
Комплексированный метод измерения диэлектрической проницаемости в НЧ и СВЧ диапазонах

А.Р. Насыбуллин, А.Ф. Сиразов

Казанский национальный исследовательский технический университет им. А.Н. Туполева-КАИ

Аннотация: В данной статье предложена идея создания комплексированного датчика для измерения диэлектрических параметров жидких веществ с целью различения образцов с малыми изменениями параметров в НЧ в СВЧ диапазонах. Измерения проводятся емкостным методом. Для измерения на НЧ используется преобразователь «емкость-код», в СВЧ методе для измерения используется векторный анализатор. В качестве емкостного датчика используется гребенчатый конденсатор, обладающий такими геометрическими и электрофизическими параметрами, при которых он не является излучающей структурой в диапазоне контролируемых частот. Для объединения НЧ и СВЧ измерений в одном датчике используется схема частотной развязки. Актуальность метода заключается в отсутствии необходимости проведения отдельных измерений образца с помощью различных датчиков.

Ключевые слова: гребенчатый конденсатор, коаксиальный конденсатор, коаксиальный пробник, схема частотной развязки, жидкое вещество, датчик, модель, коэффициент отражения, электрическая емкость, преобразователь «емкость-код».

Введение

При измерении диэлектрических параметров жидких сред в широком диапазоне частот на практике широко распространено раздельное измерение в низкочастотном и высокочастотном радиочастотных диапазонах. Но у такого подхода есть существенные недостатки, а именно для каждого диапазона надо создавать отдельные датчики, при переходе от одного диапазона к другому возможны изменения параметров исследуемой среды, у датчика каждого диапазона свои погрешности, температурные зависимости. Из-за указанных выше недостатков было решено изготовить датчик, который одновременно работает в НЧ и СВЧ диапазонах, с возможностью использования данного датчика в единой измерительной системе.

Для измерения диэлектрической проницаемости на НЧ применяется емкостный метод. Работа этого метода основана на изменении емкости конденсатора в зависимости от диэлектрической проницаемости окружающей обкладки конденсатора среды. В СВЧ диапазоне измеряется

комплексный коэффициент отражения от конденсатора с заполняющей средой.

Структура датчика

Для измерений были выбраны и изготовлены два вида конденсаторов. Первый из них, коаксиальный (рис. 1,б), представлял собой цилиндрический проводник, внутри которого находился металлический стержень, в пространстве между ними располагали исследуемый образец среды. Вторым являлся гребенчатый конденсатор (рис. 1,а), содержащий диэлектрическую подложку, на одной стороне которой расположен проводящий экран, а на другой стороне две обкладки, разделенные щелью в виде меандра [1-4]. Гребенчатый конденсатор погружался в исследуемую жидкость для определения её диэлектрической проницаемости.



Рис. 1. – Измерительные конденсаторы:

а – гребенчатый, *б* – коаксиальный

В ходе анализа результатов измерений выяснилось, что коаксиальный конденсатор обладает нестабильностью в показаниях, объясняющаяся тем, что внутри полости конденсатора образуются воздушные «мешки». При повторных измерениях одного образца концентрация воздушных «мешков» может изменяться. Вследствие этого в дальнейшем данный тип конденсатора не применялся. В качестве измерительного датчика был использован гребенчатый конденсатор, который лишен указанных недостатков.

Расчет емкости данного конденсатора был произведен по известным формулам [5]:

$$a = \frac{w}{2}, \quad (1)$$

$$b = \frac{w + s}{2}, \quad (2)$$

$$k = \left(\operatorname{tg} \left(\frac{a * \pi}{4 * b} \right) \right)^2, \quad (3)$$

$$K(k) = \int_0^{\frac{\pi}{2}} (1 - (k * \sin(t))^2)^{-0.5} dt, \quad (4)$$

$$K^*(k) = \int_0^{\frac{\pi}{2}} (1 - (\sqrt{1 - k^2} * \sin(t))^2)^{-0.5} dt, \quad (5)$$

Емкость рассчитывается по следующей формуле:

$$C(k, L, n, E) = \frac{E * 10^{-8}}{18 * \pi} * \frac{K(k)}{K^*(k)} * (n - 1) * \frac{L}{10^{-6}}, \text{ пФ}, \quad (6)$$

где L – длина «пальца», n – количество «пальцев», w – ширина «пальцев», s – промежуток между «пальцами».

Результаты измерений

Для анализа работы в НЧ применялся преобразователь «емкость-код» на основе микросхемы FDC1004. В качестве образцов для измерения были выбраны оливковые масла трех разных производителей. Как видно из рис. 2, где показаны результаты усредненных многократных измерений, различия между образцами имеются.

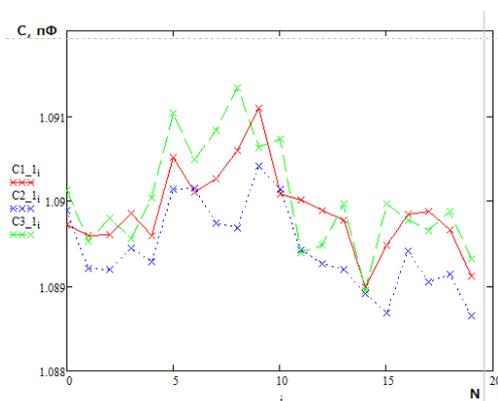


Рис. 2. – Результаты измерений различных масел НЧ методом

Для анализа работы структуры в СВЧ диапазоне, было решено провести моделирование гребенчатого конденсатора в программе CST STUDIO SUITE. В ней была создана 3D модель гребенчатого конденсатора с подключенным к нему коаксиальным кабелем (рис. 3).

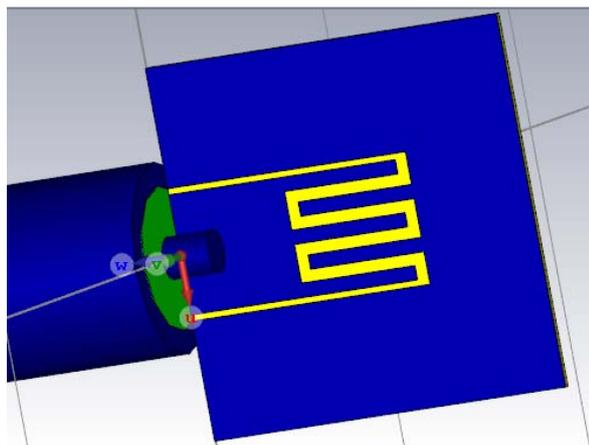


Рис. 3. – 3D модель гребенчатого конденсатора с подключенным к нему коаксиальным кабелем

На рис. 4 показан коэффициент отражения коаксиального пробника в виде открытого конца коаксиального волновода, соприкасающегося с исследуемой средой, при двух разных диэлектрических проницаемостях - 3 и 3,1. Как видно из графика разница между средами проявляется слабо, так как у коаксиального пробника низкая чувствительность. На рис. 5 показан аналогичный отклик для случая конденсатора, где разница между двумя средами прослеживается четче.

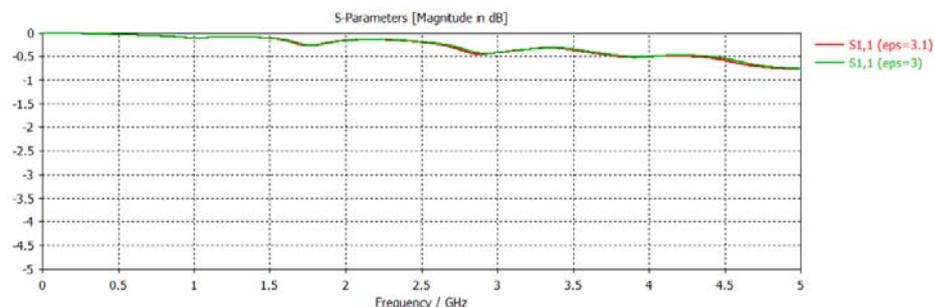


Рис. 4. – Коэффициент отражения коаксиального пробника

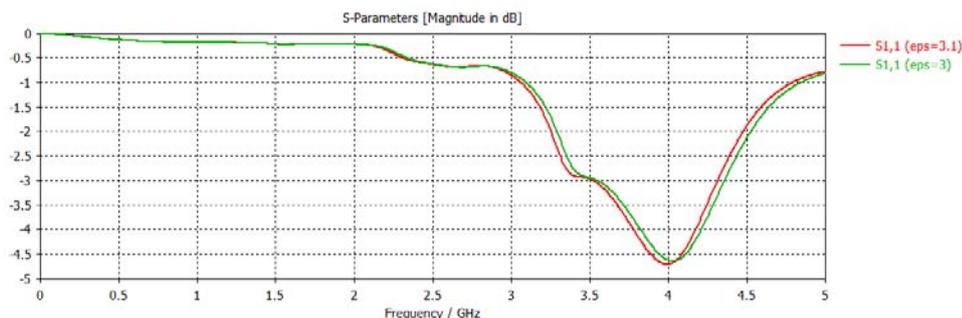


Рис. 5. – Коэффициент отражения гребенчатого конденсатора

Так как данный конденсатор работает в НЧ и СВЧ диапазонах, необходимо исключить взаимное влияние измерительных сигналов. Для этого используется схема частотной развязки. Данная цепь представляет собой Т-образный тройник (рис. 6), с одного плеча которого подается СВЧ сигнал, на второе плечо - НЧ сигнал, а на третьем выводе получаем сумму двух сигналов, при этом за счет присутствия емкости и индуктивности происходит частотная развязка [6-10].

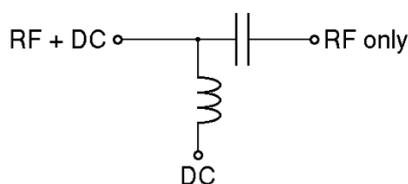


Рис. 6. – Схема частотной развязки

Для подбора параметров C и L схемы частотной развязки используется формулы (7) и (8):

$$X_C = \frac{1}{2 * \pi * f * C} \ll Z_0, \quad (7)$$

$$X_L = 2 * \pi * f * L \gg Z_0, \quad (8)$$

где f – частота(Гц), C – емкость(Ф), L – индуктивность(Гн)

Заключение

В работе показана возможность создания емкостных датчиков для параллельного измерения диэлектрических параметров в НЧ и СВЧ диапазонах применительно к задаче различения образцов жидких продуктов, характеризующихся близкими свойствами. Это метод актуален тем, что

позволяет получить более детальную картину об измеряемом веществе, так как вещества обладают различным откликом на разных частотах, при этом измерения проводятся в идентичных условиях и используется один чувствительный элемент.

Литература

1. Насыбуллин А.Р. Пассивные оптические и коаксиальные СВЧ структуры с периодическими неоднородностями: трансфер сенсорных технологий // Инженерный вестник Дона, 2016, №3 URL:ivdon.ru/ru/magazine/archive/n3y2016/3761.

2. Насыбуллин А.Р. Активные оптические и СВЧ-элементы с периодическими структурами, расположенными в ближней зоне излучения: трансфер сенсорных технологий // Инженерный вестник Дона, 2016, №3 URL:ivdon.ru/ru/magazine/archive/n3y2016/3751.

3. Котов Е.П., Каплун В.Д., Тер-Маркорян А.А., Лисицын В.П., Фаянс Ю.И. Полосковые платы и узлы. Проектирование и изготовление. - М.: Советское радио, 1979. 248 с.

4. Малорацкий Л.Г. Микроминиатюризация элементов и устройств СВЧ. - М.: Советское радио, 1976. 216 с.

5. Григорьев А.Д. Электродинамика и микроволновая техника: Учебник, 2 изд. СПб.: Издательство «Лань», 2007. 704 с.

6. Лялин К.С., Приходько Д.В. Электродинамика СВЧ. Учебное пособие. Часть 1. М.: МИЭТ, 2009. 192 с.

7. Воскресенский Д.И., Гостюхин В.Л., Максимов В.М., Понамарев Л.И. Антенны и устройства СВЧ. - М.: Издательство МАИ, 1999. 376 с.

8. Сазонов Д.М., Гридин А.Н., Мишустин Б.А. Устройства СВЧ: Учеб. пособие. - М.: Высшая школа, 1981. 259 с.

9. Pozar David M. Microwave Engineering. 2nd ed. Crawfordsville, Indiana, U.S.A.: R.R. Donnelley & Sons Company, 1998. 718 p.



10. Collin Robert E. Foundations for Microwave Engineering. 2nd ed. N.Y., U.S.A.: R.R. Donnelley & Sons Company, 1992. 944 p.

References

1. Nasybullin A.R. Inzhenernyj vestnik Dona (Rus), 2016, №3. URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/n3y2016/3761.

2. Nasybullin A.R. Inzhenernyj vestnik Dona (Rus), 2016, №3. URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/n3y2016/3751.

3. Kotov E.P., Kaplun V.D., Ter-Markoryan A.A., Lisicyn V.P., Fayans Yu.I. Poloskovye platy i uzly. Proektirovanie i izgotovlenie [Strips and knots. Design and manufacture]. M. Sovetskoe radio, 1979. 248 p.

4. Malorackij L.G. Mikrominiaturizatsiya ehlementov i ustrojstv SVCH [Microminiaturization of microwave elements and devices]. M. Sovetskoe radio, 1976. 216 p.

5. Grigor'ev A.D. Elektrodinamika i mikrovolnovaya tekhnika [Electrodynamics and microwave technology]. 2nd ed. SPb. Izdatel'stvo «Lan'», 2007. 704 p.

6. Lyalin K.S., Prihod'ko D.V. Elektrodinamika SVCH [Microwave electrodynamic]. M. MIET, 2009. 192 p.

7. Voskresenskij D.I., Gostyuhin V.L., Maksimov V.M., Ponamarev L.I. Antenny i ustrojstva SVCH [Antennas and microwave devices]. M. Izdatel'stvo MAI, 1999. 376 p.

8. Sazonov D.M., Gridin A.N., Mishustin B.A. Ustrojstva SVCH [Microwave devices] M. Vysshaya Shkola, 1981. 259 p.

9. Pozar David M. Microwave Engineering. 2nd ed. Crawfordsville, Indiana, U.S.A.: R.R. Donnelley & Sons Company, 1998. 718 p.

10. Collin Robert E. Foundations for Microwave Engineering. 2nd ed. N.Y., U.S.A.: R.R. Donnelley & Sons Company, 1992. 944 p.