

УДК 621.372.825

Инженерный расчет и оптимизация параметров полужкранированного диэлектрического волновода в неизлучающем режиме

А.Ю. Гурьянов, В.В. Крутских

Гурьянов Андрей Юрьевич — аспирант кафедры основ радиотехники НИУ «МЭИ», e-mail: roar14@mail.ru
Крутских Владислав Викторович — кандидат технических наук, доцент кафедры основ радиотехники НИУ «МЭИ», e-mail: KrutskikhVV@mpei.ru

Приведено исследование параметров оптимальных по ширине частотного диапазона полужкранированных диэлектрических волноводов и как приложение к методике проектирования волноводных переходов. Полужкранированный диэлектрический волновод представляет собой прямоугольный диэлектрический стержень, помещенный между двух параллельных металлических пластин. Такой волновод является своего рода «гибридом» открытых и закрытых линий передачи. Он обладает одновременно свойствами обоих типов, выраженных более или менее сильно в зависимости от конструкции. При определенных условиях в нем проявляется так называемый эффект неизлучения, который заключается в удержании электромагнитной энергии внутри диэлектрического стержня при его изгибе или деформации (но при сохранении плоскостной симметрии).

Отношение расстояния между металлическими пластинами к ширине диэлектрического стержня называют форм-фактором стержня. Для неизлучающего режима существует некоторый оптимальный форм-фактор, при котором достигается максимальная ширина диапазона перекрытия по частоте. В работе приведена зависимость ширины частотного диапазона от форм-фактора волновода. Исследованы зависимости оптимального форм-фактора (по критерию наиболее широкого частотного диапазона) от параметров среды, предложены эмпирические формулы для их оценки, разработан метод инженерного расчета физических параметров неизлучающих диэлектрических волноводов, который является одним из этапов расчета волноводных переходов. Исследованы и предложены эмпирические формулы для оценки зависимости оптимального форм-фактора от параметров среды. Приведены зависимости оптимального форм-фактора и коэффициента перекрытия по частоте от отношения диэлектрической проницаемости стержня волновода к диэлектрической проницаемости внешней среды. Предложен метод инженерного расчета физических параметров полужкранированных диэлектрических волноводов в режиме неизлучения. Установлено, что перекрытие по частоте для полужкранированного диэлектрического волновода в режиме неизлучения лежит в диапазоне 24 ... 30 %. Показано, что наиболее эффективно использовать материалы с диэлектрической проницаемостью больше 5 для достижения максимальной ширины частотного диапазона. Предложена формула для аппроксимации зависимости оптимального форм-фактора от диэлектрической проницаемости в диапазоне 1,5 ... 30.

Ключевые слова: полужкранированный диэлектрический волновод, неизлучающий диэлектрический волновод, НДС, дисперсионная характеристика, инженерный расчет.

An Engineering Approach to Calculating and Optimizing the Parameters of a Non Radiating Half-Shielded Dielectric Waveguide

A.Yu. Guryanov, V.V. Krutskikh

Guryanov Andrey Yu. — Ph.D-student of Fundamentals of Radio Engineering Dept., MPEI, e-mail: roar14@mail.ru
Krutskikh Vladislav V. — Ph.D. (Techn.), Assistant Professor of Fundamentals of Radio Engineering Dept., MPEI, e-mail: KrutskikhVV@mpei.ru

The parameters of half-shielded dielectric waveguides optimized in terms of their frequency bandwidth are investigated as a supplement to the procedure for designing waveguide transitions. The half-shielded dielectric waveguide is a rectangular dielectric rod placed between two parallel metal plates. Such a waveguide is in its own way a "hybrid" of open and closed transmission lines. It simultaneously has the properties of both the types of transmission lines; these properties may exhibit themselves to a greater or lesser extent depending on the design. Under certain conditions, a so called non-radiating effect is observed in this waveguide, a phenomenon consisting in that the electromagnetic energy is held in the dielectric rod when it is bent or deformed (provided, however, that the plane symmetry is retained). The ratio of the distance between the metal plates to the dielectric rod width is called the rod form-factor. For a non-radiating mode, there exists a certain optimal form-factor, at which the maximum frequency bandwidth is reached. The frequency bandwidth as a function of the waveguide form-factor is presented. Dependences characterizing the optimum form factor (according to the largest frequency bandwidth criterion) versus the medium parameters are investigated, and empirical formulas for evaluating them are proposed. An engineering method is proposed for calculating the physical parameters of non-radiating dielectric waveguides, which is one of the stages in calculating waveguide transitions. Empirical formulas for estimating the dependence of optimal form-factor on the parameters of medium are investigated and proposed. Dependences of the optimal form-factor and the frequency bandwidth coefficient on the ratio of dielectric constants of the waveguide rod and external medium are presented. An engineering method for calculating the physical parameters of non-radiating half-shielded dielectric waveguides is suggested. It is found that the non-radiating dielectric waveguide's frequency ratio lies in the range from 24 to 30%. It is shown that materials with a dielectric constant higher than 5 are best suited for achieving the largest frequency bandwidth. A formula for approximating the dependence of the optimal form-factor on the rod dielectric constant in the range from 1.5 to 30 is proposed.

Key words: half-shielded dielectric waveguide, non-radiating dielectric waveguide, NRD waveguide, dispersion characteristics, engineering calculation.

Введение

Полуэкранированный диэлектрический волновод (ПЭДВ) (волновод Тишера, Н-образный металло-диэлектрический волновод) приведен на рис. 1.

Диэлектрический стержень 3 с параметрами ϵ_1 , μ_1 находится между параллельными металлическими пластинами 1 и 2, ширина диэлектрического стержня d , расстояние между металлическими пластинами g . Область 4 заполнена диэлектриком с параметрами ϵ_2 , μ_2 .

В работе Э.М. Гутцайта [1] рассмотрены моды в данном типе волновода и определены оптимальные режимы по мощности. В 1981 г. Т. Йонейма [2] обнаружил режим неизлучения. В 2005 г. предложен способ оценки ширины частотного диапазона в неизлучающем режиме [3].

Цель представленной работы — обобщить и упростить методику расчета параметров полуэкранированного диэлектрического волновода и довести ее до уровня практического использования.

Расчет дисперсионных характеристик и критических длин волн для полуэкранированного диэлектрического волновода

Полуэкранированный диэлектрический волновод (см. рис. 1) можно представить как некий диэлектрический волновод (ДВ) в анизотропной многомодовой дисперсионной среде. В такой системе одновременно существуют два класса явления отсечки: условной «диэлектрической» отсечки и «металлической» отсечки. В работе [4] рассмотрены эти явления и их влияние на формирование полей в ПЭДВ. Основываясь на приведенных данных, можно считать, что в случае малого значения форм-фактора $\Phi = d/g$ (отношения ширины диэлектрического стержня к его высоте) ПЭДВ

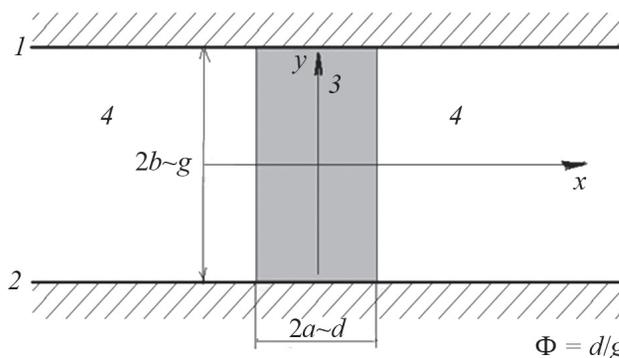


Рис. 1. Поперечное сечение ПЭДВ

может быть представлен как бесконечный планарный диэлектрический волновод. Этот факт будем считать предельным случаем ПЭДВ с диэлектрическим характером распространения волн. В случае большого форм-фактора можно считать, что имеется планарный металлический волновод, заполненный диэлектриком. Этот факт будем считать предельным случаем ПЭДВ с металлическим характером распространения волн.

Представляя ПЭДВ как бесконечный планарный ДВ, нужно учитывать еще и влияние металлических пластин. Представим волну планарного ДВ, распространяющуюся под углом φ к направлению распространения (ось OZ) и переотражающуюся от металлических пластин (как распространяется луч света под углом в системе между двух параллельных зеркал.) Тогда получим две проекции замедления на оси OZ и OY . Замедление вдоль оси OZ определяется как $U_z = U_{\text{пл}} \cos(\varphi)$, а замедление вдоль оси OY — как $U_y = U_{\text{пл}} \sin(\varphi)$, где $U_{\text{пл}}$ — замедление планарного ДВ. С другой стороны, $kU_y g = n\pi$, где k — постоянная распространения; n — число вариаций поля между металлическими пластинами, из чего можно получить связь угла направления распространения волны и замедле-

ния $\varphi = \arcsin(n/(2g'U_{\text{пл}}))$, где $g' = \frac{g\sqrt{\varepsilon_1\mu_1}}{\lambda\sqrt{\varepsilon_2\mu_2}}$ — относительное расстояние между пластинами [3].

Считая критический угол $\varphi = \pi/2$, получим соотношение $g'_{\text{кр}} = n/(2U_{\text{пл}})$.

Расчет замедления в планарном ДВ был описан в [5], где используются относительные величины для упрощения расчетов и простого переноса на другие частотные диапазоны. Поэтому далее будем использовать следующие обозначения: физические размеры диэлектрического стержня $d \times g$; относительная ширина

диэлектрического стержня $d' = \frac{d\sqrt{\varepsilon_1\mu_1}}{\lambda}$; относительная высота (расстояние между пластинами) $g' = \frac{g\sqrt{\varepsilon_1\mu_1}}{\lambda}$;

где λ — рабочая длина волны. Также при расчетах используются приведенная ширина диэлектрического стержня $\tilde{d} = d'\sqrt{\frac{\varepsilon_1\mu_1}{\varepsilon_2\mu_2} - 1}$ и численный размер диэлектрического волновода $R = \pi d'\sqrt{\frac{\varepsilon_1\mu_1}{\varepsilon_2\mu_2} - 1} = \pi\tilde{d}$.

Для оценки замедлений необходимо решить систему трансцендентных уравнений

$$\begin{cases} \alpha^2 + \beta^2 = R^2; \\ \alpha = \frac{1}{\chi}\beta \begin{pmatrix} \text{tg}(\beta) \\ -\text{ctg}(\beta) \end{pmatrix}, \end{cases}$$

где α и β — внутреннее и внешнее волновые числа планарного ДВ; $\chi = \varepsilon_1/\varepsilon_2$ — для волн электрического типа; $\chi = \mu_1/\mu_2$ — для волн магнитного типа; тангенс или котангенс используются для случаев четных или нечетных волн соответственно.

Замедление планарного ДВ определяется по формуле [5]

$$U_{\text{пл}} = \sqrt{\frac{\varepsilon_1\mu_1}{\varepsilon_2\mu_2} \frac{\alpha^2 + \beta^2}{\alpha^2 + \beta^2}},$$

а для оценки замедления в ПЭДВ можно использовать формулу

$$U = \sqrt{\varepsilon_1\mu_1 - \left(\frac{\beta}{\pi d'\sqrt{\varepsilon_2\mu_2}}\right)^2} - \left(\frac{n}{2d'}\right)^2,$$

приведенную в [3], где n — число вариаций поля между металлическими пластинами.

Исходя из указанных соотношений, можно построить диаграмму критических условий (КУ), которую впервые построил Э.М. Гутцайт в работе [1].

Оценка частотного диапазона ПЭДВ

Построим диаграмму, отражающую линии КУ с диэлектрическим и металлическим характером на плоскости возможных относительных размеров диэлектрического стержня ПЭДВ. На рис. 2 изображена диаграмма КУ для первых шести волн электрического типа, распространяющихся в полиэтиленовом стержне ($\varepsilon = 2,25$), внешняя среда — воздух ($\varepsilon = 1$).

Диапазон волновода определяется как разница между критической частотой рабочей моды в волноводе и критической частотой моды ближайшего высшего типа. В обычном случае линии критических условий гладкие¹, а в случае ПЭДВ существуют три характерных участка, которые могут иметь место при различных форматах диэлектрического стержня.

Например, на рис. 2 для волны LSM01 нижняя граница диапазона определяется металлическими критическими условиями этой волны, а верхняя граница определяется: участком КУ волны LSM02 с металлическим характером отсечки, участком КУ волны LSM11 с диэлектрическим характером отсечки (вертикальный участок) и участком КУ волны LSM11 с металлическим характером отсечки. Таким образом, рабочий одномодовый режим ПЭДВ может быть получен во всей области размеров d и g , находящейся между верхней и нижней границей и выделенной на рис. 2 серым цветом. Каждой паре размеров d и g будет соответствовать форм-фактор Φ , который определен ранее.

Пересечение линии Φ с нижней границей КУ обозначим через d_{min} , а пересечение с верхней границей КУ — d_{max} . Таким образом, частотный диапазон² будет лежать в пределах $[d_{\text{min}}; d_{\text{max}}]$, что не всегда удобно использовать при расчетах. Поэтому введем безразмерный коэффициент перекрытия по частоте $D = d_{\text{max}}/d_{\text{min}}$.

Наибольший интерес для авторов статьи представляет одномодовый неизлучающий режим, который для волны LSM01, сверху ограничен уровнем 0,5 и линией критических условий для волны LSM11, а снизу — линией критических условий волны LSM01.

На рис. 3 представлено семейство зависимостей коэффициента перекрытия от форм-фактора при различных отношениях значений диэлектрической проницаемости материала диэлектрического стержня. Сплошной линией изображены зависимости для ПЭДВ, работающего в режиме неизлучения, а пунктирными — для ПЭДВ, работающего в обычном режиме (для волны LSM01).

Для неизлучающего режима, согласно рис. 3, существует некоторый оптимальный форм-фактор, при котором достигается максимальная ширина диапазона перекрытия по частоте.

¹ Имеется в виду дисперсионная характеристика металлического волновода

² Это следует из того, что величина \tilde{d} нормирована по частоте (длине волны).

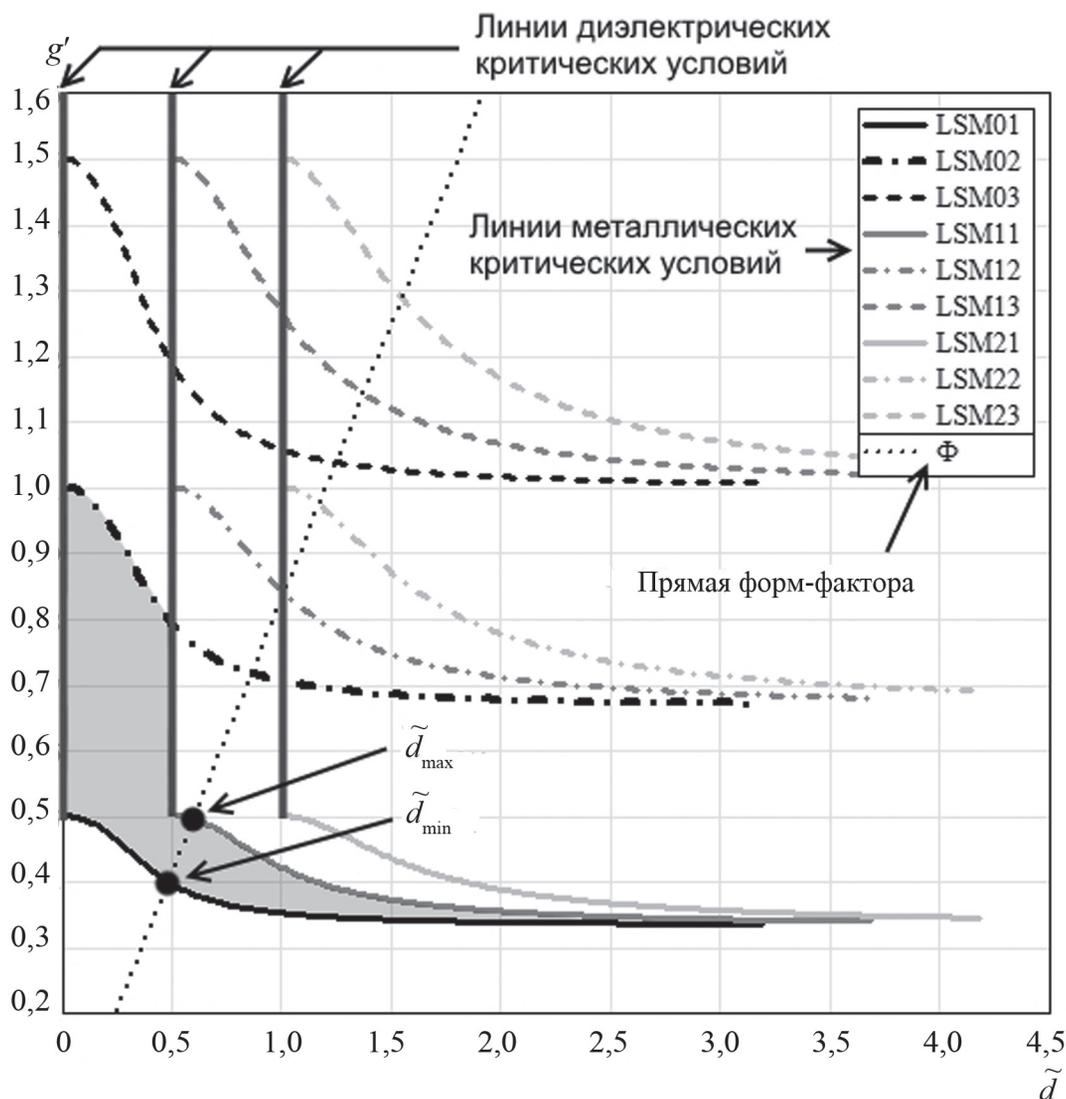


Рис. 2. Диаграмма критических условий ПЭДВ

Оценка оптимальных параметров полужагриванного диэлектрического волновода в неизлучающем режиме

Оценка зависимости оптимальной ширины частотного диапазона ПЭДВ в режиме неизлучения от отношения значений диэлектрической проницаемости стержня приведена на рис. 4. Оказалось, что изготавливать ПЭДВ, работающие в режиме неизлучения (неизлучающие ДВ), малоэффективно в диапазоне значений диэлектрической проницаемости от 2,5 до 5,5. При относительной диэлектрической проницаемости выше 3 зависимость на рис. 4 монотонно возрастает, но при увеличении значения проницаемости асимптотически стремится к уровню 1,3.

В результате расчетов было установлено, что перекрытие по частоте для ПЭДВ лежит в диапазоне 24...30 %.

Наиболее интересной для инженерных расчетов представляется зависимость значения оптимального

форм-фактора от электрических параметров стержня (рис. 5). Зная эту зависимость, можно заранее подобрать наилучший форм-фактор диэлектрического стержня при изготовлении ПЭДВ. Математический расчет этой зависимости требует значительных вычислительных ресурсов, поэтому предлагается простая формула аппроксимации, которая весьма точно (см. рис. 5) заменяет сложный расчет в диапазоне относительной диэлектрической проницаемости 1,5...30: $\Phi_{opt}(\chi) = \arctg(\chi - 0,6) + 0,17$.

Алгоритм инженерного расчета полужагриванного диэлектрического волновода

При проектировании устройств инженеру чаще всего приходится решать многокритериальную поисковую задачу для волны основного типа, в которой участвует множество параметров: размеры устройства, стоимость материалов, стоимость обработки матери-

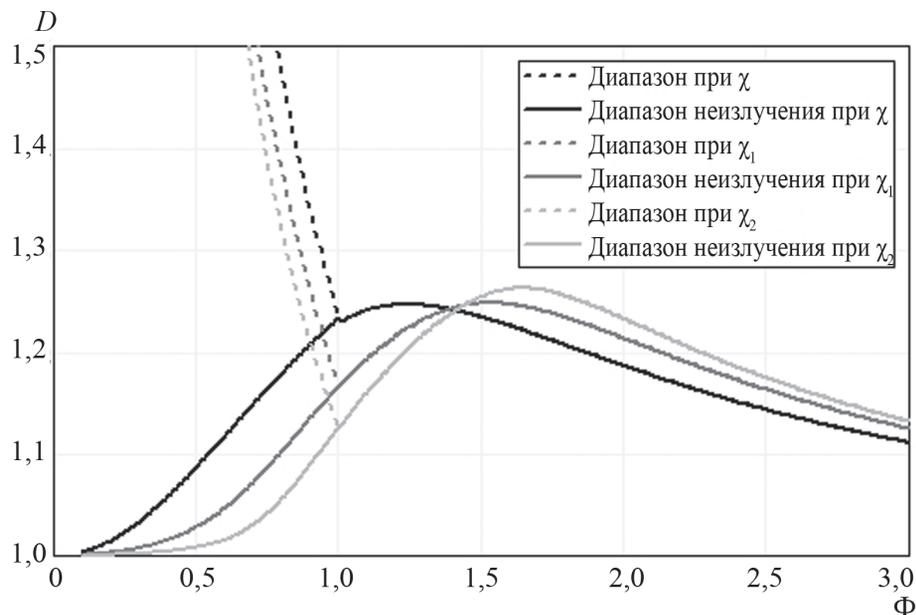


Рис. 3. Зависимость коэффициента перекрытия от форм-фактора для различных отношений значений диэлектрической проницаемости ($\chi = 2,25$; $\chi_1 = 5$; $\chi_2 = 10$)

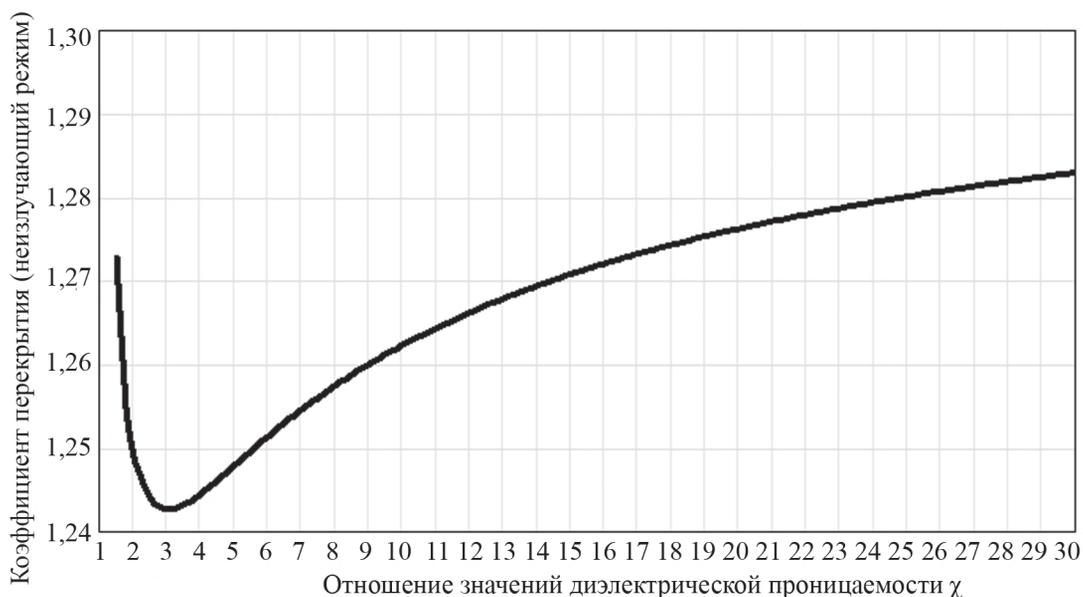


Рис. 4. Зависимость коэффициента перекрытия от отношения значений диэлектрической проницаемости χ

алов, степень автоматизации и технологичности при массовом производстве, удовлетворение требованиям технического задания по функциональному назначению. Рассмотрим порядок выбора физических параметров неизлучающего ПЭДВ.

1. На первом этапе проектирования задается ряд ограничений:

1.1. Требуемая критическая длина волны ПЭДВ.

1.2. Материал, которым располагает проектировщик. Требование к материалу определяется: ценой материала, доступностью, стоимостью обработки, допустимым диапазоном перекрытия, потерями.

2. После выбора материала по графику на рис. 4 определяется диапазон перекрытия.

3. По графику рис. 5 определяется значение форм-фактора.

4. Для основного типа волны строится диаграмма КУ (см. рис. 2).

5. Графическим или иным способом для полученного в п. 3 значения форм-фактора определяется верхняя граница диапазона d'_{\max} и соответствующее выбранному форм-фактору значение g'_{\max} . Максимальное значение выбирается по причине того, что требуется реализовать наиболее широкий частотный диапазон устройства.

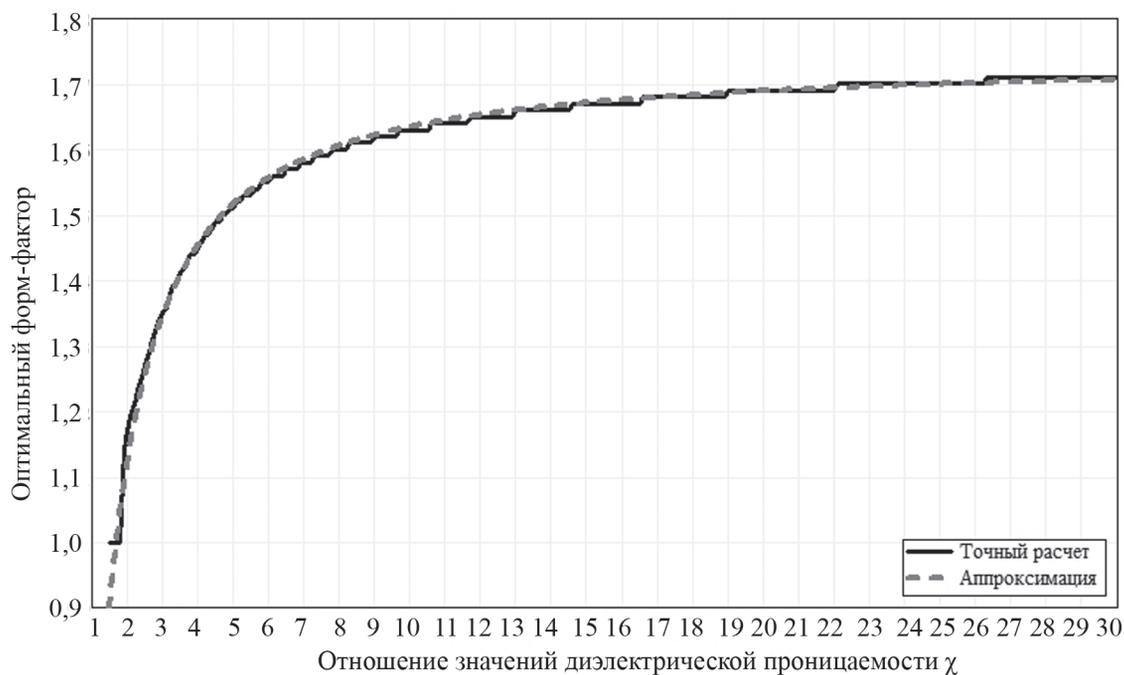


Рис. 5. Зависимость оптимального форм-фактора от отношения значений диэлектрической проницаемости χ

6. По формулам

$$\tilde{d} = d' \sqrt{\frac{\epsilon_1 \mu_1}{\epsilon_2 \mu_2} - 1}; \quad d' = \frac{d \sqrt{\epsilon_1 \mu_1}}{\lambda}; \quad g' = \frac{g \sqrt{\epsilon_1 \mu_1}}{\lambda}$$

производится обратный пересчет в абсолютные величины.

7. При необходимости проводится энергетический расчет и оценка погонных потерь ПЭДВ.

Заключение

В результате исследований установлено, что перекрытие по частоте для ПЭДВ в режиме неизлучения лежит в диапазоне 24...30%.

Показано, что наиболее эффективно использовать материалы с диэлектрической проницаемостью больше 5 для достижения наибольшей ширины частотного диапазона.

Предложена формула для аппроксимации зависимости оптимального форм-фактора от диэлектрической проницаемости в диапазоне 1,5...30.

Литература

1. Гутцайт Э.М. Типы волн в Н-образном металлодиэлектрическом волноводе // Радиотехника и электроника. 1962. Т. 7. № 2. С. 310—314.
2. Yoneyama T., Nishida S. Nonradiative Dielectric Waveguide for Millimeter-Wave Integrated Circuits // Microwave Theory and Techniques, IEEE Transactions on. 1981.

3. Крутских В.В. Функциональные узлы на полужекранированных диэлектрических волноводах. М.: Изд-во МЭИ, 2005.

4. Крутских В.В., Взятыхшев В.Ф. Класс устройств и схем миллиметрового диапазона на полужекранированных диэлектрических волноводах // Радиотехника. 2006. № 3. С. 75—79.

5. Взятыхшев В.Ф. Диэлектрические волноводы. М.: Сов. радио, 1970.

References

1. Gutcajt Je.M. Tipy Voln v N-obraznom Metallodijelektricheskom Volnovode. Radiotekhnika i jelektronika. 1962;7;2:310—314. (in Russian).
2. Yoneyama T., Nishida S. Nonradiative Dielectric Waveguide for Millimeter-Wave Integrated Circuits // Microwave Theory And Techniques, IEEE Transactions on. 1981.
3. Krutskih V.V. Funkcional'nye Uzly na Polujekranirovannyh Dijelektricheskih Volnovodah. M.: Izd-vo MPEI, 2005. (in Russian).
4. Krutskih V.V., Vzjatyshev V.F. Klass Ustrojstv i Shem Millimetrovogo Diapazona na Polujekranirovannyh Dijelektricheskih Volnovodah. Radiotekhnika. 2006;3:75—79. (in Russian).
5. Vzjatyshev V.F. Dijelektricheskie Volnovody. M.: Sov. radio, 1970. (in Russian).

Статья поступила в редакцию 11.03.2016