

Оригинальная статья

<https://doi.org/10.26565/2311-0872-2019-30-07>

УДК 537.874

## ОПТИМИЗАЦИЯ СПОСОБА ВОЗБУЖДЕНИЯ ИНВЕРТИРОВАННОГО ПОЛОСКОВОГО ДИЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ВОЛНОВОДА С МЕТАЛЛИЧЕСКОЙ ПЛОСКОСТЬЮ

Д.В.Майборода, С.А.Погарский

Харьковский национальный университет имени В.Н. Каразина, 61022, г. Харьков, пл. Свободы, 4  
E-mail: spogarsky@gmail.com

Поступила в редакцию 15 февраля 2019 г.

**Актуальность.** В настоящее время в миллиметровом диапазоне длин волн весьма перспективно применение диэлектрических волноводов различных типов, в том числе металло-диэлектрических структур и функциональных узлов на их основе. Это обусловлено простотой и незначительной стоимостью изготовления диэлектрических волноводов и функциональных узлов на их основе, возможностью их интеграции с активными элементами, применением различных диэлектриков и полимеров, обладающих как широким диапазоном диэлектрических проницаемостей, так и разнообразием механических свойств (в частности, некоторые диэлектрические материалы обладают значительной гибкостью).

**Цель работы.** Оптимизировать способ возбуждения одной из собственных волн в обращенном полосковом диэлектрическом волноводе с металлической плоскостью посредством серии физических экспериментов.

**Материалы и методы.** Исследуемая электродинамическая структура относится к классу гибридных металло-диэлектрических структур. Ее основу составляет обращенный полосковый диэлектрический волновод с металлической плоскостью. Особенностью использованного обращенного полоскового диэлектрического волновода является его композиционный состав: основная часть волноведущего стержня, прилегающего к металлической плоскости, выполнена из полистирола, вторая часть выполнена из фторопласта. Оценка эффективности возбуждения проводилась по величине вносимого затухания в тракт. Методом подвижного зонда оценена степень концентрации электромагнитного поля вблизи сложнокомпозиционного волноведущего стержня. Визуализация полей осуществлялась с помощью метода изолиний.

**Результаты.** На основании серии экспериментальных исследований оптимизирован способ возбуждения инвертированного полоскового диэлектрического волновода с металлической плоскостью. Эффект оптимального возбуждения достигался за счет использования композиционной конструкции диэлектрического волноведущего стержня. При оптимальном соотношении материальных констант слоев, образующих волноведущий стержень, и геометрических параметров этих слоев удалось существенно расширить рабочую полосу частот, в пределах которой уровень вносимых потерь не превышал заданных значений. При этом установлено, что электромагнитное поле концентрируется преимущественно вблизи диэлектрического стержня, обеспечивая устойчивый волновой режим. Установлено, что при определенном соотношении параметров структуры в ней может реализовываться режим частотной селекции.

**Выводы.** В ходе измерений установлено, что обращенный полосковый диэлектрический волновод с металлической плоскостью при оптимальном выборе параметров способен эффективно поддерживать волновой режим с малым уровнем вносимых потерь. В целом структура при определенном выборе параметров может работать в двух режимах: волноведущем и режиме частотной селекции.

**КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА:** инвертированный полосковый диэлектрический волновод, затухание, метод подвижного зонда, частотная селекция

## ОПТИМІЗАЦІЯ СПОСОБУ ЗБУДЖЕННЯ ІНВЕРТОВАНОГО СМУЖКОВОГО ХВИЛЕВОДУ З МЕТАЛЕВОЮ ПЛОЩИНЮ

Д.В. Майборода, С.О. Погарський

Харківський національний університет імені В.Н. Каразіна, 61022, м. Харків, пл. Свободи, 4

**Актуальність.** На теперішній час у міліметровому діапазоні довжин хвиль перспективним є застосування діелектричних хвилеводів різних типів, у тому числі металево-діелектричних структур і функціональних вузлів на їхній основі. Це обумовлено простотою та незначною вартістю виготовлення діелектричних хвилеводів і функціональних вузлів на їхній основі, можливістю їх інтеграції з активними елементами, застосуванням різних діелектриків та полімерів, що мають як широкий діапазон діелектричних проникностей, так і різноманітність механічних властивостей (зокрема, деякі діелектричні матеріали мають значну гнучкість).

**Мета роботи.** Оптимізувати спосіб збудження однієї із власних хвиль у інвертованому смужковому діелектричному хвилеводі з металевою площиною за допомогою серії фізичних експериментів.

**Матеріали та методи.** Досліджувана електродинамічна структура відноситься до класу гібридних металеводіелектричних структур. Її основу становить обернений смужковий діелектричний хвилевід з металевою площиною. Особливістю використаного оберненого смужкового діелектричного хвилеводу є його композиційна структура: основна частина хвилеведучого стрижня, що прилягає до металевої площини виконана з полістиролу, друга частина виконана із фторопласту. Оцінка ефективності збудження проводилася по величині внесеного загасання в тракт. Методом рухливого зонда був оцінений ступінь концентрації електромагнітного поля поблизу складнокомпозиційного хвилеведучого стрижня. Візуалізація полів здійснювалася за допомогою методу ізоліній.

**Результати.** На підставі серії експериментальних досліджень оптимізований спосіб збудження інвертованого смужкового діелектричного хвилеводу з металевою площиною. Ефект оптимального збудження досягався за рахунок використання композиційної конструкції діелектричного хвилеведучого стрижня. При оптимальному співвідношенні матеріальних констант шарів, що утворюють хвилеведучий стрижень, і геометричних параметрів цих шарів вдалося суттєво розширити робочу смугу частот, у межах якої рівень внесених втрат не перевищував заданих значень. При цьому встановлено, що електромагнітне поле концентрується переважно поблизу діелектричного стрижня, забезпечуючи стійкий хвильовий режим. Установлено, що при певному співвідношенні параметрів структури в ній може реалізовуватися режим частотної селекції.

**Висновки.** У ході вимірювань встановлено, що інвертований смужковий діелектричний хвилевід з металевою площиною при оптимальному виборі параметрів здатний ефективно підтримувати хвильовий режим з малим рівнем внесених втрат. У цілому структура при певному виборі параметрів може працювати у двох режимах: хвилеведучому і режимі частотної селекції.

**КЛЮЧОВІ СЛОВА:** інвертований смужковий діелектричний хвилевід, загасання, метод рухливого зонда, частотна селекція

## OPTIMIZATION OF THE METHOD FOR EXCITING AN INVERTED STRIP DIELECTRIC WAVEGUIDE WITH METAL PLANE

D.V. Mayboroda, S.A. Pogarsky

V.N. Karazin Kharkiv National University, 4, Svobody Square, Kharkiv, 61022, Ukraine

**Background.** Currently, the application of various types of dielectric waveguides in the millimeter wavelength range is very promising, including metal-dielectric structures and functional units based on them. This is due to the simplicity and low cost of manufacturing dielectric waveguides and functional units based on them, the possibility of their integration with active elements, the use of various dielectrics and polymers having both a wide range of dielectric constants and a variety of mechanical properties (in particular, some dielectric materials have significant flexibility).

**Objectives.** To optimize the method of excitation of one of its eigenwaves in a inverted strip dielectric waveguide with a metal plane through a series of physical experiments.

**Materials and methods.** The studied electrodynamic structure belongs to the class of hybrid metal-dielectric structures. Its basis is a inverted strip dielectric waveguide with a metal plane. A feature of the used inverted strip dielectric waveguide is its composition: the main part of the waveguide rod adjacent to the metal plane is made of polystyrene, the second part is made of fluoroplastic. The evaluation of the excitation efficiency was carried out by the magnitude of the introduced attenuation into the tract. Using the method of a moving probe, the degree of concentration of the electromagnetic field near a complex compositional waveguiding rod was estimated. The fields were visualized using the contour method.

**Results.** Based on a series of experimental studies, the method for exciting an inverted strip dielectric waveguide with a metal plane is optimized. The effect of optimal excitation was achieved through the use of the composite design of the dielectric waveguiding rod. With the optimal ratio of the material constants of the layers forming the waveguiding rod and the geometric parameters of these layers, it was possible to significantly expand the working frequency band, within which the level of insertion loss did not exceed the specified values. It was found that the electromagnetic field is concentrated mainly near the dielectric rod, providing a stable wave mode. It has been established that with a certain ratio of structure parameters, the frequency selection mode can be implemented in it.

**Conclusions.** In the course of physical measurements, it was found that a inverted strip dielectric waveguide with a metal plane with the optimal choice of parameters is able to effectively maintain the wave mode with a low level of insertion loss. In general, a structure with a certain choice of parameters can operate in two regimes: waveguiding mode and frequency selection mode.

**KEY WORDS:** inverted dielectric waveguide, attenuation, VSWR, moving probe method, radiation pattern.

## ВВЕДЕНИЕ

Диэлектрические волноводы (ДВ) различных модификаций [1-5] имеют явные преимущества в КВЧ диапазоне по сравнению со стандартными прямоугольными волноводами благодаря своим свойствам: простоте реализации с реальными допусками на изготовление, возможностью реализации формообразования сложноконструктивных узлов с помощью достаточно простых методов при серийном производстве и др.

При всем многообразии существующих конструктивных исполнений узлов на ДВ актуальным остается вопрос поиска новых модификаций ДВ, позволяющих решать специфические задачи создания функциональных элементов с улучшенными характеристиками [6, 7]. С этой точки зрения реальны конструкции линий передачи, которые по своим свойствам принципиально отличаются по вносимым потерям от известных и соответственно имеют выигрыш по параметрам при их применении в конкретных КВЧ приборах. В работе [8] рассмотрены связанные инвертированные диэлектрические волноводы с металлической плоскостью [ИДВМП], используемые в таких устройствах как фильтры, ответвители, передающие системы, параметры которых при использовании ИДВМП расширяют возможности их применения. Вместе с тем, любая модификация базовой линии передачи требует проведения ряда фундаментальных исследований, включающих в себя изучение возбуждаемого спектра собственных волн и соответствующих им структур полей, способов их возбуждения и ряд других.

В данном исследовании особый акцент сделан на вопросах возбуждения инвертированного полоскового волновода с металлической плоскостью, согласования с подводящими трактами.

### БАЗОВАЯ СТРУКТУРА

В известных в настоящее время работах отсутствуют данные об использовании сложнокомпозиционных полосковых диэлектрических волноводов как составной части инвертированных полосковых диэлектрических волноводов (ИПДВ) в 8-мм диапазоне длин волн. Такого рода информация особенно актуальна при решении вопроса об эффективном возбуждении структуры с обеспечением минимума потерь. Кроме того, при использовании достаточно хорошо известного способа возбуждения путем введения в пространство металлических волноводов части сплошного диэлектрического стержня [9-11] не могут быть обеспечены стабильные результаты вследствие достаточно большой длины самого стержня (по отношению к длине волны) и трудностей обеспечения плотного контакта с остальными элементами тракта.

На Рис. 1 представлено схематическое изображение сложнокомпозиционной структуры. На рисунке использованы следующие обозначения: **1** – металлические волноводы, **2** – металлическое основание, **3** – полосковый диэлектрический волновод (диэлектрический стержень) с одним значением относительной диэлектрической проницаемости, **4** – полосковый диэлектрический волновод (диэлектрический стержень) с другим значением относительной диэлектрической проницаемости, **5** – диэлектрическая пластина (подложка). **6** – элементы диэлектрического стержня со скосами.

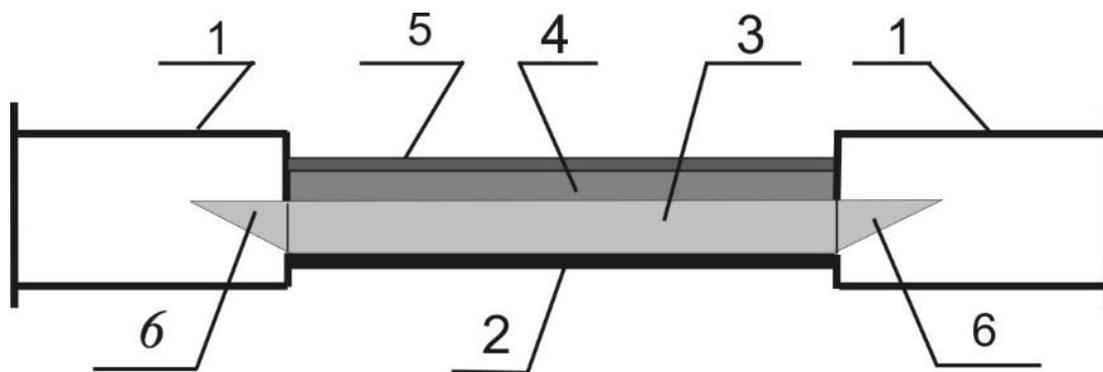


Рис. 1. Схематическое изображение структуры.

Существенной особенностью структуры по сравнению с известными ранее [11] является композиционный состав волноведущего диэлектрического стержня: основная волноведущая часть выполнена из одного вида диэлектрика (**3**), а вторая (**4**) – выполнена из другого вида диэлектрика. Такого рода композиционное выполнение волноведущей части ИПДВ позволяет решить одновременно две задачи. Первая – это управление перераспределением величин мощностей электромагнитного поля, сосредоточенных в различных областях сложнокомпозиционного стержня, а вторая – чисто конструктивная: выполняя часть стержня, прилегающего к металлическому основанию, из материала, обладающего большей жесткостью, удастся реализовать плотный контакт стержня и металлического основания. Форма оконечной части стержня, вводимого в пространство волноводов, достаточно хорошо исследована ранее [12]. Особенность реализации формы оконечных частей стержня заключается в том, что скосы выполнены под углом Брюстера в двух плоскостях.

## РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ

Основной целью исследования являлась минимизация потерь при возбуждении собственных волн в структуре. При этом экспериментально исследовались вопросы влияния на уровень вносимых потерь значения относительной диэлектрической проницаемости и геометрии стержня, диэлектрической проницаемости и толщины дополнительной диэлектрической подложки. Исследования проводились в диапазоне частот 25...37 ГГц.

На первоначальном этапе исследовались варианты с однородным исполнением диэлектрических стержней. В первом случае стержень выполнялся из фторопласта ( $\epsilon_r = 2,1$ ), а во втором случае из полистирола ( $\epsilon_r = 2,52$ ). В качестве дополнительной диэлектрической подложки использовались ситалловые подложки ( $\epsilon_r = 9,8$ ) со стандартными размерами 60x48 мм и толщинами 0,5 мм и 1 мм.

В качестве базовых параметров были приняты результаты измерений с фторопластовыми стержнями различных размеров и подложкой толщиной 1 мм. При этом вся конструкция с двумя переходами на прямоугольные волноводы обеспечивала суммарные потери на уровне -2,5...-3 дБ при величине  $KCBH \leq 1.9$ .

Серией экспериментов установлен оптимальный размер стержня, равный 7.0x2.0 мм. Уменьшение ширины стержня до 5.2 мм приводит к росту потерь до уровня -4 дБ, дальнейшее уменьшение ширины до величины 4.2 мм приводит к росту потерь до -6 дБ. При этом необходимо отметить сильную изрезанность характеристики: уровень потерь в частотном диапазоне колеблется в интервале  $\pm 2.5$  дБ.

На Рис. 2 и Рис. 3 приведены зависимости затухания от частоты для двух вариантов структур, у которых прилегающая к металлическому основанию часть стержня (3) толщиной 2 мм выполнена из полистирола, а вторая часть толщиной 1 мм – из фторопласта. Первый вариант соответствует толщине дополнительной диэлектрической подложки 1 мм, а второй – толщине 1.5 мм.

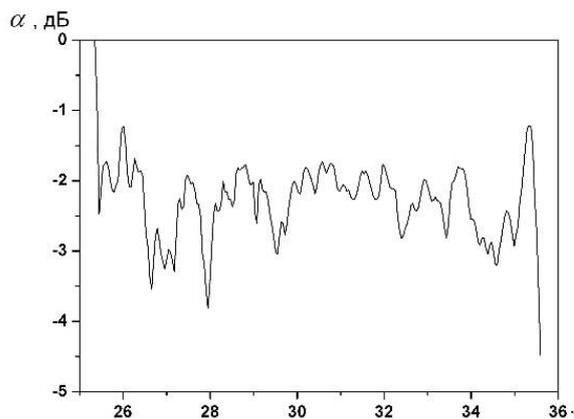


Рис. 2. Зависимость затухания от частоты структуры с диэлектрическим стержнем из полистирола 2,0 мм и фторопласта 1 мм при толщине подложки 1,0 мм.

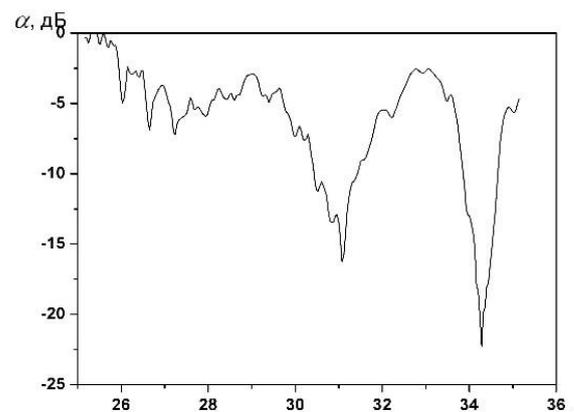


Рис. 3. Зависимость затухания от частоты структуры с диэлектрическим стержнем из полистирола 2,0 мм и фторопласта 1 мм при толщине подложки 1,5 мм.

Очевидно, что средний уровень затухания в достаточно широкой полосе частот не превышает уровень -2 дБ. Можно констатировать, что использование комбинированного диэлектрического стержня с разной диэлектрической проницаемостью позволяет снизить уровень затухания. Размещение материала, обладающего большей жесткостью, со стороны металлической плоскости позволяет существенно повысить уровень воспроизводимости характеристик за счет более равномерного прилегания стержня к металлической плоскости.

Рис. 3 свидетельствует о том, что использование комбинированного стержня и увеличение толщины дополнительной диэлектрической подложки приводит к появлению нескольких резонансных провалов в АХЧ. Так, при толщине 1,5 мм максимальная величина «провала» в характеристике достигает уровня -22 дБ, при этом ширина полосы заграждения невелика (по уровню -20 дБ составляет приблизительно 1%).

Серия экспериментов выявила физический эффект возникновения более глубоких резонансов в сложнопозиционной диэлектрической структуре в более широкой полосе частот. На Рис. 4 представлена АХЧ сложнопозиционной структуры при ее возбуждении оконечной частью диэлектрического стержня полупирамидальной формы длиной 6 мм (что соизмеримо с длиной волны в диэлектрическом стержне). При этом та часть скоса, которая вводилась в металлические волноводы,

выполнялась из сложнокomпозиционного диэлектрика (с теми же параметрами, что и основной волноведущий стержень).

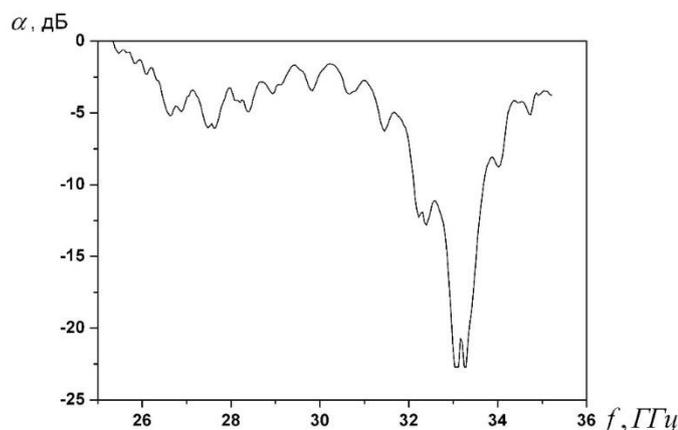


Рис. 4. Зависимость затухания от частоты структуры с диэлектрическим стержнем из полистирола 2,0 мм и фторопласта 1 мм при толщине подложки 1,5 мм со сложнокomпозиционным возбуждающим скосом

Как следует из анализа характеристики на Рис.4, ширина полосы заграждения не только расширилась до 6.2% от центральной частоты, но и сместилась в низкочастотную область более, чем на 700 мГц. В полосе заграждения наблюдается небольшой выброс до -21.7 дБ. Как показали эксперименты, увеличение толщины дополнительной диэлектрической подложки приводит к возникновению полос заграждения в более низкочастотной области. Такой эффект объясняется перераспределением энергии электромагнитных волн между составными элементами структуры.

Еще одним подтверждением того, что исследуемая структура способна поддерживать устойчивый режим распространения собственной волны является структура модуля напряженности электрического поля, измеренного в ближней зоне методом подвижного зонда. Эта характеристика представлена на Рис. 5.

Анализ полученных данных свидетельствует о том, что в такого рода структуре при оптимальном выборе ключевых параметров структуры как таковой и элементов возбуждения возможна реализация устойчивого волнового режима с концентрацией поля вблизи стержня ИПДВ, при этом поле вне стержня оказывается достаточно симметричным относительно оси стержня и при удалении от оси стержня амплитуда поля существенно снижается.

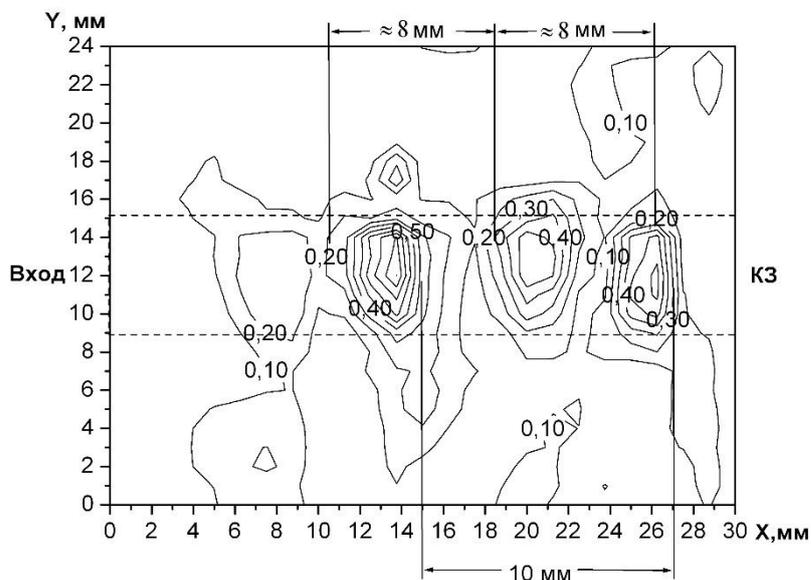


Рис. 5. Структура электрического поля в случае сложнокomпозиционного состава диэлектрического стержня.

## ВЫВОДЫ

Таким образом, в результате проведенных экспериментальных исследований свойств ИПДВ при возможной вариации основных параметров структуры установлено, что наличие известных диэлектрических материалов позволяет создавать волноведущие структуры, обладающие малыми отражениями и вносимыми потерями.

Реализация оптимальных способов возбуждения при оптимальном выборе материальных констант основных элементов тракта позволяет осуществлять не только устойчивый режим канализации энергии электромагнитных волн в КВЧ диапазоне, но и прогнозировать возможность создания частотно-селективных устройств этого диапазона, в том числе и частотно-селективных поверхностей.

Данная работа выполнена в рамках научно-исследовательской работы, которая финансируется за счет средств государственного бюджета Министерством образования и науки Украины (номер бюджетной темы 0119U002535).

## КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ

Авторы сообщают об отсутствии конфликта интересов.

## Authors' ORCID ID

**S.A. Pogarsky**  <http://orcid.org/0000-0003-0833-1421>

**D.V. Mayboroda**  <http://orcid.org/0000-0002-9564-2369>

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Knox R.M. Dielectric waveguide integrated circuit an overview / R.M. Knox // IEEE Trans. Microwave Theory and Techn. – 1976. – Vol. 24, No 6. – P. 806-814.
2. Solbach K.E. Band leaky wave antenna using dielectric image line with etched radiating elements / K.E. Solbach // IEEE – MTT–S International Microwave Conference Digest. – 1986. – P. 214-216.
3. Вершинина Л.Н. Диэлектрический полосковый волновод для коротковолновой части миллиметрового диапазона волн / Л.Н.Вершинина, В.В.Мериякри // Радиотехника и электроника. – 1980. – Т. 25, № 7. – С. 1348-1351.
4. McLevige W. New waveguide structures for millimeter wave and optical integrated circuits / W.McLevige, T.Itoh, R.Mittra // IEEE Trans. Microwave Theory and Techn. – 1975. – Vol. 23, No 10. – P. 788-794.
5. Solbach K. The Fabrication of Dielectric Image Lines Using Casting Resins and Properties of the Lines in the Millimeter wave Rang / K.Solbach // IEEE Trans. on MTT. – 1976. – Vol. 24, No 11. – P. 879-881.
6. Crampagne R. Leaky wave antenna using an inverted strip dielectric waveguide / R. Crampagne, L. Padellec, A. Sarremejean // 10th European Microwave Conference. – 1980. – P. 474-479.
7. Rawat B. Computer aided design of inverted strip dielectric waveguide millimeter wave ring-resonator and coupler / S. Rawat, M. Dalmia // Int. Journal of Infrared and Millimeter Waves. – 1984. – Vol. 5, № 12. – P. 1527–1542.
8. Itoh T. Inverted strip dielectric waveguide for millimetre-wave integrated circuits / T. Itoh // IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques. – 1976. –Vol. MTT-24, № 11. – P. 821–827.
9. Mayboroda D. V. The Radiating Unit Based on Hybrid Metal-Dielectric Structure with Bounded Sequence of Transverse Slots / Mayboroda D. V., Pogarsky S. A., Saprykin I. I. // Int. J. of Electromagnetics and Applications. – 2012. – Vol. 2, № 6. – P. 159-162.
10. Mayboroda D. V. The radiator of  $K_u$  -band based on inverted dielectric waveguide / D. V. Mayboroda, S. A. Pogarsky, I. I. Saprykin, S. V. Pshenichnaya // International Conference on Ultrawideband and Ultrashort Impulse Signals. – 2010. – P. 215–217.
11. Mayboroda D. V. A Leaky-wave antenna on the basis of an inverted dielectric waveguide / D. V. Mayboroda, S. A. Pogarsky // Telecommunications and Radio Engineering. – 2018. – Vol. 77, № 10. – P. 853-862.
12. Майборода Д.В. Излучающая структура на основе инвертированного диэлектрического волновода с дополнительными элементами /Майборода Д.В., Погарский С.А., Смирнова Е.О. // Вісник Харк. ун-ту ім. В.Н.Каразіна, Сер. Радиофізика та електроніка, 2018. – Вип. 29. – С. 57-63.