетные резонансные кривые этого резонатора по уровню минимума коэффициента отражения минус 30 дБ, нагруженного на воду при температурах поочередно 36 и 37 °С, приведены на рис. 15 (режим пересвязи: p = 7, l_p = 25,953 мм, a_1 = 3,532 мм). При температуре 36 °С частота минимума равнялась 31,0850 ГГц, а значение коэффициента отражения на резонансной частоте составляло минус 30,3531 дБ. При температуре 37 °С частота минимума – 31,0861 ГГц, а значение коэффициента отражения на резонансной частоте – минус 29,9957 дБ. При изменении температуры воды на один градус Δf_{min7} = 1,1 МГц, а ΔR_{min7} = 0,3574 дБ.

4(527).indd 100 17.12.2015 11:26:39

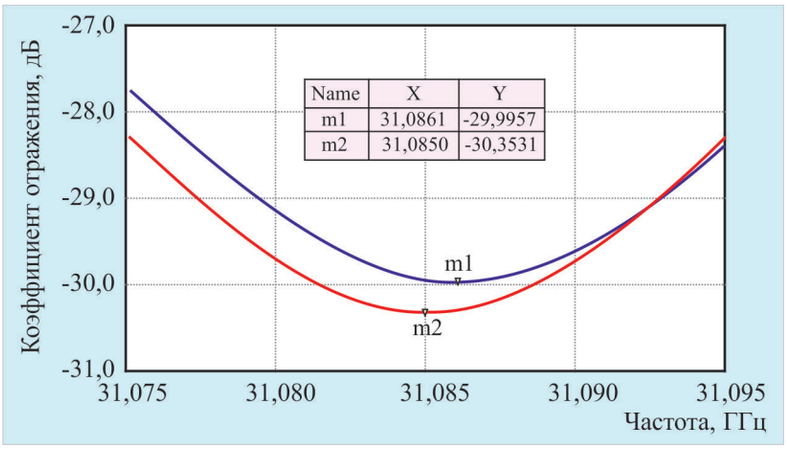

Рис. 15. Сравнение резонансных кривых резонатора в режиме пересвязи по уровню минимума коэффициента отражения минус 30 дБ (p = 7) при температуре воды 36 (синяя кривая) и 37 °С (красная) (l_p = 25,953 мм, $a_1 \times b_1$ = 3,532 × 3,56 мм)

Расчетные зависимости этого резонатора по уровню минимума коэффициента отражения минус 40 дБ представлены на рис. 16 (режим пересвязи: p = 7, l_p = 25,953 мм, a_1 = 3,49 мм). При температуре 37 °С частота минимума равнялась 31,1035 ГГц, а значение коэффициента отражения на резонансной частоте составляло минус 39,8528 дБ. При температуре 36 °С частота минимума – 31,1024 ГГц, а значение коэффициента отражения на резонансной частоте – минус 41,0418 дБ. Здесь при изменении температуры воды на один градус Δf_{min7} = 1,1 МГц, а ΔR_{min7}= = 1,189 дБ.

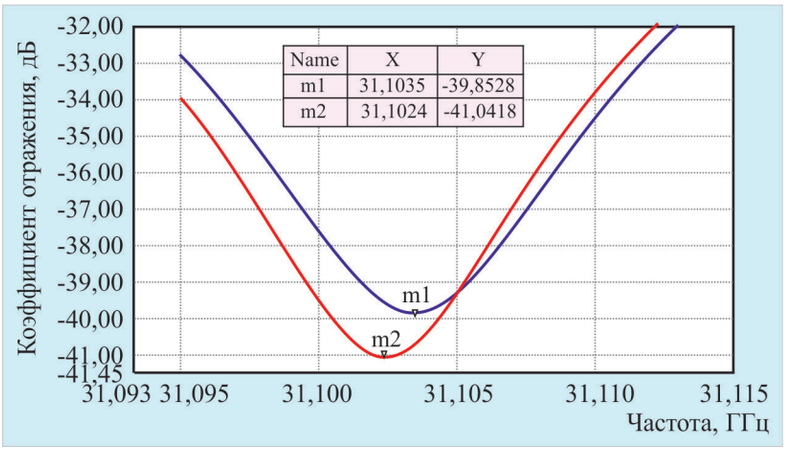

Рис. 16. Сравнение резонансных кривых резонатора в режиме пересвязи по уровню минимума коэффициента отражения минус 40 дБ (p = 7) при температуре воды 36 (красная кривая) и 37 °С (синяя) (l_p = 25,953 мм, $a_1 \times b_1$ = 3,49 × 3,56 мм)

Сведем полученные результаты по изменениям частоты Δf_{min} резонансных минимумов и коэффициентов отражения ΔR_{min} в минимумах резонансных кривых для каждого вида колебаний в одну таблицу (табл. 4) и проанализируем их. В проведенных расчетах при повышении

4(527).indd 101 17.12.2015 11:26:39

температуры воды на один градус действительная составляющая ε_1 ее диэлектрической проницаемости возрастает на 1,6 %, а мнимая ε_2 уменьшается на 0,05 %. Из табл. 4 видно, что наибольшие изменения частоты резонансного минимума и коэффициента отражения в минимуме резонансной кривой имеет резонатор на одну полуволну (т. е. $p = 1$). Например, в режиме недосвязи по уровню минус 40 дБ для вида колебаний H_{101} изменение частоты резонансного минимума равно 7,4 МГц, а коэффициента отражения в минимуме резонансной кривой – 1,2402 дБ. Для резонатора, работающего на виде колебаний H_{103}, эти величины уменьшаются до 2,4 МГц и 1,1718 дБ. Для вида колебаний H_{107} эти цифры становятся еще меньше и составляют 1,1 МГц и 0,9433 дБ. Таким образом, в тех практических задачах, где определяются малые изменения диэлектрической проницаемости исследуемого вещества, надо использовать прямоугольный резонатор, работающий на виде колебаний H_{101}.

Таблица 4

Тип колебаний в резонаторе	Уровень минимума коэффициента отражения R_{min}, дБ	Изменения частоты Δf_{min} минимумов и коэффициентов отражения ΔR_{min} в минимумах резонансных зависимостей			
		Недосвязь		Пересвязь	
		Δf_{min}, МГц	ΔR_{min}, дБ	Δf_{min}, МГц	ΔR_{min}, дБ
H_{101} ($p = 1$)	-30	7,4	0,4074	7,3	0,4272
	-40	7,4	1,2402	7,3	1,4125
H_{103} ($p = 3$)	-30	2,5	0,3611	2,5	0,3678
	-40	2,4	1,1718	2,5	1,2703
H_{107} ($p = 7$)	-30	1,1	0,3499	1,1	0,3574
	-40	1,1	0,9433	1,1	1,189

ЛИТЕРАТУРА

1. **Meisner, T.** The complex dielectric constant of pure and sea water from microwave satellite observations / T. Meisner, F. J. Wentz // IEEE Transactions on Geosciences and Remote Sensing. – 2004. – Vol. 42, No 9, September. – P. 1836 – 1849.

Статья поступила 22 мая 2015 г.

4(527).indd 102 17.12.2015 11:26:39