

## Проектирование, изготовление и экспериментальное исследование метаматериалов на основе планарных спиралей для фильтрации поляризованного излучения в СВЧ диапазоне

А.Ю. КРАВЧЕНКО, И.В. СЕМЧЕНКО, А.Л. САМОФАЛОВ, И.А. ФАНЯЕВ

Проведено моделирование метаматериала, элементами которого являются планарные спирали, состоящие из металлических полосок, расположенных на противоположных сторонах двусторонней печатной платы. Эти полоски соединены между собой металлизированными отверстиями в диэлектрической подложке. В результате возникает неразрывный проводящий элемент, имеющий вид ломаной спирали и отличающийся по форме от хорошо изученных гладких и канонических спиралей. Планарная спираль проявляет резонансные свойства для заранее выбранной частоты, и поэтому в отношении метаматериала играет роль микрорезонатора или метаатома. Учтены технологические возможности предприятий Республики Беларусь и изготовлен опытный образец метаматериала, с которым проведены экспериментальные исследования.

**Ключевые слова:** метаматериал, поглотитель, фильтрация излучения, планарная спираль, СВЧ диапазон.

The modeling of a metamaterial has been carried out, the elements of which are planar spirals consisting of metal strips located on opposite sides of a double-sided printed circuit board. These strips are interconnected by metallized holes in the dielectric substrate. The result is an unbreakable conductive element that looks like a broken spiral and differs in shape from the well-studied smooth and canonical spirals. A planar spiral exhibits resonant properties for a preselected frequency, and therefore plays the role of a microresonator, or meta-atom, in relation to a metamaterial. The technological capabilities of the enterprises of the Republic of Belarus were taken into account and a prototype of the metamaterial was made, with which experimental studies were carried out.

**Keywords:** metamaterial, absorber, radiation filtration, planar spiral, microwave range.

**Введение.** Применение электромагнитных метаматериалов и метаповерхностей дает новые возможности для управления электромагнитным излучением с использованием структурирования материалов. Метаповерхности могут быть адаптированы к широкому спектру интересных явлений, таких как идеальное поглощение, циркулярный дихроизм, преобразование поляризации падающего электромагнитного излучения и др. [1]–[7]. Преимущества моделирования и разработки метаматериала на основе цилиндрических спиралей показаны в работах [8]–[9]. Однако на практике изготовление метаповерхностей на основе цилиндрических спиралей затруднено, так как требует трехмерного структурирования периодических массивов металлических спиралей. Эти трудности становятся особенно серьезными на частотах, когда спиральные включения должны быть масштабированы до субмикронных размеров. Решением этой проблемы является применение планарных спиралей в качестве элементов метаматериала.

В данной работе описываются теоретические и экспериментальные исследования метаповерхностей на основе планарных спиралей для микроволнового диапазона с акцентом на практическую реализацию таких функциональных метаповерхностей.

Теоретические исследования посвящены основным физическим принципам и свойствам метаповерхностей на основе планарных спиралей путем установления взаимосвязи между параметрами структур (размер, форма, ориентация и периодичность спиральных включений, составляющих метаповерхность, частотная зависимость диэлектрических свойств в используемых материалах и предполагаемый рабочий диапазон частот), а также индивидуальными поляризуемостями включений. Результаты были получены с использованием численного моделирования на основе метода конечных элементов для решения уравнений Максвелла, а также учитывался минимальный размер объекта и допустимое пространственное разрешение соответствующих технологий изготовления.

**Теоретическое исследование.** Для решения ряда практических задач существует необходимость фильтрации отдельных частот. Иллюстрация метаповерхности на основе планар-

ных спиралей, которая поглощает волны на заданной частоте  $f_0$  и при этом является полностью прозрачной для других частот, приведена на рисунке 1. Стрелками схематически показаны падающие и прошедшие волны на различных частотах.

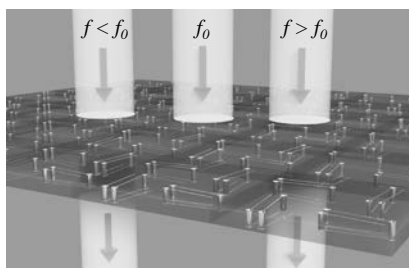


Рисунок 1 – Иллюстрация метаповерхности на основе планарных спиралей, которая поглощает волны на частоте  $f_0$  и при этом является полностью прозрачной для других частот

В работе [10] нами проведен теоретический расчет и построена аналитическая модель планарной спирали, на основании которой можно приблизительно вычислить оптимальные параметры структуры, поглощающей электромагнитные волны заданной частоты. Первое соотношение, которое необходимо использовать для такого расчета, – это условие полуволнового резонанса, оно обеспечивает эффективное возбуждение электрического тока в планарной спирали под действием падающей электромагнитной волны. Главный резонанс имеет место, если полная длина планарной спирали приблизительно равна половине длины волны падающего излучения. Для двухвитковой планарной спирали, показанной на рисунках 2 - 3, это условие имеет следующий вид:

$$4l + 3h \approx \frac{\lambda_0}{2}. \quad (1)$$

Здесь  $l$  – длина металлической полоски на поверхности печатной платы,  $h$  – толщина печатной платы,  $\lambda_0 = \frac{c}{f_0}$  – резонансная длина волны в вакууме,  $f_0$  – резонансная частота падающего излучения,  $c$  – скорость света в вакууме.

Второе соотношение, необходимое для расчета, – это условие баланса электрического дипольного момента и магнитного момента спирали:

$$|\vec{p}| = \frac{|\vec{m}|}{c}. \quad (2)$$

Именно выполнение этого соотношения позволяет называть спираль оптимальной или сбалансированной. Оно означает, что в спирали под действием электромагнитной волны возникают одинаково значимые электрический дипольный момент и магнитный момент.

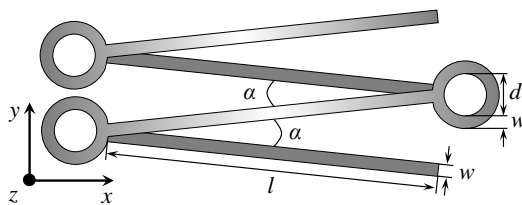


Рисунок 2 – Планарная спираль (вид сверху)

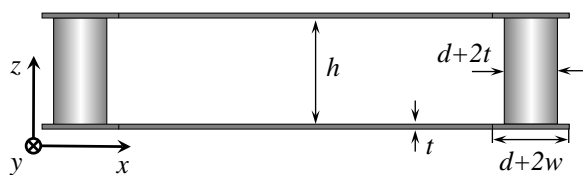


Рисунок 3 – Планарная спираль (вид сбоку)

**Моделирование параметров планарной спирали.** Для получения полного поглощения в метаматериале, который должен быть полностью прозрачным вне резонансной частоты, т. е. не отражать волны во всем исследуемом диапазоне частот, необходимо получить эквивалентный электромагнитный отклик. Достичь желаемых свойств позволяет баланс электрического дипольного и магнитного моментов отдельного элемента метаматериала. Под действием падающей плоской электромагнитной волны индуцируются дипольные моменты, которые можно выразить через компоненты тензоров электрических, магнитных, электромагнитных и магнетоэлектрических поляризуемостей. Равные по абсолютной величине амплитуды этих поляризуемостей означают сбалансированный отклик от микрорезонатора. Для достижения такого отклика от спирального микрорезонатора мы проводили численное моделирование двухвитковой планарной спирали, в котором все структурные параметры планарной спирали оптимизированы (т. е. изменяются в зависимости от любого из геометрических размеров планарной спирали) для достижения сбалансированного электромагнитного отклика (равенство амплитуд поляризуемостей в резонансе). Данная методика описана в работах [11]–[12]. На рисунке 4 показаны зависимости осевых компонент тензоров электрической ( $\alpha_{ee}^{yy}$ ), магнитной ( $\alpha_{mm}^{yy}$ ), электромагнитной ( $\alpha_{em}^{yy}$ ) и магнетоэлектрической ( $\alpha_{me}^{yy}$ ) поляризуемостей, нормированных на импеданс свободного пространства ( $\eta_0$ ) в частотном диапазоне 2–3 ГГц. Мы используем термин «осевые компоненты», поскольку координатная ось OY направлена вдоль оси планарной спирали (рисунки 2–3).

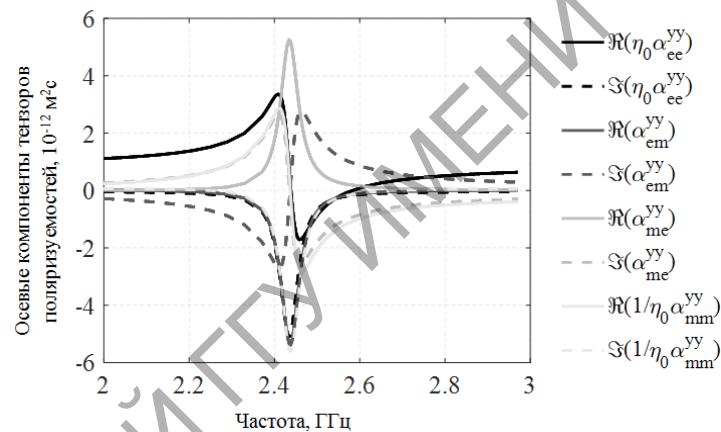


Рисунок 4 – Графики частотной зависимости действительных и мнимых частей осевых компонент тензоров поляризуемостей

Из графика следует, что все осевые компоненты тензоров поляризуемостей приблизительно равны друг другу по абсолютной величине на резонансной частоте 2,43 ГГц, что свидетельствует об оптимальной форме отдельной планарной спирали, на которой происходит рассеяние волн. Следовательно, изменяя параметры структурного элемента метаматериала (элементарной ячейки), можно добиться для ячейки в целом равенства как действительных, так и мнимых частей компонент электрического и магнитного дипольного моментов на резонансной частоте, то есть баланса такой ячейки. Достигнув оптимальности параметров отдельной планарной спирали и затем элементарной ячейки, следует перейти к моделированию параметров метаматериала, состоящего из таких элементов, и исследовать поглощающие свойства такой структуры в целом.

**Моделирование параметров метаматериала.** Поглощающие метаповерхности, состоящие из двухвитковых планарных спиралей, демонстрируют более широкополосное согласование импеданса, приводящее к нулевому отражению и более сильному резонансному поведению по сравнению с одновитковыми спиральными резонаторами. Более того, симметричное распределение плотности тока в двухвитковых спиралях может приводить к более устойчивому поглощению в зависимости от угла падения в резонансе. На рисунке 5 показана конструкция элементарной ячейки поглотителя, прозрачного вне резонанса, на основе спиралей для микроволнового диапазона частот. Элементарная ячейка метаповерхности состоит из левосторонних и правосторонних двухвитковых проводящих планарных спиралей на ди-

электрической подложке. Элементарная ячейка образована четвёрками планарных спиралей, при этом, если в некоторой четвёрке все спирали имеют правостороннее закручивание, то в соседней четвёрке – левостороннее закручивание. Структурные параметры спиралей адаптированы к балансу их индивидуальных поляризуемостей.

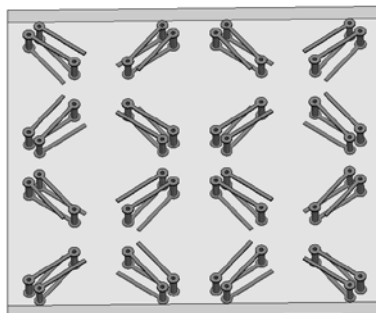


Рисунок 5 – Элементарная ячейка метаматериала, состоящего из сбалансированных двухвитковых планарных спиралей на диэлектрической подложке

Симметрично изменяя расстояние между сбалансированными планарными спиральями и внося корректировки в параметры самих планарных спиралей, с учетом их взаимного влияния, можно получить параметры метаматериала, обладающего резонансным поглощением на заданной частоте. Результаты такого моделирования с использованием стеклотекстолита FR4 (относительная диэлектрическая проницаемость равна 4,5 и тангенс угла диэлектрических потерь равен 0,021) показаны в работе [10].

В данной работе нами проведено моделирование аналогичного метаматериала на основе стеклотекстолита Rogers 5880 (относительная диэлектрическая проницаемость равна 2,2 и тангенс угла диэлектрических потерь равен 0,0015), который обладает значительно меньшими электропотерями по сравнению с FR4. Подложка на основе Rogers 5880 в значительно меньшей степени нарушает баланс диэлектрических и магнитных свойств метаматериала в целом, достигнутый для планарных спиралей в вакууме.

На рисунке 6 показаны графики частотной зависимости коэффициентов отражения, поглощения и прохождения при взаимодействии нормально падающей электромагнитной волны СВЧ диапазона со спроектированным метаматериалом на основе стеклотекстолита Rogers 5880.

Из графиков на рисунке 6 видно, что согласно проведённому моделированию, спроектированный метаматериал обладает сильным поглощением порядка 93,5 % от интенсивности падающей волны на резонансной частоте 2,4 ГГц и одновременно слабым отражением (менее 9,5 %) во всем исследуемом диапазоне частот, а на частоте 2,4 ГГц отражение составляет всего лишь 3,4 %. Данные результаты значительно лучше, чем при моделировании метаматериала на основе стеклотекстолита FR4 [10].

Следовательно, метаматериал на основе сбалансированных планарных спиралей на основе стеклотекстолита Rogers 5880 демонстрирует очень высокое поглощение в узком диапазоне частот и при этом является прозрачным во всем исследуемом диапазоне, и может быть использован в качестве фильтра отдельных частот (в частности  $2,4 \pm 0,05$  ГГц).

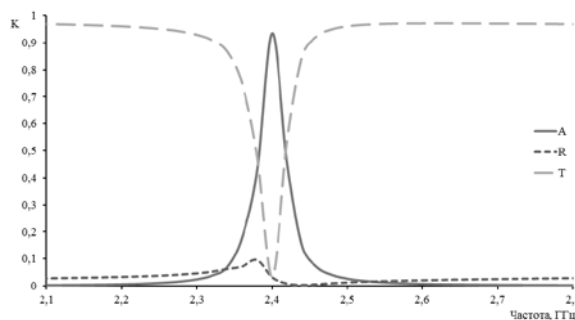


Рисунок 6 – Графики частотной зависимости коэффициентов отражения (R), поглощения (A) и прохождения (T) для метаматериала на основе стеклотекстолита Rogers 5880

**Изготовление и экспериментальное исследование.** Для подтверждения теоретических расчетов и моделирования был изготовлен экспериментальный образец метаматериала – прототип поглотителя и фильтра. Так как стоимость стеклотекстолита Rogers 5880 в Республике Беларусь в настоящее время достаточно высока, в качестве подложки экспериментального образца метаматериала был выбран двусторонний стеклотекстолит FR4 с толщиной ядра  $h = 2,93$  мм и медной фольгой с толщиной  $t = 35$  мкм. Параметры такого метаматериала были получены в результате моделирования в работе [10] и приведены в таблице 1.

Таблица 1 – Значения оптимальных параметров метаматериала для поглощения поляризованного излучения в СВЧ диапазоне

Параметр	$\alpha$ , град	$l$ , мм	$d$ , мм	$w$ , мм
Значение	15	6,2	0,3	0,15

В соответствии с параметрами метаматериала, полученного в результате моделирования, в программе P-CAD подготовлен проект печатной платы образца метаматериала в формате PCB в соответствии с требованиями компании-изготовителя ООО «ЭлектроКонтинент».

Процесс изготовления образца метаматериала основан на использовании планарных технологий. Фотографии изготовленного поглощающего в СВЧ диапазоне метаматериала и отдельной ячейки приведены на рисунке 7.

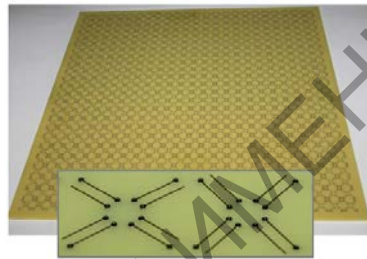


Рисунок 7 – Фотография изготовленного метаматериала для фильтрации поляризованного излучения в СВЧ диапазоне

Экспериментальные исследования с образцом метаматериала проведены в модернизированной безэховой камере ГГУ имени Ф. Скорины, оборудованной пирамидальным поглотителем ТОРА (см. рисунок 8). Исследование проводилось в диапазоне частот 2,1–2,8 ГГц с использованием векторного анализатора АКИП-6602. Схема проведения эксперимента в безэховой камере (7) показана на рисунке 9. Экспериментальная установка состоит из двух широкополосных рупорных антенн линейной поляризации (1 и 2). Экспериментальный образец (3) был установлен в окошко в экране (4), покрытое пирамидальными поглотителями (8). Антенны подключены к портам векторного анализатора (5) коаксиальным кабелем в 50 Ом. Проведены измерения параметров  $S_{11}$ ,  $S_{21}$ ,  $S_{12}$ ,  $S_{22}$  с образцом, без образца (измерение фона) и с металлическим листом (для нормировки отраженного сигнала). Результаты измерений обработаны на компьютере (6).

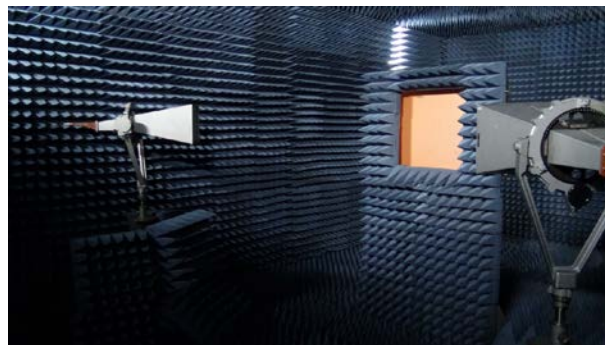


Рисунок 8 – Безэховая камера ГГУ имени Ф. Скорины

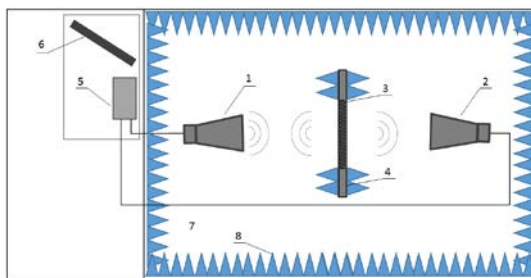


Рисунок 9 – Схема проведения эксперимента

Результаты измерений приведены в виде графиков частотной зависимости коэффициентов отражения (R), прохождения (T) и поглощения (A) на рисунках 10–11.

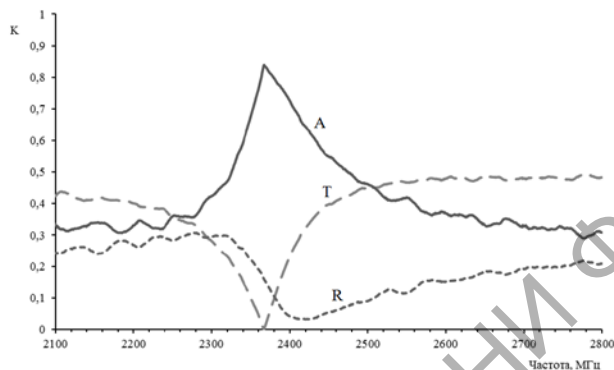


Рисунок 10 – Графики частотной зависимости амплитудных значений коэффициентов отражения (R), прохождения (T) и поглощения (A)

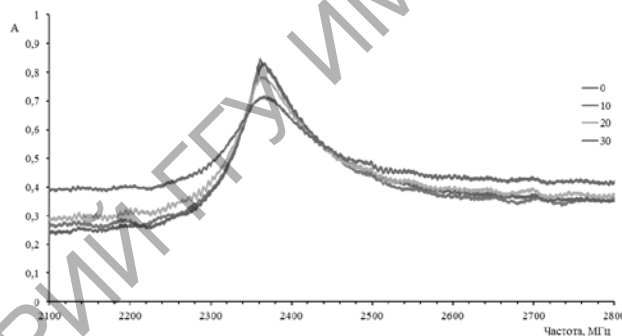


Рисунок 11 – Графики частотной зависимости амплитудного значения коэффициента поглощения (A) от угла падения поляризованной электромагнитной волны на метаматериал относительно нормали

Из графиков на рисунках 10 и 11 видно, что изготовленный экспериментальный образец проявляет высокие поглощающие свойства не только на резонансной частоте, но и в широком диапазоне вблизи резонанса. Так, на графике частотной зависимости коэффициента поглощения по амплитуде (рисунок 10) максимальное значение коэффициента поглощения равняется 0,82, при этом в широкой области вблизи резонансной частоты коэффициент поглощения составляет около 30%. Одновременно исследованный образец демонстрирует коэффициент отражения, не превышающий 30% во всем исследуемом частотном диапазоне, что соответствует результатам моделирования, проведенным в работе [10] для стеклотекстолита FR4. При этом наблюдается смещение резонансной частоты, что можно объяснить технологическими погрешностью при изготовлении образца и различием диэлектрических свойств реального материала FR4 и моделируемого.

Также проведено исследование угловой зависимости поглощающих свойств изготовленного метаматериала (рисунок 11). При изменении угла падения поляризованной электромагнитной волны на метаматериал относительно нормали от  $0^\circ$  до  $20^\circ$  коэффициент поглощения существенно не изменяется. При угле падения  $30^\circ$  коэффициент поглощения на резонансной частоте уменьшается до 0,7, но это может быть связано с частичным поглощением сигнала окружающими образец пирамидальными поглотителями.

Таки образом, была экспериментально продемонстрирована хорошая угловая устойчивость поглощающих свойств изготовленного метаматериала.

**Заключение.** Применив методику для определения сбалансированных параметров, как отдельного элемента, так и всего массива микрорезонаторов, получили численные характеристики двухвитковой планарной спирали для реализации поглощения поляризованного излучения в СВЧ диапазоне. В качестве подложки метаматериала рассмотрены двусторонний стеклотекстолит FR4 и Rogers 5880, используемые для производства печатных плат.

В результате моделирования стеклотекстолит Rogers 5880 показал более хороший результат по сравнению с FR4 в качестве устройства для фильтрации отдельных частот с низким отражением, но в то же время стоимость Rogers 5880 в настоящее время в Республике Беларусь достаточно высока, что ограничивает широкое использование данного материала.

В соответствии с параметрами метаматериала, полученными в результате моделирования (двусторонний стеклотекстолит FR4 с толщиной медной фольги 35 мкм и толщиной ядра 2,93 мм), изготовлен экспериментальный образец метаматериала – прототип поглотителя и фильтра.

Экспериментальные исследования с образцом метаматериала, состоящего из массива двухвитковых планарных спиралей на диэлектрической подложке, проведены в безэховой камере. Результаты измерений обработаны и приведены в виде графиков частотной зависимости коэффициентов отражения, поглощения и прохождения СВЧ волны.

Полученные результаты будут использованы при разработке новых типов частотно-селективных поглотителей, частотных фильтров СВЧ излучения на основе метаматериалов.

*Работа выполнена в рамках ГПНИ «Фотоника и электроника для инноваций», подпрограмма «Опто- и СВЧ-электроника».*

### Литература

1. Wire metamaterials: physics and applications / C. R. Simovski, P. A. Belov, A. V. Atrashchenko, Y. S. Kivshar // *Advanced Materials*. – 2012. – V. 24, № 31. – P. 4229–4248.
2. The coefficient of reflection of a plane electromagnetic wave from a plane wire mesh / M. Kontorovich, V. Y. Petrunin, N. Yesepkina, M. Astrakhan // *Radio Engineering and Electronic Physics*. – 1962. – V. 7, № 2. – P. 222–231.
3. Broadband focusing flat mirrors based on plasmonic gradient metasurfaces / A. Pors, M. G. Nielsen, R. L. Eriksen, S. I. Bozhevolnyi // *Nano Letters*. – 2013. – V. 13, № 2. – P. 829–834.
4. Metasurfaces : From microwaves to visible / S. B. Glybovski [et al.] // *Physics Reports*. – 2016. – V. 634. – P. 1–72.
5. An overview of the theory and applications of metasurfaces : The two-dimensional equivalents of metamaterials / C. L. Holloway [et al.] // *IEEE Antennas and Propagation Magazine*. – 2012. – V. 54, № 2. – P. 10–35.
6. Yu, N. Flat optics with designer metasurfaces / N. Yu, F. Capasso // *Nature Materials*. – 2014. – V. 13, № 2. – P. 139–150.
7. Radi, Y. Thin perfect absorbers for electromagnetic waves: theory, design, and realizations / Y. Radi, C. Simovski, S. Tretyakov // *Physical Review Applied*. – 2015. – V. 3, № 3. – P. 037001.
8. Семченко, И. В. Преобразование поляризации электромагнитных волн спиральными излучателями / И. В. Семченко, С. А. Хахомов, А. Л. Самофалов // *Радиотехника и электроника*. – 2007. – Т. 52, № 8. – С. 917–922.
9. Asadchy, V. S. Simulation of the electromagnetic properties of one-turn and double-turn helices with optimal shape, which provides radiation of a circularly polarized wave / V. S. Asadchy, I. A. Faniayev // *J. Adv. Res. Phys.* – 2011. – V. 2, № 1. – P. 011107.
10. Проектирование метаматериалов на основе планарных спиралей в СВЧ диапазоне / И. В. Семченко [и др.] // *Известия Гомельского гос. ун-та им. Ф. Скорины*. – 2020. – № 3 (120). – С. 154–160.
11. Ishimaru, A. Generalized constitutive relations for meta materials based on the quasi-static Lorentz theory / A. Ishimaru, L. Seung-Woo, Y. Kuga, V. Jandhyala // *IEEE Trans. Antennas Propag.* – 2003. – V. 51 – P. 2550–2557.
12. Asadchy, V. S. Determining polarizability tensors for an arbitrary small electromagnetic scatterer / V. S. Asadchy [et al.] // *Photonics and Nanostructures – Fundamentals and Applications*. – 2014. – V. 12, № 4. – P. 298–304.