

**Коаксиальные брэгговские СВЧ-структуры в сенсорных системах**

Г.А. Морозов, О.Г. Морозов, А.Р. Насыбуллин,  
А.А. Севастьянов, Р.В. Фахрутдинов

Казанский национальный исследовательский технический университет им. А.Н. Туполева - КАИ  
420111, Российская Федерация, г. Казань  
ул. К. Маркса, 10

В работе рассмотрены брэгговские СВЧ-структуры на коаксиальном кабеле, построенные на основе трансферта оптических технологий по аналогии с волоконными решетками Брэгга. Предлагаются варианты применения подобных коаксиальных брэгговских СВЧ-структур в сенсорных приложениях, в частности обсуждаются вопросы создания измерителей механических деформаций, диэлектрических параметров жидкостей и уровня жидких продуктов.

*Ключевые слова:* брэгговские СВЧ-структуры на коаксиальном кабеле, методом ориентированных графов, сенсорные приложения, деформация, диэлектрическая проницаемость, уровень.

**Введение**

СВЧ-устройства, которые можно обобщить определением структуры с периодическими неоднородностями, широко известны в теории и технике направляющих и излучающих систем. Подобные устройства, принцип действия которых основан на взаимодействии прямых и многократно отраженных от неоднородностей электромагнитных волн, нашли применение при создании фильтрующих схем, формирователей и преобразователей радиочастотных сигналов.

Наблюдающаяся на современном этапе научно-технического развития тенденция трансферта оптических и радиочастотных технологий обусловила повышенный интерес к этим устройствам как аналогам оптических фотонных кристаллов, Брэгговских структур и метаматериалов. Исследование свойств таких устройств в одном диапазоне электромагнитных колебаний может помочь открыть новые качества и явления в другом диапазоне.

Одним из направлений обмена технологий являются сенсорные приложения. Примером может служить волоконно-оптическая решетка Брэгга, широко используемая в измерительной технике, аналогом которой в радиодиапазоне можно назвать коаксиальный волновод с продольными периодическими неоднородностями.

В настоящей работе рассматриваются методы измерения физических полей и параметров материальных сред, основанные на использовании в качестве преобразовательного элемента ре-

шетки Брэгга на радиочастотном коаксиальном кабеле.

**1. Брэгговская СВЧ-структура на коаксиальном кабеле (БССКК)**

В радиочастотной области аналогом волоконной решетки Брэгга можно считать структуру, представляющую собой расположенные в направляющем волноводе периодические нерегулярности волнового сопротивления. В качестве направляющей системы может быть использован коаксиальный волновод, частным случаем такой структуры является Брэгговская СВЧ-структура в коаксиальном кабеле [1–2]. Введение нерегулярностей в поперечных сечениях БССКК производится высверливанием отверстий во внешнем проводнике и диэлектрическом заполнении кабеля (рис. 1, а).

Периодическое расположение отверстий приводит к отражениям распространяющейся электромагнитной волны от каждой нерегулярности. Суперпозиция отраженных волн формирует частотную характеристику коэффициента отражения БССКК, в которой существуют кратные дискретные резонансы, определяемые условием Брэгга:

$$f_{\text{рез}}^m = \frac{m}{2\Lambda\sqrt{LC}},$$

где  $m$  – порядок дифракции резонансной частоты;  $\Lambda$  – период решетки (расстояние между отверстиями);  $L$  и  $C$  – погонная индуктивность и емкость коаксиального кабеля.

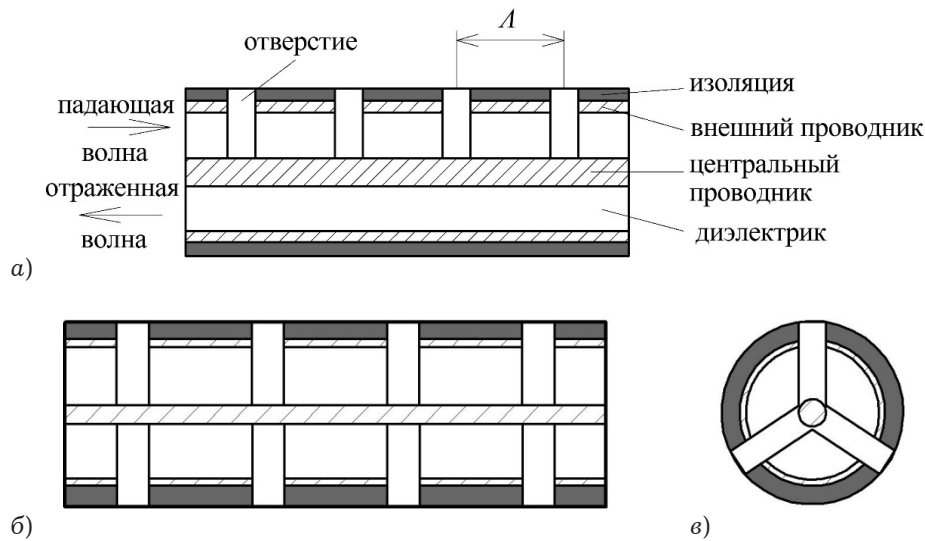


Рис. 1. Разновидности форм БССКК: а) с односторонним; б) с двусторонним расположением отверстий; в) под углом  $120^\circ$

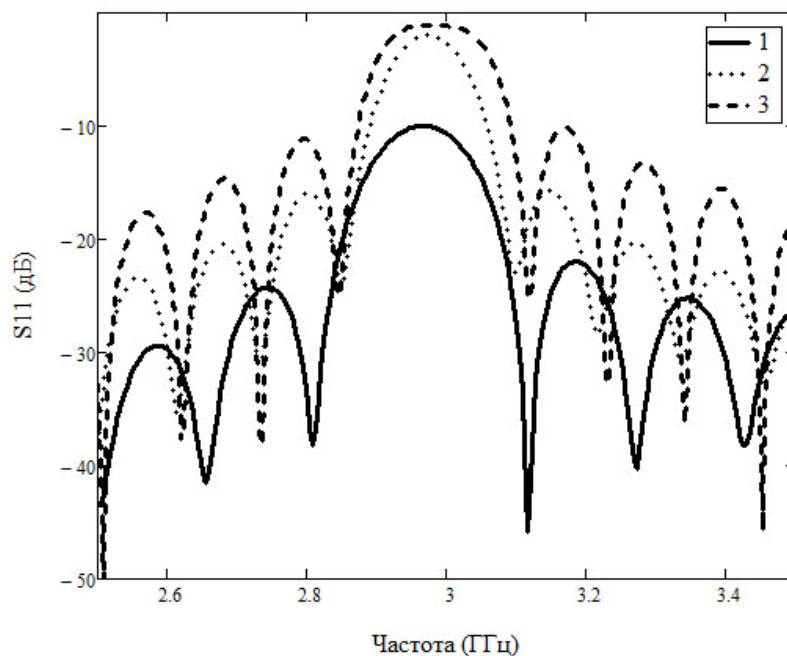


Рис. 2. Коэффициент отражения БССКК: 1 – с односторонним, 2 – с двусторонним, 3 – под углом  $120^\circ$  расположением отверстий

На рис. 1, а представлена базовая модель БССКК, впервые предложенная в [2]. Помимо данной структуры возможны модификации форм неоднородностей, позволяющие управлять характером частотных свойств БССКК, например, изготовлены и исследованы структуры с диаметрально расположенными отверстиями (рис. 1, б) и с расположением отверстий под углом  $120^\circ$  (рис. 1, в).

На рис. 2 приводятся частотные зависимости коэффициента отражения для трех форм неоднородностей.

Как можно видеть из рис. 2, при увеличении числа отверстий в поперечном сечении кабеля коэффициент отражения на резонансной частоте

увеличивается и стремится к единице. При количестве отверстий в сечении большем трех наблюдается увеличение полосы контура с одновременным увеличением крутизны склонов.

## 2. Применение БССКК в сенсорных системах

Помимо явно выраженной практической значимости БССКК в задачах фильтрации и преобразования радиочастотных сигналов, перспективным направлением использования можно назвать измерение и контроль параметров материальных сред и физических полей. Наиболее примечательным направлением применения БССКК являются измерение уровня деформации

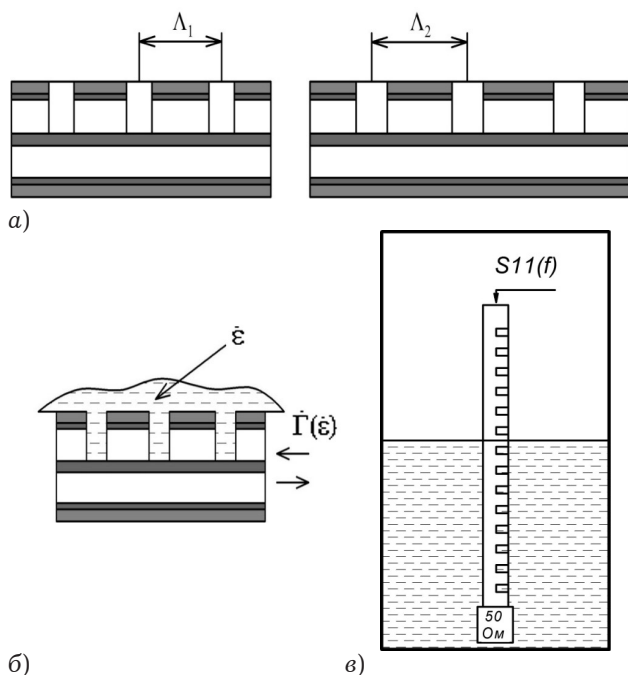


Рис. 3. К пояснению применения БССКК в сенсорной технике

ций [1], температуры [3–4], электрофизических параметров материалов и веществ, включая их вещественную и мнимую части комплексной диэлектрической проницаемости [4–6], измерение уровня. В основе предлагаемых методов лежит зависимость частотных характеристик коэффициента отражения и передачи БССКК от параметров внешних воздействий.

Датчик растяжения на БССКК основан на зависимости периода структуры (расстояния между отверстиями) от приложенной к кабелю растягивающей силы. Пропорционально увеличению периода при растяжении уменьшается центральная частота резонанса характеристики отражения (рис. 3, а), по значению сдвига частоты можно определить величину деформации [1].

Измерение комплексной диэлектрической проницаемости (КДП) вещества происходит при заполнении им отверстий БССКК (рис. 3, б). В результате преобразования комплексной проводимости неоднородности изменяется форма частотной характеристики коэффициента отражения и передачи БССКК, характер которых будет указывать на значения диэлектрических параметров исследуемой среды.

Простейший вариант измерителя уровня на БССКК показан на рис. 3, в и представляет собой отрезок коаксиального кабеля с периодически расположенными отверстиями круглого сечения по всей длине кабеля. Отверстия прорезают внешнюю изоляцию, внешний проводник и

внутренний диэлектрик кабеля. Кабель опускается в резервуар с контролируемой жидкостью в вертикальном положении с подключенной согласованной нагрузкой, длина кабеля должна соответствовать максимально возможному уровню жидкости. По мере увеличения уровня, отверстия кабеля поочередно заполняются жидкостью, что эквивалентно последовательному соединению двух БССКК с различными изменяющимися во времени параметрами, задающими центральную частоту и уровень резонанса каждой решетки. Контролируемым параметром в этом случае будет являться отношение амплитуд резонансов коэффициента отражения от верхнего порта двух эквивалентных решеток.

### 3. Описание характеристик БССКК в сенсорных приложениях

Теоретический анализ свойств и характеристик БССКК возможен следующими аналитическими и вычислительными операциями: методы численного расчета электромагнитных полей в неоднородной линии передачи (теория связанных мод), приложения теории СВЧ-цепей (матричный метод, метод ориентированных графов) и компьютерное моделирование в специализированных программах синтеза электродинамических структур.

В настоящей работе предложено описание частотных характеристик с помощью метода ориентированных графов. Этот метод позволяет получить характеристики отражения и передачи СВЧ-устройства в аналитическом виде. Если принять диаметр отверстий не более 5 мм, то в диапазоне частот до 10 ГГц неоднородности в кабеле можно считать сосредоточенными. При этом предположении возможен вывод коэффициентов отражения и передачи БССКК методом ориентированных графов для каскадного соединения  $N$  одинаковых параллельных неоднородностей с расстояниями между ними  $\Lambda$ . На рис. 4 показана эквивалентная схема включения и ориентированный граф для БССКК, где  $\Gamma$  – коэффициент отражения отдельного отверстия;  $a_1$  и  $b_1$  – падающая и отраженная волна на входе БССКК;  $b_N$  – волна на выходе БССКК.

В результате решения данного ориентированного графа с помощью метода не касающегося контура [7] получим выражение для коэффициента отражения БССКК:

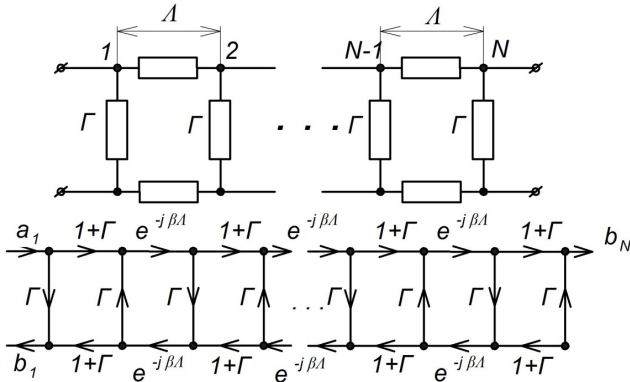


Рис. 4. Эквивалентная схема включения и ориентированный граф для БССКК

$$\Gamma_{\text{РВКК}} = \Gamma e^{-j2\beta\Lambda} \frac{1 - \left[ (1 + \Gamma)^2 e^{-j2\beta\Lambda} \right]^N}{1 - (1 + \Gamma)^2 e^{-j2\beta\Lambda}}.$$

Выражение для коэффициента отражения от неоднородности в общем виде можно представить как

$$\Gamma = -\frac{y}{2 + y}$$

где  $y = g + jb$  – нормированная полная проводимость неоднородности.

При построении и анализе ориентированного графа в случае измерения деформации учитывается, что параметр  $\Lambda$  будет зависеть от относительного растяжения  $\varepsilon$  и относительного удлинения расстояния между отверстиями  $\Delta\Lambda$  в виде  $\Lambda = \Delta\Lambda / \varepsilon$  при однородном распределении растяжения по длине кабеля.

Заполнение отверстий структуры исследуемой жидкостью при определении ее диэлектрической проницаемости и коэффициента потерь приводит к преобразованию комплексного коэффициента отражения неоднородного участка  $\Gamma$ . Задание данной зависимости в аналитическом виде является сложной задачей и может быть определено с привлечением программ электродинамического моделирования, либо экспериментальным методом.

С помощью метода ориентированных графов можно получить аналитическую зависимость для коэффициента отражения БССКК, используемого в качестве уровнемера. Ориентированный граф в этом случае будет иметь вид, показанный на рис. 5, представляющий собой каскадное соединение двух БССКК: с воздушным и жидкостным заполнением.

БССКК для воздушного заполнения представлена коэффициентом отражения  $\Gamma_1$  и коэффициентом передачи  $K_1$ , для заполнения жид-

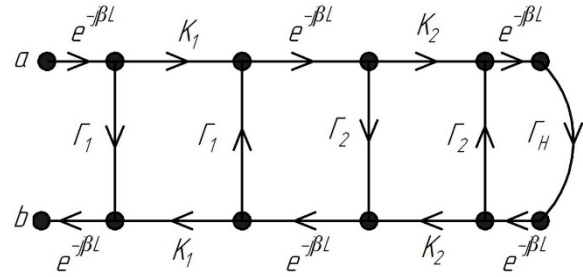


Рис. 5. Ориентированный граф уровнемера на БССКК

костью –  $\Gamma_2$  и  $K_2$ , соответственно. Последние коэффициенты могут быть найдены отдельно методом графов или матричным методом. К выходному порту БССКК подключена согласованная нагрузка с коэффициентом отражения  $\Gamma_H$ , отстоящая от крайней неоднородности на величину периода решетки  $L$ .

Общий коэффициент отражения решетки можно определить с помощью метода не касающегося контура:

$$\Gamma = \frac{b}{a} = \Gamma_1 e^{-2j\beta L} + [\Gamma_2 K_1^2 e^{-4j\beta L} (1 - \Gamma_2 \Gamma_H e^{-2j\beta L}) + \Gamma_H K_1^2 K_2^2 e^{-6j\beta L}] / [1 - e^{-2j\beta L} (\Gamma_1 \Gamma_2 - \Gamma_2 \Gamma_H - \Gamma_1 \Gamma_H e^{-2j\beta L} + \Gamma_1 \Gamma_2^2 \Gamma_H e^{-2j\beta L})].$$

Используя последнее выражение можно учитывать не идеальность согласованной нагрузки при выполнении моделирования БССКК, а также определить оптимальное расположение заданной нагрузки по отношению к крайнему отверстию БССКК.

#### 4. Результаты моделирования характеристик БССКК в сенсорных приложениях

Численный анализ характеристик отражения БССКК при определении диэлектрических свойств жидкостей проведен для вариантов заполнения отверстий бензином ( $\varepsilon' = 4,5$ ,  $\text{tg } \delta = 0,01$ , рис. 6,  $a$  – линия 1) и ацетоном ( $\varepsilon' = 20,7$ ,  $\text{tg } \delta = 0,05$ , рис. 6,  $a$  – линия 2). БССКК было использовано авторами в качестве преобразователя в информационно-измерительной цепи контроля температурных изменений КДП реагирующей смеси, изменяющейся в процессе деполимеризации ПЭТФ в электродинамических реакторах [8–13]. Частотные зависимости коэффициента отражения БССКК при различной температуре реагента показаны на рис. 6, б.

Результаты моделирования характеристик отражения БССКК, используемого в качестве измерителя уровня бензина, представлены на

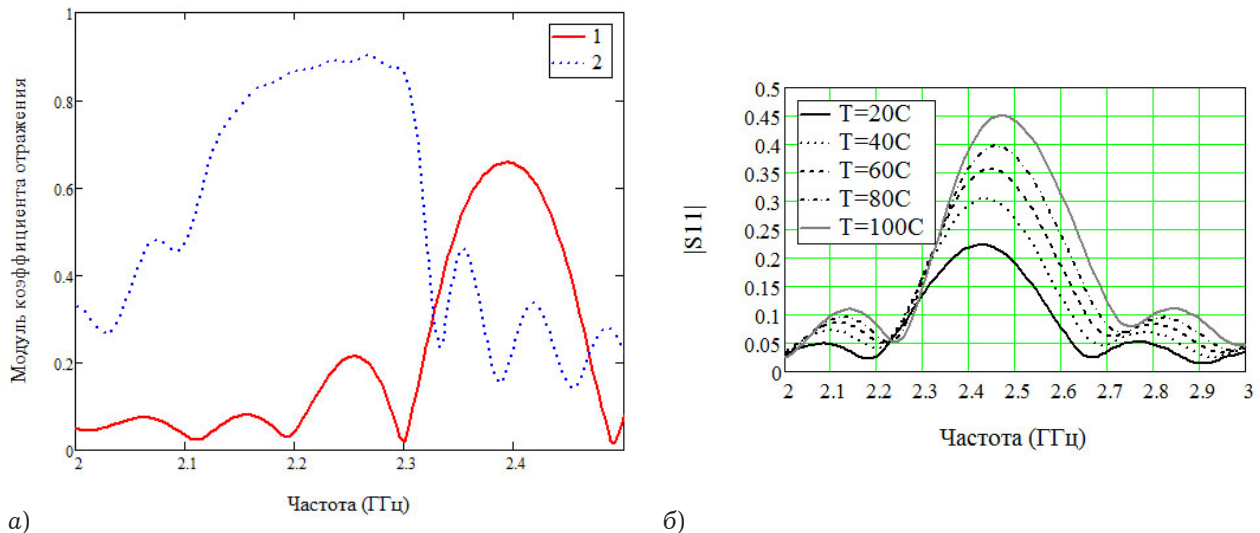


Рис. 6. Частотные зависимости коэффициента отражения БССКК при измерении диэлектрических параметров жидкостей

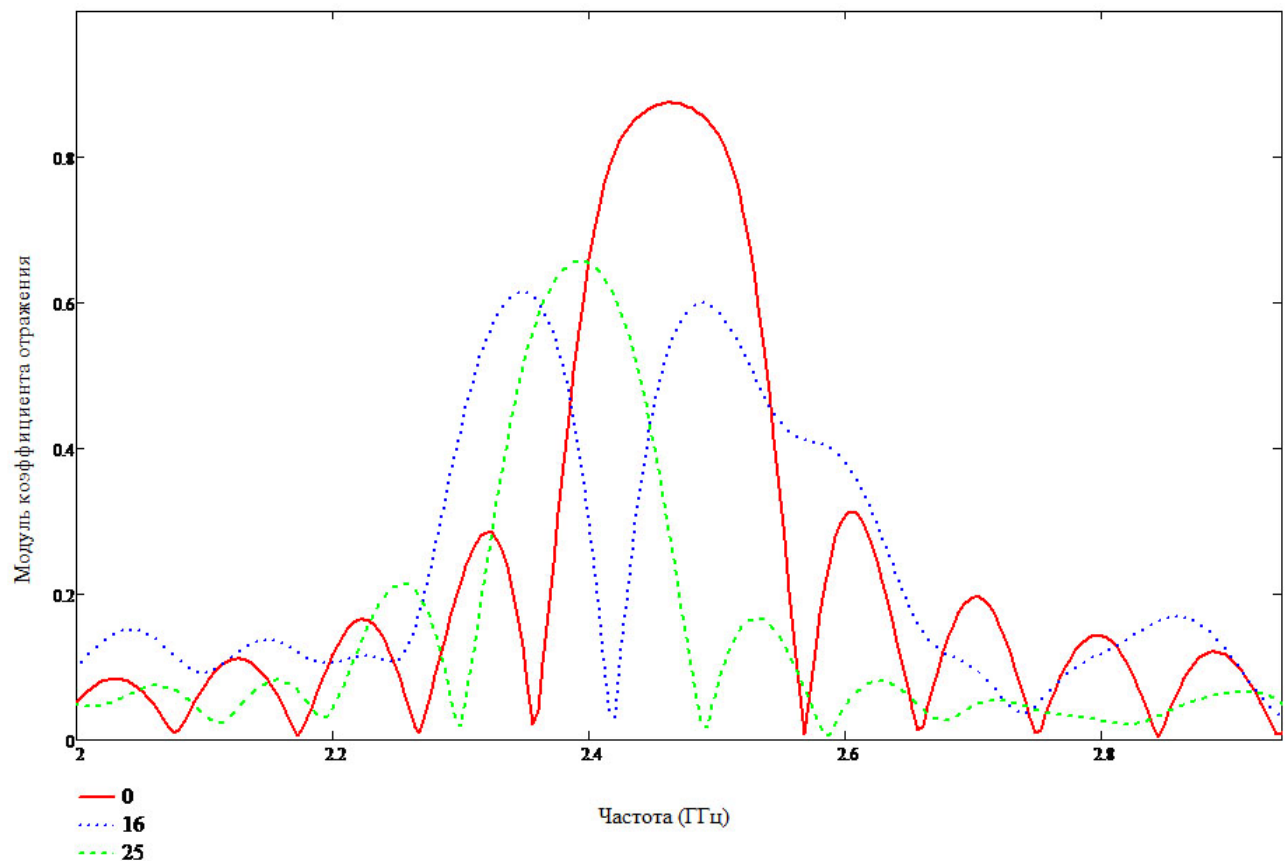


Рис. 7. Частотные зависимости коэффициента отражения БССКК при измерении уровня жидких продуктов

рис. 7, где показаны зависимости для трех значений количества заполненных отверстий.

### Заключение

Информационно-измерительные системы, использующие в качестве преобразовательных элементов БССКК, могут найти широкое применение в структурном мониторинге строительных сооружений, контроле целостности материалов авиационной промышленности и судостроения,

мониторинге качества диэлектрических продуктов, определении уровня жидких продуктов в технологических резервуарах.

Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства образования и науки Российской Федерации в рамках базовой и проектной частей государственного задания на оказание услуг (выполнение работ) по организации научных исследований, выполняемых ФГБОУ ВПО «КНИТУ-КАИ» на кафедре телевидения и



мультимедийных систем и в научно-исследовательском институте прикладной электродинамики, фотоники и живых систем (программа «Фотоника», задание З.1962.2014К).

### Список литературы

1. 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.
2. Coaxial cable Bragg grating / W. Tao [et al.] // Appl. Phys. Lett. 2011. № 99. P. 113517.
3. Насыбуллин А.Р., Морозов О.Г., Севастьянов А.А. Брэговские сенсорные СВЧ-структуры на коаксиальном кабеле // Журнал радиоэлектроники. 2014. №3. URL: <http://jre.cplire.ru/koi/contents.html>
4. Насыбуллин А.Р. Разработка и исследование СВЧ-устройств для технологий переработки полиэтиленрефталата. Автореферат диссертации на соискание ученой степени кандидата технических наук, Казань. 2012.
5. 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.
6. Севастьянов А.А. Измерение диэлектрических характеристик жидкостей с помощью решеток Брэгга в радиочастотном коаксиальном кабеле // Современные проблемы науки и образования. 2014. № 4. URL: <http://www.science-education.ru/118-14209>
7. Силаев М.А., Брянцев С.Ф. Приложение матриц и графов к анализу СВЧ-устройств. М.: Советское радио, 1970. 248 с.
8. Морозов О.Г., Самигуллин Р.Р., Насыбуллин А.Р. Микроволновые технологии в процессах переработки и утилизации бытовых полимерных отходов // Известия Самарского научного центра Российской академии наук. 2010. Т. 12 (33). № 4 (3). С. 580–582.
9. Микроволновая обработка термореактивных и термопластичных полимеров / О.Г. Морозов [и др.] // Физика волновых процессов и радиотехнические системы. 2011. № 3. С. 114–121.
10. Функциональные адаптивные СВЧ-технологии в задачах переработки термопластичных полимерных материалов / О.Г. Морозов [и др.] // Вестник Поволжского государственного технологического университета. Серия: Радиотехнические и инфокоммуникационные системы. 2011. № 3. С. 13–25.
11. Выбор оптимальной структуры построения СВЧ-комплекса обработки термореактивных композитных материалов / О.Г. Морозов [и др.] // Известия Самарского научного центра Российской академии наук. 2012. Т. 14 (35). № 1 (2). С. 525–529.
12. Резонансный метод мониторинга технологического процесса отверждения полимеров / О.Г. Морозов [и др.] // Вестник Поволжского государственного технологического университета. Серия: Радиотехнические и инфокоммуникационные системы. 2012. № 1. С. 67–75.
13. Резонансные методы мониторинга технологических процессов отверждения полимеров в функционально адаптивных СВЧ-реакторах / О.Г. Морозов [и др.] // Известия Самарского научного центра Российской академии наук. 2012. Т. 14 (35). № 1 (2). С. 568–572.

## Bragg coaxial microwave structure in the sensor system

G.A. Morozov, O.G. Morozov, A.R. Nasybullin, A.A. Sevastjanov, R.V. Farkhutdinov

The paper discusses the Bragg microwave structures on the coaxial cable that are based on optical technology transfer by analogy with fiber Bragg gratings. The variants of the use of such coaxial Bragg microwave structures in sensor applications, in particular discusses the creation of mechanical strain meters, the dielectric parameters of liquids and the level of liquid products.

*Keywords:* Bragg microwave structures on the coaxial cable, the method of directed graphs, sensor applications, strain, dielectric constant, and level meter.