

ПРИМЕНЕНИЕ НЕПЛАНАРНЫХ МИКРОПОЛОСКОВЫХ СВЧ СТРУКТУР ДЛЯ КОНТРОЛЯ ДИЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ ЖИДКОСТЕЙ И ТВЕРДЫХ МАТЕРИАЛОВ

Т.М. Ишкаев, А.Р. Насыбуллин, Р.В. Фархутдинов, Р.Р. Самигуллин

Казанский Национальный Исследовательский Технический Университет им. А.Н. Туполева — КАИ, г. Казань.

В данной статье отражаются основные результаты компьютерного моделирования, практической реализации и применения непланарной микрополосковой периодической СВЧ структуры в качестве преобразовательного элемента в задачах контроля диэлектрических параметров материалов и веществ. Основными достоинствами подобной реализации датчика являются большая чувствительность и относительно небольшие линейные размеры по сравнению с аналогичными, реализованными на основе планарных СВЧ структур. Помимо этого, благодаря непланарной форме микрополосковой линии расширяется диапазон областей применения СВЧ датчиков.

Ключевые слова: микрополосковые линии, брэгговские СВЧ структуры, компьютерное моделирование, 3D печать, векторный анализ цепей, преобразовательный элемент, контроль диэлектрических параметров.

ВВЕДЕНИЕ

СВЧ устройства с периодическими свойствами широко известны в теории и технике направляющих и излучающих систем. Подобные устройства стали основным элементом в фильтрах, электронных приборах, линиях задержки и антеннах. В последнее время интерес к периодическим структурам возобновился в связи с развитием новых направлений их применения [1]. По аналогии с их оптическими аналогами такие структуры начали называть брэгговскими СВЧ-структурами или фотонными СВЧ кристаллами [2,3]. Брэгговские СВЧ-структуры – это периодические геометрии, построенные путем повторения элементарной ячейки или конструктивного элемента в одном, двух или трех измерениях. Такие системы называют одномерными, двумерными и трехмерными фотонными кристаллами соответственно. Электрические размеры таких ячеек сравнимы и связаны с рабочей длиной волны в СВЧ диапазоне. Одним из перспективных направлений в области их практического использования становится измерительная техника и, в частности, устройства для измерения диэлектрических параметров материалов и сред в СВЧ диапазон электромагнитных волн [4,5].

Наибольшее распространение в СВЧ диапазоне получили брэгговские структуры, в основе которых лежат планарные линии передачи [6]. Главными недостатками таких структур являются их большие линейные размеры в низко-волновой области СВЧ диапазона и паразитное излучение в открытое пространство.

ОСНОВНАЯ ЧАСТЬ

В связи с требованиями к минимизации размеров датчиков остро встает проблема длины

преобразовательных элементов СВЧ диапазона, особенно реализованных в виде брэгговских структур. Для решения указанной проблемы предлагается датчик в виде непланарной микрополосковой линии (НМПЛ), имеющей изогнутую форму с повторяющимися секциями (рис. 1). Электрическая величина пространственного периода будет определяться как высотой, так и длиной ячейки, таким образом можно значительно уменьшить геометрическую длину структуры за счет увеличения высоты. Компьютерное электромагнитное моделирование было выполнено в программе CST Studio Suite 2019. Данная программа позволяет рассчитать трехмерное распределение электромагнитного поля, вычисление реализуется методом конечных разностей во временной области. Так как данный численный метод решения дифференциальных уравнений является сеточным методом, то исследуемая 3D-модель разбивается на ячейки прямоугольной формы. В рассматриваемых моделях разбиение осуществлялось на 17-18 млн. ячеек, что позволяло повысить точность вычислений на криволинейных участках структуры. В качестве внешнего к структуре пространства выбирался вакуум с ограничением области расчета с помощью идеально поглощающих поверхностей.

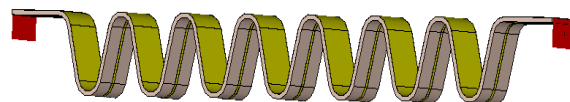


Рис. 1. Компьютерная модель непланарной микрополосковой СВЧ структуры

Присущая такой линии периодичность приводит к формированию слабо выраженных брэгговских

резонансов. Частотные характеристики модуля коэффициента отражения и коэффициента передачи приведены на рис. 2.

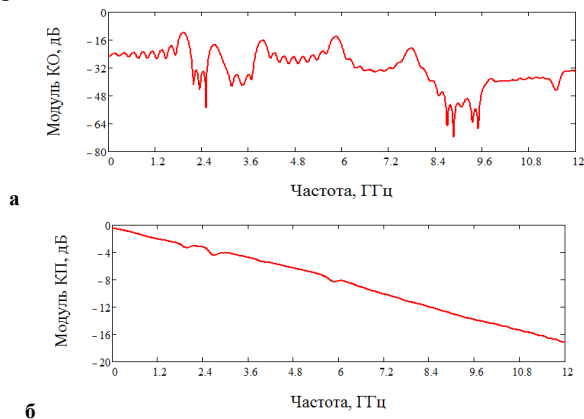


Рис. 2. Частотные зависимости коэффициента отражения (а) и коэффициента передачи (б) НМПЛ

Брэгговские резонансы обладают кратными частотами в силу природы эффекта. Анализируя частотные характеристики можно также наблюдать некротный резонанс, находящийся между первым и вторым резонансами. Причиной его возникновения являются резонансные эффекты, проявляющиеся в близкорасположенных друг к другу областях НМПЛ за счет взаимной связи. Назовем его «побочным» резонансом.

Одним из вариантов применения такой структуры – диагностика диэлектрических параметров твердых материалов. При измерении диэлектрической проницаемости таких материалов большое влияние в результаты измерений вносит плотность примыкания чувствительного элемента к исследуемому объекту. Непланируемая форма сформированной структуры позволяет нивелировать неровности и шероховатости поверхности, тем самым минимизировать негативные влияние последних. Помимо этого, при исполнении структуры на гибкой подложке, появляется возможность контроля криволинейных поверхностей. Компьютерная модель процесса измерения диэлектрической проницаемости твердых материалов представлена на рис. 3. Преобразование частотных характеристик модуля коэффициентов отражения и передачи при вариации вещественной части комплексной диэлектрической проницаемости ϵ исследуемого объекта показано на рис. 4.

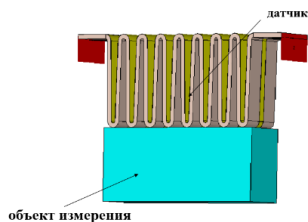


Рис. 3. Компьютерная модель измерения ϵ твердого материала с плоской поверхностью

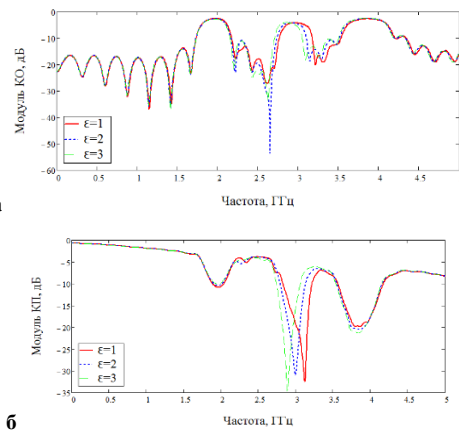


Рис. 4. Изменение коэффициентов отражения (а) и передачи (б) НМПЛ при вариации ϵ исследуемого объекта

Изменение диэлектрической проницаемости твердого материала влечет за собой сдвиг резонанса НМПЛ. Из рис. 4 видно, что влияние изменения ϵ на брэгговские резонансы не значительно, что объясняется малой интенсивностью электрического поля этих резонансов в области расположения объекта. В свою очередь «побочный» резонанс показывает более высокую чувствительность, что свидетельствует о большей концентрации поля в области контроля.

Аналогичное компьютерное моделирование было проведено для варианта измерения диэлектрической проницаемости жидких сред. В данном случае моделировалось погружение НМПЛ в исследуемую среду (Рис. 5). На рис. 6 представлены частотные зависимости модулей коэффициентов отражения и передачи НМПЛ при изменении ϵ .

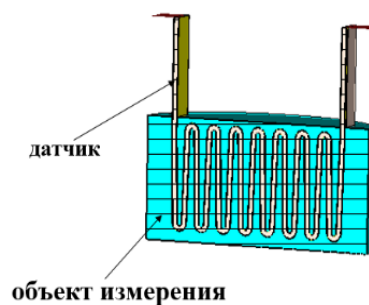


Рис. 5. Компьютерная модель измерения ϵ жидкости

При измерении жидких сред изменению подвергаются все резонансы, так как среда полностью заполняет пространство, в котором сосредоточено электрическое поле вне подложки. Тем не менее по причине большей интенсивности электрического поля «побочного» резонанса между противоположными линиями, то есть именно там, где присутствует измеряемая среда, наиболее эффективно, с точки

зрения чувствительности, использовать именно этот резонанс для получения измерительной информации.

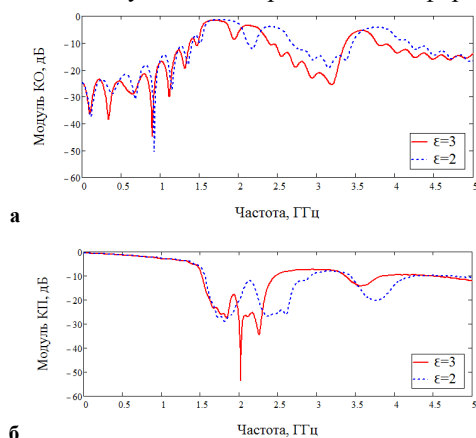


Рис. 6. Изменение частотной зависимости коэффициентов отражения (а) и передачи (б) модели приведенной на рис. 5

В задачах измерительного контроля наиболее важно отследить малые вариации искомых параметров, изменяющихся в относительно небольшом диапазоне возможных значений. В этом случае целесообразнее контролировать изменение фазы коэффициента передачи НМПЛ как наиболее чувствительного к изменению ϵ параметра.

На рис. 7. приведены графики для фазы коэффициента передачи при вариации диэлектрической проницаемости жидкости и твердого материала на 0.1 единицы.

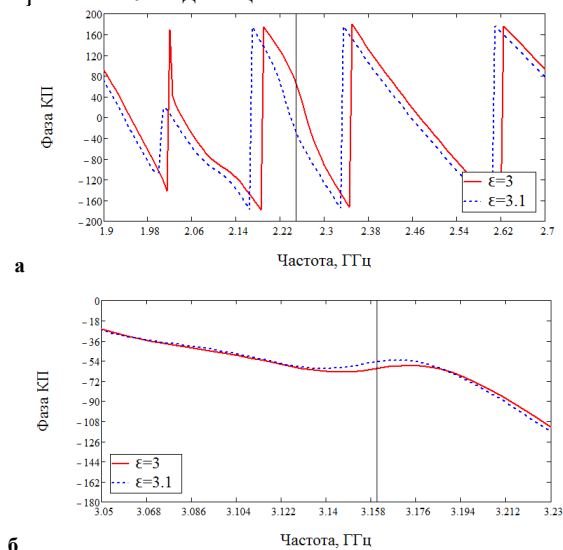


Рис. 7. Изменение фазы коэффициента передачи НМПЛ при вариации диэлектрической проницаемости на 0.1 единицы: а) для жидкости б) для твердого материала

Максимальная чувствительность преобразования на обозначенных маркерах частотах (рис.7) составила $S=93\%0.1\epsilon$ для случая измерения жидкости (на частоте 2,25 ГГц) и $S=6\%0.1\epsilon$ для случая с твердым

материалом (на частоте 3,16 ГГц). Для проведения сравнительного анализа определим чувствительности измерения, когда в качестве датчиков применяются планарные регулярные и планарные брэгговские микрополосковые структуры с длиной 60 мм, эквивалентные непланарной структуре с идентичной эффективной длиной. Чувствительность при измерении с помощью планарных регулярных микрополосковых линий можно определить по формуле

$$S = \frac{2\pi fl}{c} \frac{(\sqrt{\epsilon_{эфф}(\epsilon_2)} - \sqrt{\epsilon_{эфф}(\epsilon_1)})}{\epsilon_2 - \epsilon_1}$$

где l – длина линии, f – частота, c – скорость света, ϵ_1 – исходная диэлектрическая проницаемость образца, ϵ_2 – конечная диэлектрическая проницаемость образца. Функция эффективной диэлектрической проницаемости линии от диэлектрической проницаемости образца $\epsilon_{эфф}(\epsilon)$ является сложной функцией, зависящей от диэлектрических и геометрических параметров линии. Значения этой функции можно оценить по численным результатам из [7]. В результате получим для линии длиной 60 мм на частоте 3 ГГц чувствительность $S=3\%0.1\epsilon$.

Для отрезков планарных микрополосковых линий с периодическими неоднородностями, которые также называют брэгговскими СВЧ структурами, чувствительность измерения диэлектрической проницаемости на определенных частотах становится больше, чем у регулярной линии. В [8] проводится анализ чувствительности таких датчиков, где показано, что для брэгговской структуры с длиной 30 мм максимальная чувствительность составляет $S=7,5\%0.1\epsilon$ на частоте примерно 3 ГГц. Эквивалентная структура с длиной 60 мм будет обладать чувствительностью $S=15\%0.1\epsilon$. Можно сделать вывод, что непланарная периодическая структура обладает большей в 6 раза чувствительностью при анализе жидких сред. Для твердых материалов у планарной брэгговской структуры чувствительность больше в 2,5 раза, но при измерении материалов с неидеально плоской поверхностью наблюдаются большие погрешности, непланарная структура такими недостатками не обладает.

Разработанные структуры имеют достаточно сложную геометрическую форму, изготовление которых сопряжено с рядом трудностей. Основой для создания НМПЛ могут выступать гибкие СВЧ фольгированные пленки такие как Taiflex, Shengyi и другие. При использовании тонких подложек и расчете волнового сопротивления линии, равного 50 Ом, ширина полоска стремится к сотым долям миллиметра, что влечет за собой трудности в технологии изготовления. Второй вариант

исполнения предполагает использование медной фольги, наклеенной на отформованную фторопластовую ленту толщиной 0.8 мм. Подобная реализация позволяет снизить стоимость изготовления, а также увеличить ширину полоскового проводника, величина которого будет составлять порядка 2.5 мм. Однако из-за низкого уровня адгезии фторопласта склеивание фторопластовой ленты и медной фольги довольно сложная задача.

Третий вариант реализации НМПЛ основан на применении 3Д печати и решает все вышеперечисленные проблемы и недостатки. Использование аддитивных технологий позволяет реализовывать разработанные структуры любой конфигурации и сложности. Пластики для 3Д печати являются диэлектриками и зная их диэлектрические характеристики можно рассчитать параметры линии для необходимого волнового сопротивления. Кроме этого, приклеивание медной фольги к таким пластикам осуществляется проще, чем к фторопласту.

Для изготовления диэлектрической подложки с применениями аддитивных технологий был выбран Полилактид (PLA), диэлектрические характеристики которого: $\epsilon=2.7$ и $tg\delta=0.01$ [9-11]. Печать проводилась на 3Д принтере FlyingBear при следующих параметрах печати: толщина слоя – 0.2 мм, диаметр сопла – 0.4 мм, температура стола – 190 °С, количество слоев модели – 99, заполнение – 100 %. Весь процесс печати занял около 2.5 часов. Линейные размеры полученной структуры составили: 77x31x20 мм без разъемов SMA и 100x36x20 мм с разъемами. Приклеивание медной фольги к напечатанной диэлектрической подложке проводилось на двухкомпонентный эпоксидный клей ULTIMA. На рис. 8 приведен внешний вид созданного макета НМПЛ.

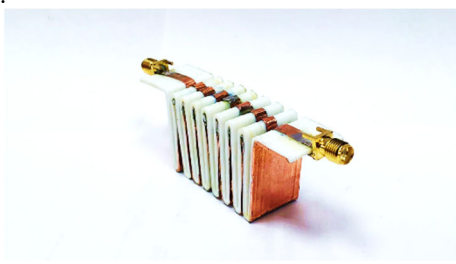


Рис. 8. Физическая реализация НМПЛ

Измерения характеристик реализованной структуры проводились на векторном анализаторе цепей Rohde&Schwarz FSH8 в диапазоне от 100 МГц до 5ГГц. Процесс измерения макета НМПЛ приведен на рис. 9.

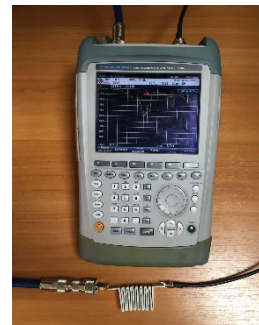


Рис. 9. Процесс измерения реализованного макета НМПЛ

Сравнительные результаты реализованной НМПЛ и компьютерной модели приведены на рис. 10.

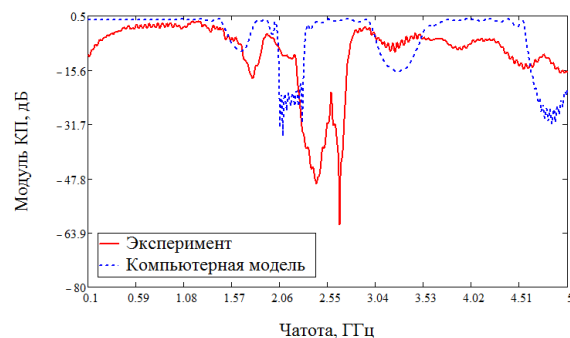


Рис. 10. Сравнение частотных зависимостей коэффициента передачи для компьютерной модели и реализованного макета НМПЛ

Разница характеристик реализованной структуры и компьютерной модели обусловлены отличием диэлектрической проницаемости материала подложки НМПЛ, заданной при моделировании, от реальной, которая в действительности оказалась меньше. Значение диэлектрической проницаемости PLA зависит от марки производителя пластика, что влечет за собой необходимость дополнительных измерений диэлектрических характеристик перед изготовлением подложки.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В статье проводится оценка возможности применения непланарных микрополосковых линий для контроля диэлектрических параметров твердых материалов и жидкостей. Существование связи диэлектрических параметров с другими физико-химическими характеристиками вещества, позволяет строить на основе подобных элементов датчики для анализа концентрации компонентов, измерения влажности и др. Предложенные в статье преобразовательные элементы обладают повышенной чувствительностью и меньшими габаритами по сравнению с аналогичными планарными.

Научные исследования проведены при финансовой поддержке Минобрнауки России в

рамках исполнения обязательств по Соглашению № 075-03-2020-051/6 (номер темы fzsu-2020-0020).

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. Усанов, Д.А., Никитов, С.А., Скрипаль А.В., Пономарев Д.В., О.М. Рузанов и И.О. Тимофеев, “Использование сверхвысокочастотной коаксиальной брэгговской структуры для измерения параметров диэлектриков,” *Радиотехника и электроника*, № 65, № 5, С. 495-503, май, 2020.

2. Севастьянов, А.А. Брэгговские СВЧ-структуры в коаксиальном кабеле для систем контроля уровня жидких сред. [Текст]: дис. канд. тех. наук: 05.12.07: защищена 20.02.2015 утв. 01.06.2015 / Севастьянов Александр Александрович. – С., 2014. – 175 с.

3. Сверхвысокочастотные брэгговские структуры в полукрытой коаксиальной линии / Насыбуллин, А.Р. [и др.] // Вопросы радиоэлектроники. – 2021. - № 1. – С. 4-12.

4. Фархутдинов, Р.В., Насыбуллин, А.Р., Морозов, О.Г., Вазиев, Т.О., Т.М. Ишкаев и В.В. Садчиков, “Брэгговская СВЧ-структура в коаксиальном волноводе как датчик контроля диэлектрических параметров жидких сред,” *Физика волновых процессов и радиотехнические системы*, №22, №4-2, С.114–120, декабрь, 2019.

5. Ишкаев, Т.М., А.Р. Насыбуллин и Р.В. Шакиров, “Компьютерное моделирование непланарной микрополосковой брэгговской структуры,” *XVIII Международная научно-техническая конференция «Физика и технические приложения волновых процессов – 2020»*, Самара, Россия, С. 168-169, ноябрь, 2020.

6. Насыбуллин, А.Р. Преобразовательные элементы на основе полосковых брэгговских структур для СВЧ датчиков параметров технологических процессов [Текст] / А.Р. Насыбуллин // Научно-технический вестник Поволжья. – 2016. – № 3. – С. 129-131.

7. Bahl, I.J. and Stuchly, S.S. “Analysis of a microstrip covered with a lossy dielectric,” *Journal of IEEE Transactions on microwave theory and techniques*, vol. mtt-28, no. 2, pp. 104-109, February 1980.

8. Garcia-Banos, B., Cuesta-Soto, F., Griol, A., J.M. Catala-Civera and J. Pitarch “Enhancement of sensitivity of microwave planar sensors with EBG structures,” *Journal of IEEE Sensors*, vol. 6, no. 6, pp. 1518-1522, December 2006. DOI: 10.1109/JSEN.2006.884506.

9. Bahareh, B., Bruce, D C., Nader, B. and Alan, B M. “Dielectric properties of 3D-printed materials for anatomy specific 3D-printed MRI coils,” *Journal of Magnetic Resonance*, vol. 289, pp. 113-121, April, 2018.

10. Badia, J.D., Monreal, L., Saenz de Juano-Arbona, and Ribes-Greus A. “Dielectric spectroscopy of recycled polylactide,” *Polymer Degradation and Stability*, vol. 107, pp. 21-2, September, 2014.

11. Claudius, D., Sippel, P. and Krohns, S. “Dielectric Properties of 3D Printed Polylactic acid,” *Advances in Materials Science and Engineering*, vol 2017, <https://doi.org/10.1155/2017/6913835>

Ишкаев Тимур Маратович — ассистент кафедры «Конструирования и Технологии Производства Электронных Средств» Казанского Национального Исследовательского Технического Университета им. А.Н. Туполева – КАИ, тел.: +7 (987) 260-54-89, e-mail: timur.ishk.kai@gmail.com

Насыбуллин Айдар Ревкатович — к.т.н., доцент, доцент кафедры «Конструирования и Технологии Производства Электронных Средств» Казанского Национального Исследовательского Технического Университета им. А.Н. Туполева – КАИ, тел.: (843) 231-59-18, e-mail: aydar.nasybullin@mail.ru

Фархутдинов Рафаэль Вазирович — к.т.н., доцент кафедры «Радиофотоники и микроволновых технологий» Казанского Национального Исследовательского Технического Университета им. А.Н. Туполева – КАИ, тел.: (843) 231-59-18, e-mail: 23rafael@mail.ru

Самигуллин Рустем Разяпович — к.т.н., доцент, доцент кафедры «Радиофотоники и микроволновых технологий» Казанского Национального Исследовательского Технического Университета им. А.Н. Туполева – КАИ, тел.: (843) 231-59-18, e-mail: nicpre@list.ru

APPLICATION OF NONPLANAR MICROSTRIP MICROWAVE STRUCTURES FOR GAUGING THE DIELECTRIC PARAMETERS OF LIQUIDS AND SOLID MATERIALS

T.M. Ishkaev, A.R. Nasybullin, R.V. Farkhutdinov, R.R. Samigullin

Kazan National Research Technical University Named after A. N. Tupolev - KAI

Abstract – This article reflects the main results of computer modeling, practical implementation and application of a nonplanar microstrip periodic microwave structure as transducer in the problems of gauging the dielectric parameters of materials and substances. The main advantages of such a sensor implementation are high sensitivity and relatively small linear dimensions in comparison with similar ones based on planar microwave structures. In addition, due to the nonplanar shape of the microstrip line, the range of applications for microwave sensors is expanded.

Index terms: microstrip lines, Bragg microwave structures, computer modeling, 3D printing, vector network analysis, transducer, dielectric parameters gauging.

REFERENCES

1. Usanov, D.A., Nikitov, S.A., Skripal' A.V., Ponomarev D.V., O.M. Ruzanov и I.O. Timofeev, Ispol'zovaniye sverkhvysokochastotnoy koaksial'noy breggovskoy struktury dlya izmereniya parametrov dielektrikov [Application of a microwave coaxial bragg structure for the measurement of parameters of insulators], Radiotekhnika i elektronika, vol. 65, no. 5, pp. 495-503, may, 2020.
2. Sevast'yanov, A.A. "Bragg microwave structures in a coaxial cable for liquid level control systems," Ph.D. dissertation, KNRTU-KAI, 2014.
3. Nasybullin, A.R. et. al, Sverkhvysokochastotnyye breggovskiy struktury v poluotkrytoy koaksial'noy linii [Microwave Bragg structures in a half-open coaxial line], Voprosy radioelektroniki, no 1, 2021, pp. 4-12.
4. Farkhutdinov, R.V., Nasybullin, A.R., Morozov, O.G., Vaziev, T.O., T.M. Ishkaev and V.V. Sadchikov Breggovskaya SVCH-struktura v koaksial'nom volnovode kak datchik kontrolya dielektricheskikh parametrov zhidkikh sred [Bragg microwave structure in a coaxial waveguide as a sensor for monitoring the dielectric parameters of liquid environments], Fizika volnovykh protsessov i radiotekhnicheskiye sistemy, vol.22, no. 4-2, pp. 114-120, december, 2019.
5. Ishkaev, T.M., A.R. Nasybullin and R.V. Shakirov "Computer simulation of a nonplanar microstrip Bragg structure," XVIII International Scientific and Technical Conference "Physics and Technical Applications of Wave Processes - 2020", Samara, Russia, pp. 168-169, November. 2020.
6. Nasybullin, A.R. Preobrazovatel'nyye elementy na osnove poloskovykh breggovskikh struktur dlya SVCH datchikov parametrov tekhnoloicheskikh protsessov [Converter elements based on strip Bragg structures for microwave sensors of technological process parameters], Nauchno-tehnicheskii vestnik Povolzh'ya, no. 3, 2016 pp. 129-131.
7. Bahl, I.J. and Stuchly, S.S. "Analysis of a microstrip covered with a lossy dielectric," Journal of IEEE Transactions on microwave theory and techniques, vol. mtt-28, no. 2, pp. 104-109, February 1980.
8. Garcia-Banos, B., Cuesta-Soto, F., Griol, A., J.M. Catala-Civera and J. Pitarch "Enhancement of sensitivity of microwave planar sensors with EBG structures," Journal of IEEE Sensors, vol. 6, no. 6, pp. 1518-1522, December 2006. DOI: 10.1109/JSEN.2006.884506.
9. Bahareh, B., Bruce, D C., Nader, B. and Alan, B M. "Dielectric properties of 3D-printed materials for anatomy specific 3D-printed MRI coils," Journal of Magnetic Resonance, vol. 289, pp. 113-121, April, 2018.
10. Badia, J.D., Monreal, L., Saenz de Juano-Arbona, and Ribes-Greus A. "Dielectric spectroscopy of recycled polylactide," Polymer Degradation and Stability, vol. 107, pp. 21-22, September, 2014.
11. Claudius, D., Sippel, P. and Krohns, S. "Dielectric Properties of 3D Printed Polylactic acid," Advances in Materials Science and Engineering, vol 2017, <https://doi.org/10.1155/2017/6913835>

Ishkaev Timur Maratovich – Assistant of the Department of Design and Production Technology of Electronic equipment, Kazan National Research Technical University named after A.N. Tupolev - KAI, +7 (987) 260-54-89, e-mail: timur.ishk.kai@gmail.com.

Nasybullin Aydar Revkatovich – Ph.D., Associate Professor, Associate Professor of the Department of Design and Manufacturing Technologies of Electronic equipment of the Kazan National Research Technical University named after A.N. Tupolev - KAI, (843) 231-59-18, e-mail: aydar.nasybullin@mail.ru

Farkhutdinov Rafael Vazirovich – Ph.D., Associate Professor of the Department of Radiophotonics and Microwave Technologies of the Kazan National Research Technical University named after A.N. Tupolev - KAI, (843) 231-59-18, e-mail: 23rafael@mail.ru

Samigullin Rustem Razyapovich – Ph.D., Associate Professor, Associate Professor of the Department of Radiophotonics and Microwave Technologies of the Kazan National Research Technical University named after A.N. Tupolev - KAI, (843) 231-59-18, e-mail: nicpre@list.ru