УДК 681.128.8

ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЬНЫЙ ЭЛЕМЕНТ ИЗМЕРИТЕЛЯ УРОВНЯ ЖИДКИХ ПРОДУКТОВ НА ОСНОВЕ БРЭГГОВСКОЙ СВЧ-СТРУКТУРЫ В КОАКСИАЛЬНОМ КАБЕЛЕ

Насыбуллин А.Р.[1], Морозов О.Г.[1], Севастьянов А.А.[1], Фархутдинов Р.В.[1], Самигуллин Р.Р.[1]

[1]ФГОБУ ВПО «Казанский национальный исследовательский технический университет им. А.Н.Туполева-КАИ», Казань, Россия (420111, Казань, ул. Карла Маркса, 10), e-mail: aydar.nasybullin@mail.ru

Рассмотрен метод определения уровня жидких диэлектрических сред на основе преобразовательного элемента в виде брэгговской СВЧ-структуры в коаксиальном кабеле, осуществляющего дискретный тип измерения. Чувствительный элемент предлагаемого датчика представляет собой систему периодических неоднородностей, реализованных как отверстия во внешнем проводнике и внутреннем диэлектрике коаксиального кабеля. Принцип измерения уровня основан на преобразовании формы частотной характеристики отражения и передачи коаксиального кабеля с неоднородностями при последовательном заполнении отверстий контролируемой жидкостью. Используя матричный метод описания СВЧ-устройств, проведен вычислительный эксперимент по определению частотных зависимостей коэффициента отражения брэгговской СВЧ-структуры в коаксиальном кабеле при последовательном заполнении отверстий кабеля жидкостью. Анализируя результаты вычислений сформулирована методика получения измерительной информации о текущем положении уровня контролируемой жидкости, основанную на мониторинге амплитуд двух резонансов в частотной зависимости коэффициента отражения структуры.

Ключевые слова: брэгговская СВЧ-структура, коаксиальный кабель, измеритель уровня, жидкая среда

TRANSDUCING ELEMENT OF LIQUID PRODUCTS LEVEL METER BASED ON MICROWAVE BRAGG STRUCTURES IN COAXIAL CABLES

Nasybullin A.R.[1], Morozov O.G.[1], Sevastyanov A.A.[1], Farkhutdinov R.V.[1], Samigullin R.R.[1]

Kazan National Research Technical University n.a. A.N. Tupolev-KAI, Kazan, Russia (420111, Kazan, Karl Marx street, 10), e-mail: aydar.nasybullin@mail.ru

The article discusses the method of determining the level of liquid dielectric media based on the conversion element in the form of Bragg structures in microwave coaxial cable carrying a discrete type of measurement. The sensing element of the proposed sensor is a system of periodic inhomogeneities implemented as holes in the outer conductor and the inner dielectric coaxial cable. The measuring principle is based on the level of transformation shape of the frequency characteristics of reflection and transmission of a coaxial cable with inhomogeneities in sequential filling holes controlled fluid. Using the matrix method of describing microwave devices computational experiments to determine the frequency dependence of the Bragg reflection of microwave structures in a coaxial cable with sequential filling holes cable liquid. Analyzing the results of the calculations formulated procedure for obtaining the measurement information on the current status of controlled liquid level based on monitoring the amplitudes of the two resonances in the frequency dependence of the reflection coefficient of the structure.

Keywords: microwave Bragg structure, coaxial cable, the level meter, the fluid

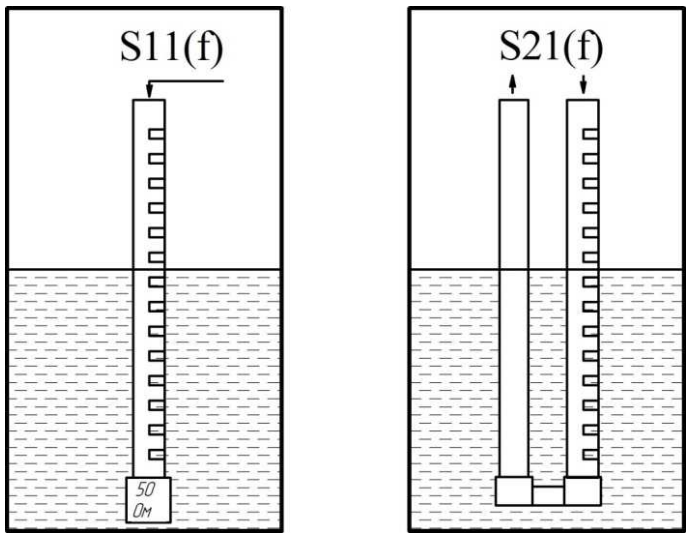
Брэгговская СВЧ-структура в коаксиальном кабеле (БССКК) является радиочастотным устройством, характеризующимся резонансным взаимодействием прямых и обратных волн в волноведущей системе с периодическими неоднородностями [3,6]. Частотные характеристики коэффициента отражения и передачи БССКК обладают дискретными резонансами, центральные длины волн которых определяются условием резонансов Брэгга, показывающем, что максимум отражения возникает, когда длина волны в волноводе становится равной удвоенному значению периода структуры. Вариантом введения

неоднородностей в поперечных сечениях оси коаксиального кабеля является высверливание отверстий во внешнем проводнике и диэлектрическом заполнении кабеля.

БССКК обладают большими перспективами использования в сенсорной технике в силу существования зависимости частотных характеристик подобных структур от внешних условий: вариации электрофизических параметров материалов, контактно связанных с системой; геометрических преобразований структуры, изменений физических свойств компонентов системы. На основе подобных структур возможна реализация преобразовательных элементов для измерения деформаций [6], температуры [1,3], диэлектрических параметров сред [2,5]. В настоящей работе рассматривается применение БССКК для реализации измерителей уровня жидких сред.

Измерение уровня жидкой среды с помощью БССКК

По принципу определения измерительной информации можно выделить два типа исполнения измерителя уровня на основе БССКК: с измерением в режиме отражения и с измерением в режиме передачи. Преобразовательный элемент измерителя, реализующего режим отражения, показан на рис. 1*а*. Преобразователь уровня представляет собой отрезок коаксиального кабеля с периодически расположенными отверстиями, в частном случае круглого сечения, в пределах измерительной длины кабеля. Отверстия прорезают внешнюю изоляцию, внешний проводник и внутренний диэлектрик кабеля. В резервуар с контролируемой жидкостью в вертикальном положении опускается кабель с подключенной согласованной нагрузкой, длина измерительного участка должна соответствовать максимально возможному уровню жидкости. По мере увеличения положения уровня, отверстия кабеля поочередно заполняются жидкостью, что эквивалентно последовательному соединению двух БССКК, параметры неоднородностей и длина которых зависят от количества заполненных отверстий. Уровень определяется посредством анализа частотной зависимости коэффициента отражения БССКК, характеризующейся наличием двух резонансных линий с изменяющимися характеристиками. Исполнение измерителя уровня, функционирующего в режиме передачи рис. 1*б*, предполагает наличие коаксиального изгиба и дополнительного соединительного кабеля. В данном случае определение уровня производится в результате анализа изменения частотной характеристики коэффициента передачи соединения - БССКК, коаксиальный изгиб, соединительный кабель.



а *б*

Рис. 1. Варианты реализации измерителя уровня дискретного действия:

а – измерение на отражение, *б* – измерение на прохождение

Режим измерения на отражение требует наличия СВЧ-устройств для выделения отраженной волны в радиочастотной части датчика уровня, но при этом используется простая конструкция чувствительного элемента. В измерителях на отражение нет необходимости использовать невзаимные устройства, но конструкция чувствительного элемента усложняется.

Предложенный выше вариант уровнемера в силу своей конструкции является измерителем дискретного типа, то есть определение уровня возможно лишь в конкретных отсчетах по длине кабеля. Участки с неопределенным значением уровня находятся в промежутках между отверстиями. Разрешающая способность уровнемера определяется периодом структуры (расстоянием между соседними отверстиями).

Можно выделить несколько путей увеличение разрешающей способности:

- Уменьшение периода структуры, но при этом неизбежно увеличивается частота первого резонанса коэффициента отражения, что усложняет процесс извлечения измерительной информации.

-Усложнение конструкции измерителя, заключающееся в расположении рядом нескольких идентичных БССКК, но со сдвинутыми по длине расположениями отверстий. Такая конструкция подразумевает отдельный измерительный канал на каждую БССКК, либо наличие СВЧ переключателя.

- Изменение структуры и геометрии неоднородностей в БССКК.

Исследование частотных зависимостей коэффициента отражения БССКК в задачах определения уровня жидких сред

Используя методы описания периодических СВЧ-структур в коаксиальном кабеле, основанные на положениях матриц СВЧ [4] и ориентированных графов [2], можно анализировать характеристики отражения и передачи БССКК при последовательном заполнении отверстий коаксиального кабеля исследуемой жидкостью. Для осуществления данной задачи требуется нахождение частотных зависимостей комплексных коэффициентов отражения и передачи участка с неоднородностью, сечения которого отстоят от неоднородности на расстояние, при котором не существуют высшие типы волн. Отмеченные характеристики могут быть определены путем решения внутренней краевой электродинамической задачи численными методами, машинного моделирования в программе электродинамического анализа и экспериментального исследования. Последний путь реализуется с применением двухпортового векторного анализатора цепей и заключается в измерении матрицы рассеяния коаксиального кабеля с одной неоднородностью, искомые частотные зависимости получаются после исключения множителей, определяющих затухание и набег фазы на участках кабеля вне неоднородности. Далее будет рассмотрен вариант нахождения матрицы рассеяния неоднородного участка БССКК методом компьютерного моделирования в программе CST Microwave Studio.

Задача компьютерного моделирования заключается в построении модели отрезка коаксиального кабеля с электрическими параметрами материалов, соответствующими принятым в общей модели, построенной на основе графов или матриц. В отрезке кабеля присутствует отверстие с заполнением в виде вакуума, либо другого диэлектрического материала. Нахождение характеристик, соответствующих использованию в уровнемере, требует наличия двух матриц рассеяния неоднородных участков: для вакуумного заполнения и заполнения исследуемой жидкостью.

Возможности программы CST Microwave Studio в плане задания свойств различных материалов заключаются в аппроксимации дисперсионных зависимостей составляющих комплексной диэлектрической проницаемости моделями Дебая и проводимости. Использование модели Дебая наиболее оправдано при определении диэлектрических параметров жидкостей, в которых имеются потери за счет инерционности процессов поляризации. Небольшое количество примеров жидких продуктов имеется в библиотеке материалов программы, для задания свойств остальных веществ необходимо обратиться к справочной литературе, либо к данным из научных публикаций.

Исследование характеристик БССКК при различных количествах заполненных отверстий проводился для нескольких значений диэлектрической проницаемости материала заполнения ε от 3 до 10, при тангенсе угла диэлектрических потерь $tg\delta$=0.06.

Оценка влияния диэлектрической проницаемости измеряемой жидкости на характер коэффициента отражения проводилась для структуры с параметрами: расстояние между отверстиями 40 мм, коэффициент затухания в кабеле 0.01, диэлектрическая проницаемость диэлектрика кабеля ε=1,6, количество отверстий 20.Численный расчет реализован матричным методом в программе MathCad. На рис. 2 показано семейство характеристик для случая ε=5, на рис. 3 – для ε=10.

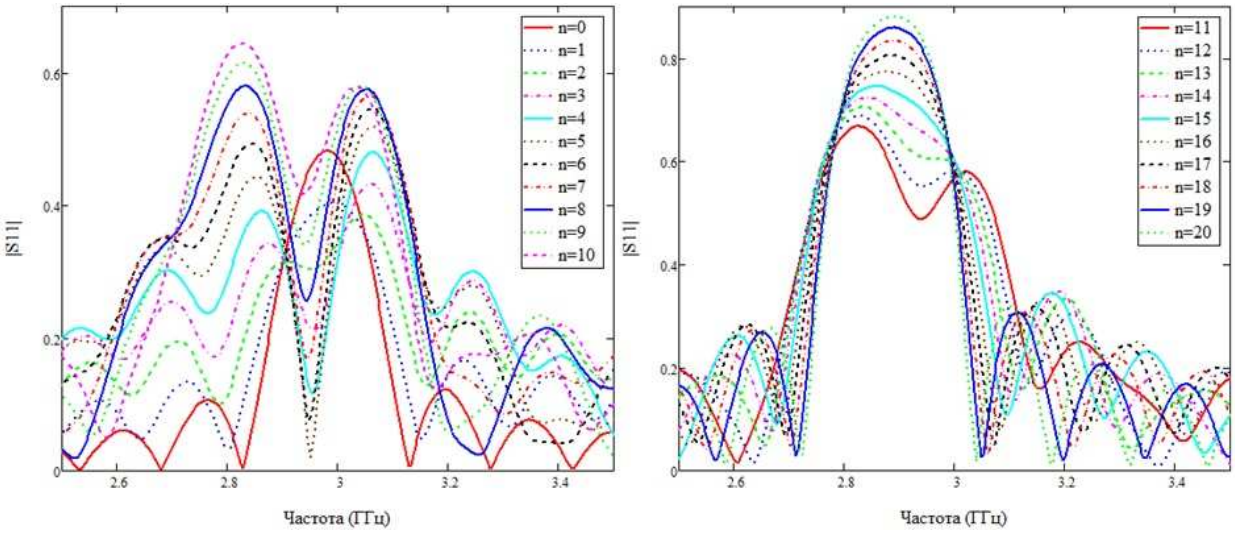


Рис. 2. Коэффициент отражения БССКК при количестве заполненных отверстий *n* от 0 до 20 и диэлектрической проницаемости материала заполнения отверстия ε=5

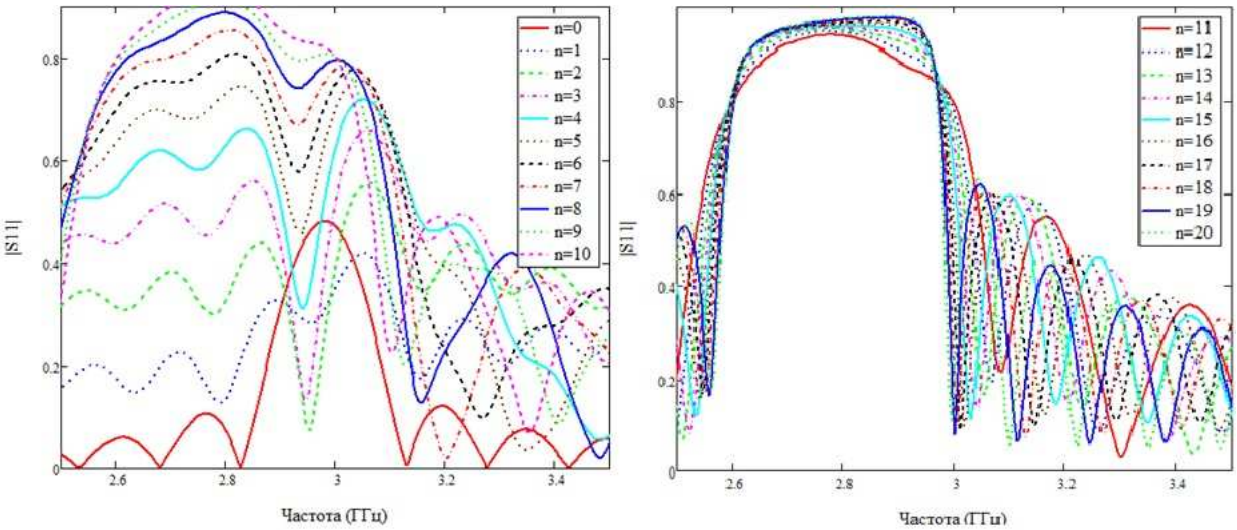


Рис. 3. Коэффициент отражения БССКК при количестве заполненных отверстий *n* от 0 до 20 и диэлектрической проницаемости материала заполнения отверстия ε=10

Оценивая характер изменения зависимостей при вариации диэлектрической проницаемости ε можно сказать, что в связи с расширением полосы резонанса при больших ε, возникает наложение двух резонансов, начиная с определенного значения количества

заполненных отверстий, что приводит к ухудшению эффективности определения уровня. Для устранения указанного эффекта можно изменить конфигурацию неоднородности.

Определение измерительных характеристик преобразователя уровня жидких сред

Следующим этапом исследования явилась оценка измерительных параметров преобразователя уровня на основе БССКК, включающая определение формы зависимостей амплитуд двух резонансов, значения центральных частот резонансов и отношения амплитуд двух резонансов от количества заполненных отверстий. Анализируя полученные зависимости для центральных частот можно сделать следующие выводы: во-первых, резонансная частота не остается постоянной при изменении количества заполненных отверстий, во-вторых, характер этой зависимости не монотонен. Касательно изменения амплитуд двух резонансов, здесь также присутствует немонотонность зависимости. Последний факт усложняет возможность извлечения информации о текущем положении жидкости, исходя из измерения амплитуды только одного резонанса, либо последовательном измерении амплитуд двух резонансов.

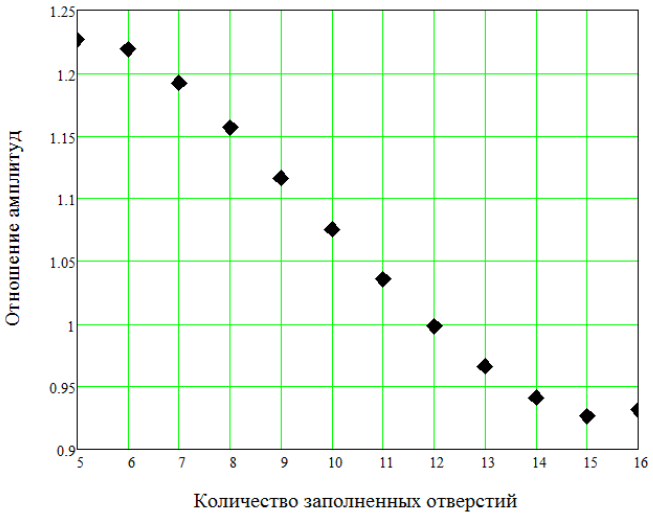


Рис. 4. Зависимость отношения амплитуд резонансов от количества заполненных отверстий

Обладая зависимостями значений амплитуд двух резонансов от количества заполненных отверстий, можно определить отношение амплитуды первого резонанса (без заполнения) к амплитуде второго резонанса (с заполнением) при различных n (рис. 4). График отчетливо показывает существование линейной зависимости отношения двух амплитуд резонансов в диапазоне значений n от 6 до 15. Указанная особенность может быть эффективно использована для определения текущего положения уровня жидкой среды. Получение измерительной информации за пределами линейного диапазона изменения отношения амплитуд достигается за счет существования линейного участка в зависимости для первого

резонанса в пределах значений *n* от 0 до 4 и для второго резонанса в пределах значений *n* от 16 до 20.

Заключение

В результате проведенных исследований разработаны принципы построения, методы анализа и синтеза измерителей уровня жидкостей, основанных на Брэгговских сенсорных структурах в радиочастотном коаксиальном кабеле. На основе вычислительного эксперимента показана зависимость характеристик преобразовательного элемента измерителя уровня от параметров исследуемой жидкой среды и сформулирована методика определения измерительной информации по анализу амплитуд двух резонансов в характеристике отражения брэгговской структуры.

Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства образования и науки Российской Федерации в рамках проектной части государственного задания на оказание услуг (выполнение работ) по организации научных исследований, выполняемых ФГБОУ ВПО «КНИТУ-КАИ» на кафедре радиофотоники и микроволновых технологий и в научно-исследовательском институте прикладной электродинамики, фотоники и живых систем (программа «Радиофотоника», ТЗ 3.1962.2014/К).

Список литературы

1. Двухчастотный метод определения параметров резонансных датчиков СВЧ-диапазона / О.Г. Морозов [и др.] // Вестник Поволжского государственного технологического университета. Серия: Радиотехнические и инфокоммуникационные системы. — 2014. — № 1 (20). — С. 76-86.

2. Коаксиальные брэгговские СВЧ-структуры в сенсорных системах / Г.А. Морозов [и др.] // Физика волновых процессов и радиотехнические системы. — 2014. — Т17, № 3. — С. 65-70.

3. Насыбуллин А.Р. Разработка и исследование СВЧ-устройств для технологий переработки полиэтилентерефталата: Автореф. дис. канд. техн. наук. — Казань, 2012. — 24 с.

4. Насыбуллин А.Р., Морозов О.Г., Севастьянов А.А. Брэгговские сенсорные СВЧ-структуры на коаксиальном кабеле // Журнал радиоэлектроники. — 2014. — № 3. URL: http://jre.cplire.ru/koi/contents.html.

5. Севастьянов А.А. Измерение диэлектрических характеристик жидкостей с помощью решеток Брэгга в радиочастотном коаксиальном кабеле // Современные проблемы науки и образования. – 2014. – № 4; URL: www.science-education.ru/118-14209.

6. Coaxial cable Bragg grating sensors for large strain measurement with high accuracy / H. Jie [et al.] // Proc. of SPIE. 2012. Vol. 8345. P. 83452Z-1.

Рецензенты:

Анфиногентов В.И., д.т.н., доцент, профессор кафедры естественных и технических дисциплин Казанского филиала ФГОБУ ВПО «Поволжского государственного университета телекоммуникаций и информатики», г. Казань;
Морозов Г.А., д.т.н., профессор, директор Казанского филиала ФГОБУ ВПО «Поволжский государственный университет телекоммуникаций и информатики», г. Казань.