

А.А.Ивенский

МЕТОДИКА ОБОСНОВАНИЯ ЭЛЕКТРОДИНАМИЧЕСКИХ И КОНСТРУКТИВНЫХ ПАРАМЕТРОВ КОНСТРУКЦИОННЫХ ПОГЛОЩАЮЩИХ МАТЕРИАЛОВ ВОЛНОВОДНОГО ТИПА

*ВУНЦ ВВС «ВВА» имени профессора Н.Е.Жуковского и Ю.А.Гагарина,
Воронеж, Россия*

В работе предложена методика обоснования электродинамических и конструктивных параметров материалов волноводного типа, основанная на разработанной модели поглощения СВЧ-излучения на импедансных стенках и диэлектрическом наполнителе конструкционных поглощающих материалов замкнутых волноводных структур. Сущность модели, основанной на методах теории дифракции электромагнитных волн в слоистых средах, законах распространения сверхвысокочастотного излучения в волноводах, заключается в том, что электромагнитное поле перед решеткой рассматривается в виде суперпозиции полей падающей плоской волны, зеркально отраженной от границы раздела «среда – материал», и рассеянной на стенках решетки материала. Электромагнитная волна, падающая на материал, по мере распространения вглубь него взаимодействует с радиопоглощающими стенками. Предложен подход определения коэффициента отражения материала, особенностью которого является то, что в выражение для расчета коэффициента отражения введено слагаемое, описывающее экспоненциальное снижение уровня амплитуды (плотности потока мощности) рассеянной составляющей электромагнитного поля при распространении ее вглубь материала и обратно от конструктивных и электродинамических параметров импедансных стенок и диэлектрического наполнителя замкнутых волноводных структур (закороченных волноводных отрезков), и позволяющий установить закономерности между отражательными характеристиками конструкционного поглощающего материала и его электродинамическими и конструктивными параметрами.

Ключевые слова: ослабление СВЧ - излучения, конструкционный поглощающий материал, коэффициент отражения, коэффициент поглощения, плотности потока мощности электромагнитного поля

Введение

Проблемам создания материалов, предназначенных для ослабления коэффициента отражения при нормальном падении монохроматической электромагнитной волны на плоскую металлическую поверхность, посвящено большое количество работ [1-4].

С точки зрения радиофизики такие материалы характеризуются толщиной и отражательными характеристиками в заданном диапазоне длин волн. Здесь используется комплексный коэффициент отражения, определяемый как отношение амплитуд отраженной и падающей волн.

Постановка задачи

Задачей при разработке конструкционных поглощающих материалов (КПМ) является обоснование их рациональных электродинамических и конструктивных параметров и получение минимального коэффициента отражения в максимально широком диапазоне длин волн.

Как известно, основными электродинамическими параметрами любого вещества, характеризующими взаимодействие электромагнитной волны с материалами, является диэлектрическая ($\varepsilon = \varepsilon' + \varepsilon''$) и магнитная ($\mu = \mu' + \mu''$) проницаемости.

При этом, параметры ε' и μ' связаны с передачей энергии ЭМИ, а ε'' и μ'' – с ее потерей или энергетическим рассеиванием в материалах за счет проводимости и резонансных механизмов.

Свойства конструкционных поглощающих материалов могут быть улучшены за счет их магнитной проницаемости μ' . Однако известные магнитные материалы имеют значительный удельный вес и ограниченный рабочий диапазон температур, что снижает возможность их практического применения.

В связи с этим для расширения рабочего диапазона рассматриваются методы, в которых используются материалы с дисперсией диэлектрической проницаемости и структуры, в которых физическим механизмом поглощения электромагнитной волны является преобразование падающей плоской волны в поверхностную с последующим ее поглощением в толще материала.

Целью работы является разработка методики обоснования электродинамических и конструктивных параметров конструкционных поглощающих материалов волноводного типа.

Как известно, при разработке поглощающих структур приходится сталкиваться с разрешением следующего противоречия: с одной стороны, стремление использовать материалы с максимально высокими значениями коэффициента поглощения, а с другой – обеспечить требования по согласованию электродинамических характеристик структуры материала с соответствующими характеристиками свободного пространства.

Для разрешения указанного противоречия в известной литературе [1] рассматривается подбор специальных сред и распределение их электрофизических характеристик по фазовому пространству материала. Обычно в поглотителе электромагнитных волн используется градиентный рост проводимости в направлении задней стенки материала, за счет увеличения концентрации и плотности поглотителя, который обеспечивает минимум отражения на передней кромке и максимум поглощения в толще.

Для создания поглощающих материалов с малым коэффициентом отражения в широкой полосе частот в данной работе рассматривается другой подход, основанный на выборе электродинамических и

конструктивных параметров материала при решении задачи оптимизации в многомерном пространстве, где необходимо обеспечить максимальную широкополосность при заданном уровне отражательных характеристик материала.

Материалы и методы

Для решения указанной проблемы в качестве поглощающего материала в работе предложена конструкция, представляющая собой решетку – систему взаимно перпендикулярных полосковых элементов, изготовленных из диэлектрика и покрытых радиопоглощающим составом, которые расположены на одинаковых расстояниях друг от друга (с постоянным шагом – периодом решетки).

Взаимная ориентация элементов решетки и всего конструкционного поглощающего материала (КПМ) относительно вектора поляризации падающего излучения дополнительно усложняют решение задачи оптимизации. Поэтому в работе был избран путь поэтапного поиска экстремума с попеременной фиксацией ряда параметров и последовательного сужения диапазона изменения указанных переменных.

Многопараметрическую задачу оптимизации КПМ с точки зрения обеспечения минимума коэффициента отражения $K_{отр}$ можно свести к исследованию его дифракционных свойств в зависимости от электродинамических характеристик при фиксированных геометрических параметрах решетки, обеспечивающих максимальное поглощение энергии электромагнитных волн. Поиск экстремума осуществлялся методом последовательных приближений [5], который позволяет достаточно быстро сформировать функционал от конструктивных и электродинамических параметров.

Исходными данными при решении задачи оптимизации параметров КПМ являются: длина волны падающего ЭМИ (λ), удельная проводимость элементов решетки (σ), относительная диэлектрическая проницаемость среды (ϵ_d), заполняющей решетку, период (a) и высота (l) решетки.

За основу математической модели процесса поглощения СВЧ-излучения конструкционным поглощающим материалом взят механизм распространения монохроматического электромагнитного поля в ячейке КПМ как по прямоугольным волноводам с импедансными стенками и диэлектрическим заполнением, при этом источник находится за пределами рассматриваемой части линии передачи.

Для обеспечения плавного входа электромагнитной волны в структуру КПМ учитывалось согласование электродинамических и конструктивных параметров материала с характеристиками, падающего ЭМИ. В соответствии с известными положениями теории электродинамики

для определения критической длины волны $\lambda_{кр}$ при распространении ЭМИ в волноводе применялось выражение [6]:

$$\lambda_{кр} = \frac{2}{\sqrt{\left(\frac{m}{a}\right)^2 + \left(\frac{n}{b}\right)^2}} = \frac{2}{\sqrt{\left(\frac{1}{a}\right)^2 + \left(\frac{0}{b}\right)^2}} = \frac{2}{\sqrt{\left(\frac{1}{a}\right)^2}} = 2a. \quad (1)$$

Как известно, низшей волной, для которой $\lambda_{кр}$ имеет наибольшую величину, в прямоугольной ячейке является волна типа H_{10} . Это основной тип волны в прямоугольной ячейке, так как обеспечивает одномодовый (одноволновый) режим работы.

Таким образом, для волн типа H_{10} критическая длина волны $\lambda_{кр} = 2a$.

Для описания отражательных характеристик КПМ, на основе поглощающих решеток, электромагнитное поле перед материалом в работе рассматривается в виде суперпозиции полей падающей плоской волны, зеркально отраженной от границы раздела «среда – КПМ», и рассеянной на стенках решетки с учетом многократных переотражений и ослабления амплитуды (снижение плотности потока мощности электромагнитного поля) на импедансных стенках и диэлектрическом наполнителе КПМ замкнутых волноводных структур: $P_{omp} = P_1 + P_2$, где P_1 , P_2 – плотность потока мощности зеркально отраженной и рассеянной компоненты электромагнитного поля соответственно (Рисунок 1).

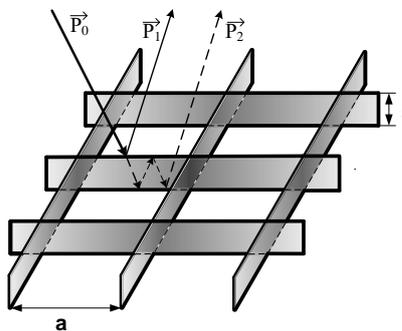


Рисунок 1 – Схема рассеяния электромагнитной волны

Для определения коэффициентов отражения от решетки КПМ K_1 и прохождения электромагнитных волн в его толщю K_2 воспользуемся выражениями, описывающими отражательные характеристики идеально проводящих периодических структур [7]:

$$K_1 = \frac{-1 + \left(\frac{2a}{\lambda}\right)^2 \ln\left(\text{sh} \frac{\pi l}{2a}\right)^{-1} \ln \text{ch} \frac{\pi l}{2a}}{1 + \left(\frac{2a}{\lambda}\right)^2 \ln\left(\text{sh} \frac{\pi l}{2a}\right)^{-1} \ln \text{ch} \frac{\pi l}{2a} - i \frac{2a}{\lambda} \ln\left(2 \text{sh} \frac{\pi l}{a}\right)^{-1}}, \quad (2)$$

$$K_2 = \frac{-i \frac{2a}{\lambda} \ln\left(2 \text{sh} \frac{\pi l}{a}\right)^{-1}}{1 + \left(\frac{2a}{\lambda}\right)^2 \ln\left(\text{sh} \frac{\pi l}{a}\right)^{-1} \ln \text{ch} \frac{\pi l}{a} - i \frac{2a}{\lambda} \ln\left(2 \text{sh} \frac{\pi l}{a}\right)^{-1}}. \quad (3)$$

Электромагнитная волна, падающая на ячейки КПМ по мере распространения вглубь материала (вдоль оси Z) взаимодействует с радиопоглощающим слоем, нанесенным на полосковые элементы решетки (Рисунок 2), при этом мощность излучения изменяется по экспоненциальному закону:

$$\vec{P}(z) = \vec{P}_0 \cdot e^{-2h''z}, \quad (4)$$

где P_0 – плотность потока мощности электромагнитного поля на входе (при $z = 0$).

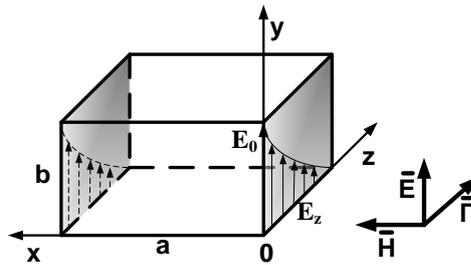


Рисунок 2 – Схема затухания электромагнитной волны

Для учета затухания ЭМВ в толще КПМ рассматриваются суммарные потери на радиопоглощающих стенках решетки и в диэлектрическом заполнении ячеек материала: $h''_{\Sigma} = h''_m + h''_d$, при этом постоянная затухания на стенках решетки h''_m определяется с помощью выражения [8]:

$$h''_m = \frac{R_s}{Z_{H_{10}} a/2} \left[1 - \left(\frac{\lambda}{2a} \right)^2 \right]^{-1/2} \cdot \left[1 + \left(\frac{\lambda}{2a} \right)^2 \right]. \quad (5)$$

Постоянная затухания в диэлектрике, заполняющем ячейку h''_d равна [6]:

$$h''_d = \frac{\pi}{\lambda} \frac{\varepsilon_d \tan \delta}{\sqrt{\varepsilon_d - \left(\frac{\lambda}{2a} \right)^2}}, \quad (6)$$

где тангенс угла диэлектрических потерь $\tan \delta$ определяется с помощью выражения:

$$\tan \delta = \frac{\sigma_d}{\omega \varepsilon_d \varepsilon_0}. \quad (7)$$

С учетом выражений (5) и (6) суммарные потери в ячейке КПМ имеют вид:

$$h''_{\Sigma} = \frac{R_s}{Z_{H_{10}} a/2} \left[1 - \left(\frac{\lambda}{2a} \right)^2 \right]^{-1/2} \cdot \left[1 + \left(\frac{\lambda}{2a} \right)^2 \right] + \frac{\pi}{\lambda} \frac{\varepsilon_d \tan \delta}{\sqrt{\varepsilon_d - \left(\frac{\lambda}{2a} \right)^2}}, \quad (8)$$

где R_s – поверхностное сопротивление полоскового элемента ячейки определяется с использованием выражения:

$$R_s = \sqrt{\frac{\omega \mu \mu_0}{2\sigma}}, \quad (9)$$

где $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7}$ – магнитная постоянная; $\omega = 2\pi f$ – круговая частота; f – рабочая частота; σ – удельная проводимость элементов решетки; Z_{H10} – характеристическое сопротивление ячейки КПМ вычисляется по формуле:

$$Z_{H10} = \frac{Z_c}{\sqrt{1 - \left(\frac{\lambda}{2a}\right)^2}}, \quad (10)$$

где Z_c – сопротивление среды, заполняющей ячейку:

$$Z_c = \frac{120\pi\mu_0}{\sqrt{\frac{\mu_0}{\epsilon_0}}}, \quad (11)$$

где ϵ_0, μ_0 – диэлектрическая и магнитная проницаемости среды в ячейке соответственно.

Коэффициент отражения для элементов решетки с импедансным покрытием с учетом выражений (2) - (4), (8), в котором коэффициент затухания определяет экспоненциальное уменьшение амплитуды электромагнитной волны при распространении ее вглубь материала, будет вычисляться по формуле:

$$K_{\text{отр}} = \frac{-1 + \left(\frac{2a}{\lambda}\right)^2 \ln\left(\text{sh} \frac{\pi l}{2a}\right)^{-1} \ln \text{ch} \frac{\pi l}{2a}}{1 + \left(\frac{2a}{\lambda}\right)^2 \ln\left(\text{sh} \frac{\pi l}{2a}\right)^{-1} \ln \text{ch} \frac{\pi l}{2a} - i \frac{2a}{\lambda} \ln\left(2\text{sh} \frac{\pi l}{a}\right)^{-1}} + \frac{-i \frac{2a}{\lambda} \ln\left(2\text{sh} \frac{\pi l}{a}\right)^{-1}}{1 + \left(\frac{2a}{\lambda}\right)^2 \ln\left(\text{sh} \frac{\pi l}{a}\right)^{-1} \ln \text{ch} \frac{\pi L}{a} - i \frac{2a}{\lambda} \ln\left(2\text{sh} \frac{\pi l}{a}\right)^{-1}} \cdot e^{-2h_{\Sigma} l} \quad (12)$$

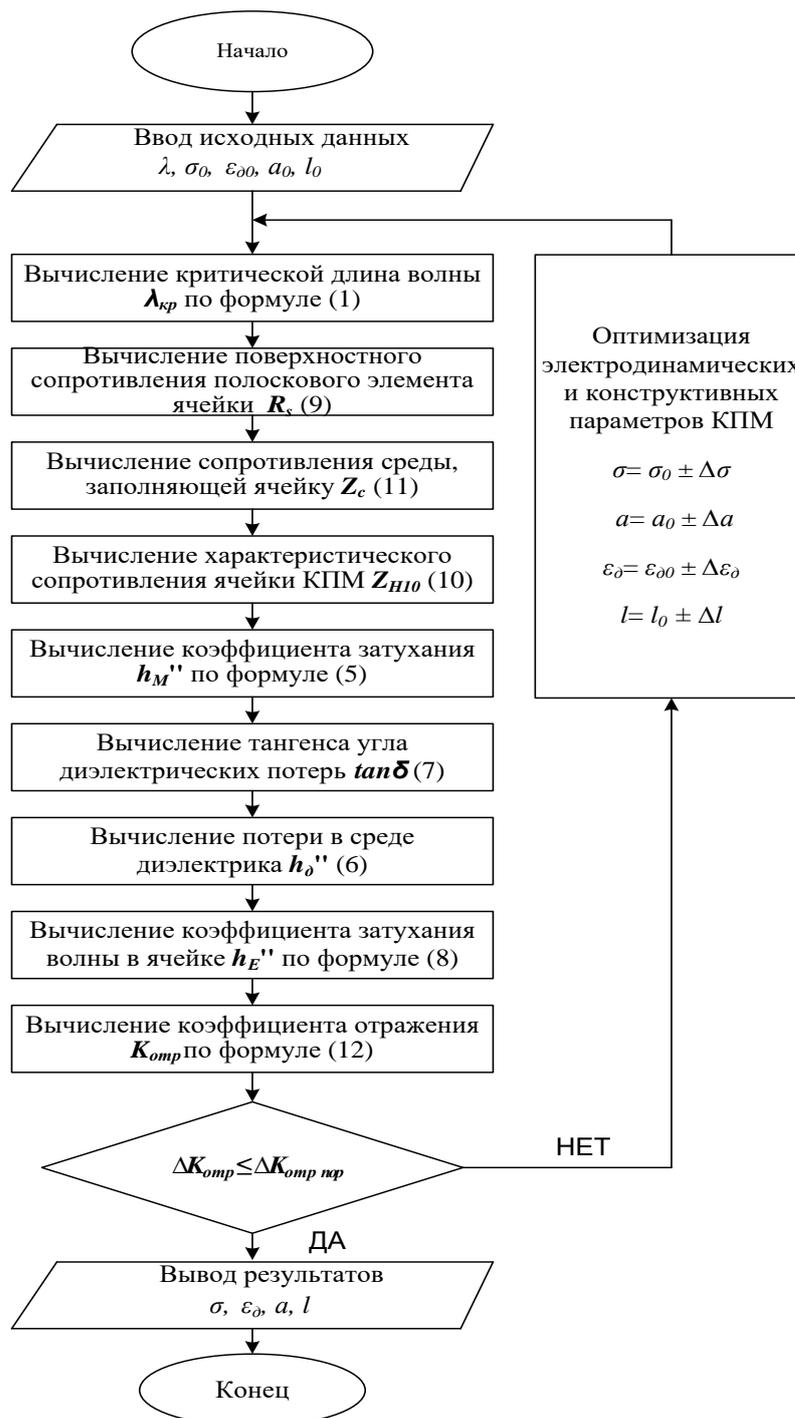


Рисунок 3 – Алгоритм определения электродинамических и конструктивных параметров конструкционного поглощающего материала

Результаты

Предложенная математическая модель процесса ослабления СВЧ-излучения конструкционным поглощающим материалом позволяет установить закономерности между электродинамическими и конструктивными параметрами КПМ и его отражательными

характеристиками за счет ослабления электромагнитных волн на периодических структурах волноводного типа (закороченных волноводных отрезков) с импедансными стенками и диэлектрическим заполнением.

На основе приведенных выражений и с учетом требований к параметрам КПМ, обеспечивающим заданный коэффициент отражения $K_{отр} \leq K_{отр\ пор}$, разработан алгоритм определения электродинамических и конструктивных параметров ПМ, представленный на Рисунке 3.

Если полученное значение коэффициента отражения ЭМИ не удовлетворяет критерию $\Delta K_{отр} \leq \Delta K_{отр\ пор}$, то осуществляется варьирование параметров КПМ с шагом Δ : удельная проводимость элемента решетки $\Delta\sigma$; относительная диэлектрическая проницаемость $\Delta\epsilon_d$ среды, заполняющей решетку, Δa – период и Δl – высота решетки. Рассчитанные параметры, при которых $\Delta K_{отр} \leq \Delta K_{отр\ пор}$, принимаются для разработки КПМ, удовлетворяющих данному условию.

Заключение

Таким образом, предложенная методика обоснования параметров конструктивных поглощающих материалов волноводного типа, позволяет сформировать область рациональных значений совокупности электродинамических и конструктивных параметров КПМ, обеспечивающих требуемые значения коэффициента отражения.

ЛИТЕРАТУРА

1. Ковнеристый Ю.К. Материалы, поглощающие СВЧ-излучения / Ковнеристый Ю.К., Лазарева И.Ю., Раваев А.А. – М.: Наука, 1982. – 164 с.
2. Ruck G//Radar Cross-Section Handbook. N.Y.: Plenum Press, 1970.
3. Knott E.F., Shaeffer J.A., Tuley M.T.//Radar Cross-Section: Its Prediction, Measurement and Reduction. Dedham: Actech House, 1985.
4. Harteman P., Labeirie M.//Revue Technique Thomson-CSF, 1987. V.19. № 3-4.P.413.
5. Поляк Б.Т. Введение в оптимизацию. – М.: Наука, 1983. – 384 с.
6. Никольский В.В. Электродинамика и распространение радиоволн. – М.: Наука, 1978. – 544 с.
7. Вайнштейн Л.А. К электродинамической теории решеток. – М.: Электроника больших мощностей. Сб. № 2, АН СССР, 1963.
8. Гольдштейн Л.Д., Зернов Н.В. Электромагнитные поля и волны. – М.: «Советское радио», 1971. – 664 с.

A.A. Ivenskiy

**TECHNIQUE OF JUSTIFICATION OF ELECTRODYNAMIC
AND CONSTRUCTIVE PARAMETERS OF CONSTRUCTIVE
ABSORBING MATERIALS OF WAVEGUIDE TYPE**

*Air force Academy named after Professor N.E. Zhukovsky and
Y.A. Gagarin, Voronezh, Russia*

The paper proposes a method for substantiating the electrodynamic and structural parameters of waveguide-type materials, based on the developed model for the absorption of microwave radiation on impedance walls and the dielectric filler of structural absorbing materials of closed waveguide structures. The essence of the model, based on the methods of the theory of diffraction of electromagnetic waves in layered media, the laws of propagation of microwave radiation in waveguides, is that the electromagnetic field in front of the grating is considered as a superposition of the fields of the incident plane wave, mirrored from the "medium-material" interface, and scattered on the walls of the lattice material. An electromagnetic wave incident on the material, as it propagates deep into it, interacts with radio-absorbing walls. An approach is proposed for determining the reflection coefficient of a material, a feature of which is that a term is introduced in the expression for calculating the reflection coefficient describing an exponential decrease in the amplitude level (power flux density) of the diffuse component of the electromagnetic field when it propagates deep into the material and back impedance walls and dielectric filler of closed waveguide structures (short-circuited waveguide segments), and allowing becoming patterns between reflection characteristics of the structural material and the absorbent electrodynamic and design parameters.

Keywords: attenuation of microwave radiation, structural absorbing material, reflection coefficient, absorption coefficient, power flux density of an electromagnetic field

REFERENCES

1. Kovniryu Yu.K. Materials absorbing microwave radiation / Kovneristy Yu.K., Lazareva I.Yu., Rawaev A.A. – M.: Science, 1982. – 164 p.
2. Ruck G // Radar Cross-Section Handbook. N.Y.: Plenum Press, 1970.
3. Knott E.F., Shaeffer J.A., Tuley M.T.//Radar Cross-Section: Its Prediction, Measurement and Reduction. Dedham: Actech House, 1985.
4. Harteman P., Labeirie M.//Revue Technique Thomson-CSF, 1987. V.19. № 3-4. P.413.
5. Pole B.T. Introduction to optimization. – M.: Science, 1983. – 384 p.
6. Nikolsky V.V. Electrodynamics and propagation of radio waves. – M.: Science, 1978. – 544 p.
7. Weinstein L.A. To the electrodynamic theory of lattices. – M.: High-power electronics. Sat Number 2, Academy of Sciences of the USSR, 1963.
8. Goldstein LD, Zernov N.V. Electromagnetic fields and waves. – M.: «Soviet Radio», 1971. – 664 p.