

ЭКРАНИРОВАНИЕ ШИРОКОПОЛОСНЫХ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ СИГНАЛОВ МАГНИТОДИЭЛЕКТРИЧЕСКИМ ЭКРАНОМ

В.Т. Ерофеев¹, О.В. Кравченко²

¹*Учреждение Белорусского государственного университета «НИИ прикладных проблем математики и информатики», пр. Независимости, 4, 220030, г. Минск, Беларусь, bsu_erofeenko@tut.by*

²*Научно-технологический центр уникального приборостроения Российской академии наук, Бутлерова д.15, г. Москва, Россия, ok@ntcup.ru*

Рассмотрена краевая задача о проникновении широкополосных импульсных электромагнитных сигналов через плоский однослойный магнито-диэлектрический экран. Представлено аналитическое решение краевой задачи в интегральной форме с помощью монохроматических спектральных электромагнитных полей и финитных атомарных функций, моделирующих сигналы конечной длительности. Вычисляется поле (6), проникающее через экран. Численно проанализирован коэффициент эффективности экранирования временных сигналов, проходящих через экран. Построены графики коэффициента эффективности экранирования.

Ключевые слова: Задача экранирования; плоский экран; широкополосные сигналы; спектральные функции сигналов; атомарные функции; эффективность экранирования; численное моделирование.

SCREENING OF BROAD-BAND ELECTROMAGNETIC SIGNAL BY MAGNETODIELECTRIC SCREEN

V. T. Erofeenko^a, O. V. Kravchenko^b

^a*Belarusian State University «Research Institute for Applied Problems of Mathematics and Informatics», 4 Niezalieznasti Avenue, Minsk 220030, Belarus, E-mail: bsu_erofeenko@tut.by*

^b*Scientific and Technological Centre of Unique Instrumentation» of the Russian Academy of Sciences, Butlerova 15, Moscow, Russian Federation, ok@ntcup.ru*
Corresponding author: bsu_erofeenko@tut.by

The boundary value problem of the penetration of broad-band pulsed electromagnetic signals through a flat single-layer magnetodielectric screen is considered. An analytical solution of the boundary value problem in integral form is presented utilizing a monochromatic spectral electromagnetic fields and finite atomic functions simulating signals of finite duration. The field (6) penetrating through the screen is calculated. The efficiency coefficient of screening of time signals passing through the screen is numerically analyzed. A graphs of the screening efficiency coefficient is plotted.

Keywords: Screening problem; plane screen; broad-band signals; spectral functions signals; atomic functions; shielding effectiveness; numerical simulation.

Введение

Актуальными для микроэлектроники являются проблемы электромагнитной совместимости технических средств, проблемы защиты научной аппаратуры широкого спектра назначения и информации от воздействий внешних электромагнитных излучений. Для решения этих проблем наиболее эффективным способом является использование электромагнитных защитных экранов и оболочек [1]. Актуальным является разработка методов решения краевых задач экранирования импульсных электромагнитных полей экранами с различными материальными структурами: биизотропными [2], многослойными [2, 3], экранами из пермаллоя [4] и другими.

В предлагаемой работе численно исследовано решение краевой задачи экранирования широкополосных импульсных электромагнитных сигналов [5], представленных через атомарную функцию $up(x)$ [6], магнитодиэлектрическими экранами. Аналитическое решение задачи получено в интегральном виде и представлено через спектральные базисные электромагнитные поля [7, с.96], сосредоточенные на частотном интервале $-\Omega_{\text{сиг}} < \omega < \Omega_{\text{сиг}}$.

1. Теоретические основы

Сформулируем краевую задачу экранирования импульсных электромагнитных полей магнитодиэлектрическим экраном D (рисунок 1).

Краевая задача. Для заданного первичного поля \vec{E}_0, \vec{H}_0 требуется определить поля \vec{E}'_1, \vec{H}'_1 ; \vec{E}_2, \vec{H}_2 ; \vec{E}, \vec{H} , которые удовлетворяют уравнениям

$$\text{rot } \vec{E}'_1 = -\mu_0 \frac{\partial \vec{H}'_1}{\partial t}, \text{rot } \vec{H}'_1 = \varepsilon_0 \frac{\partial \vec{E}'_1}{\partial t} \quad \text{в } D_1, \quad (1)$$

$$\text{rot } \vec{E}_2 = -\mu_0 \frac{\partial \vec{H}_2}{\partial t}, \text{rot } \vec{H}_2 = \varepsilon_0 \frac{\partial \vec{E}_2}{\partial t} \quad \text{в } D_2, \quad (2)$$

$$\text{rot } \vec{E} = -\mu \frac{\partial \vec{H}}{\partial t}, \text{rot } \vec{H} = \varepsilon \frac{\partial \vec{E}}{\partial t} \quad \text{в } D, \quad (3)$$

граничным условиям непрерывности тангенциальных составляющих полей на плоскостях $z = 0, z = \Delta$:

$$(\vec{\mathbf{E}}_{1\tau} - \vec{\mathbf{E}}_{\tau})|_{z=0} = 0, \quad (\vec{\mathbf{H}}_{1\tau} - \vec{\mathbf{H}}_{\tau})|_{z=0} = 0, \quad (\vec{\mathbf{E}}_{2\tau} - \vec{\mathbf{E}}_{\tau})|_{z=\Delta} = 0, \quad (\vec{\mathbf{H}}_{2\tau} - \vec{\mathbf{H}}_{\tau})|_{z=\Delta} = 0; \quad (4)$$

и условиям излучения на бесконечности. ■

В качестве первичного поля $\vec{\mathbf{E}}_0, \vec{\mathbf{H}}_0$, воздействующего на экран, выберем широкополосный электромагнитный сигнал [5], распространяющийся под углом θ_0 к экрану D .

$$\vec{\mathbf{E}}_0(\vec{r}, t) = \frac{E_0}{2\pi} \sin(\alpha_+(t)) \text{Up}(\alpha_+(t)) \vec{e}_y, \quad \vec{\mathbf{H}}_0(\vec{r}, t) = \frac{E_0}{2\pi Z_0} \sin(\alpha_+(t)) \text{Up}(\alpha_+(t)) \vec{v}_2^{(-)}, \quad (5)$$

Решение задачи (1) - (4) определяется формулами

$$\vec{\mathbf{E}}_2(\vec{r}, t) = \frac{E_0}{2\pi} U_2(2\alpha_+(t)) \vec{e}_y, \quad \vec{\mathbf{H}}_2(\vec{r}, t) = \frac{E_0}{2\pi Z_0} U_2(2\alpha_+(t)) \vec{v}_2^{(-)}; \quad (6)$$

$$\vec{\mathbf{E}}_1'(\vec{r}, t) = \frac{E_0}{2\pi} U_1(2\alpha_-(t)) \vec{e}_y, \quad \vec{\mathbf{H}}_1'(\vec{r}, t) = \frac{E_0}{2\pi Z_0} U_1(2\alpha_-(t)) \vec{v}_2^{(+)}$$

где

$$U_2(x) = \int_{-1}^1 \frac{\text{up}_w^{(-)}(\bar{\omega})}{|D|^2} (\cos(\bar{\omega}\alpha_v) \sin(\bar{\omega}(x - \alpha_0)) + B \sin(\bar{\omega}\alpha_v) \cos(\bar{\omega}(x - \alpha_0))) d\bar{\omega},$$

$$U_1(x) = \frac{1}{2} \int_{-1}^1 \frac{\text{up}_w^{(-)}(\bar{\omega})}{|D|^2} B^{(-)} (\sin(2\bar{\omega}\alpha_v) \cos(\bar{\omega}x) - B(1 - \cos(2\bar{\omega}\alpha_v)) \sin(\bar{\omega}x)) d\bar{\omega},$$

$$|D|^2 = (\cos^2(\alpha_v \bar{\omega}) + B^2 \sin^2(\alpha_v \bar{\omega})), \quad \alpha_v = \Omega_{\text{сир}} \bar{v} \frac{\Delta}{c}, \quad \alpha_0 = \Omega_{\text{сир}} \frac{\Delta}{c} \cos\theta_0,$$

$$B = \frac{1}{2} \left(\frac{\bar{v}}{\mu_r \cos(\theta_0)} + \frac{\mu_r \cos(\theta_0)}{\bar{v}} \right), \quad B^{(-)} = \frac{1}{2} \left(\frac{\bar{v}}{\mu_r \cos(\theta_0)} - \frac{\mu_r \cos(\theta_0)}{\bar{v}} \right).$$

$$\vec{v}_2^{(\mp)} = \mp \cos\theta_0 \vec{e}_x + \sin\theta_0 \vec{e}_z, \quad \bar{v} = \sqrt{\epsilon_r \mu_r - \sin^2\theta_0}, \quad \mu = \mu_r \mu_0, \quad \epsilon = \epsilon_r \epsilon_0.$$

Используется атомарная функция $\text{up}(x)$ и спектральная функция $\text{Up}(y)$ [6].

$$\text{up}(x) \neq 0 \text{ при } |x| < 1, \quad \text{up}(x) = 0 \text{ при } |x| \geq 1, \quad (7)$$

$$up(x) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} Up(y) \exp(-ixy) dy, \quad Up(y) = \prod_{n=1}^{\infty} \text{sinc}\left(\frac{y}{2^n}\right), \quad \text{sinc}(x) = \frac{\sin x}{x},$$

$$up_{\text{ш}}^{(-)}(\bar{\omega}) = up(2\bar{\omega}-1) - up(2\bar{\omega}+1).$$

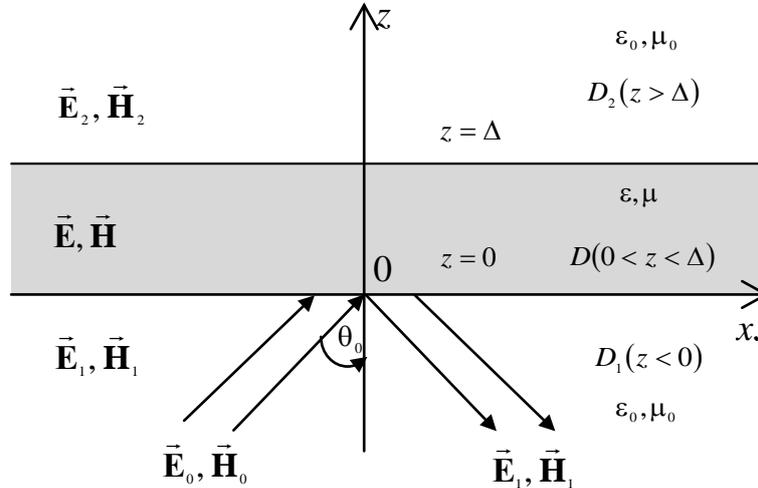


Рисунок 1 – Экранирование широкополосных электромагнитных сигналов магнито-электрическим экраном.

2. Результаты и их обсуждение

Проведено численное моделирование коэффициента эффективности экранирования \mathcal{E} импульсного широкополосного электромагнитного сигнала, показывающего во сколько раз ослабевает сигнал при прохождении через экран.

Коэффициент эффективности экранирования определим соотношением

$$\mathcal{E} = \frac{\max_{-\infty < t < \infty} |\vec{E}_0(z=0, t)|}{\max_{-\infty < t < \infty} |\vec{E}_2(z=\Delta, t)|}, \quad (8)$$

где поля \vec{E}_0, \vec{E}_2 определены в формулах(5), (6).

На рисунке 2 построены графики для коэффициента эффективности экранирования (8) электрического поля широкополосного сигнала для некоторых значений параметров. Коэффициент эффективности (8) зависит от пяти параметров: $\mu_r, \epsilon_r, \Delta, \Omega_{\text{сиг}}, \theta_0$; μ_r – относительная

магнитная проницаемость экрана, ε_r – относительная диэлектрическая проницаемость экрана, Δ – толщина экрана, $-\Omega_{\text{сиг}} < \omega < \Omega_{\text{сиг}}$ частотный интервал широкополосного сигнала, θ_0 – угол падения поля сигнала на экран.

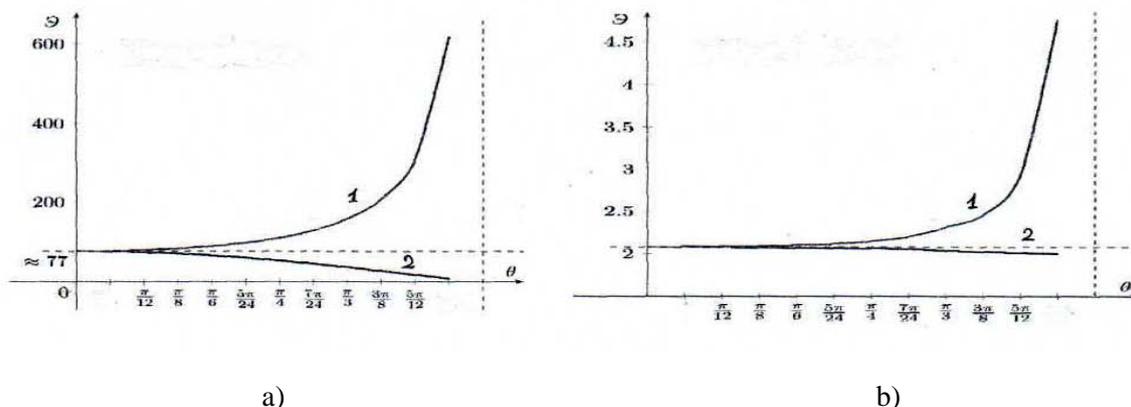


Рисунок 2 – Зависимость коэффициента эффективности экранирования от θ_0 при значении параметров: $\Delta = 10^{-3}$ м ; графики:

1) $\Omega_{\text{сиг}} = 10^5$ Гц, 2) $\Omega_{\text{сиг}} = 10^3$ Гц ; а) $\mu_r = 10^8, \varepsilon_r = 1$; б) $\mu_r = 1, \varepsilon_r = 10^8$.

Разработанная методика может быть использована для решения краевых задач экранирования узкополосных электромагнитных сигналов магнитодиэлектрическим экраном.

Заключение

Показано, что коэффициент эффективности экранирования ТЕ- поляризованного широкополосного электромагнитного сигнала (вектор \vec{E}_0 параллелен экрану) принимает большие значения для магнитного экрана $\mu_r = 10^8, \varepsilon_r = 1$ (рисунок 2, а) и малые значения для диэлектрического экрана $\mu_r = 1, \varepsilon_r = 10^8$ (рисунок 2, б)). Показано, что уменьшение частоты $\Omega_{\text{сиг}}$ сигнала приводит к резкому уменьшению эффективности экранирования.

Библиографические ссылки

1. Аполлонский С. М. Расчёт электромагнитных экранирующих оболочек. Ленинград: Энергоиздат, 1982. 144 с.

2. Ерофеенко В.Т., Малый С.В. Алгоритм численного исследования экранирующих свойств многослойных экранов из композитных материалов // Информатика. 2010. № 37(4). С. 96–104.
3. Ерофеенко В.Т., Бондаренко В.Ф. Экранирование магнитного импульса пленочным многослойным экраном с чередующимися магнитными и немагнитными слоями // Журнал технической физики. 2017. № 87(6). С. 831–836.
4. Ерофеенко В.Т., Громыко Г.Ф., Заяц Г.М. Численное моделирование задач экранирования импульсных электромагнитных полей экранами из пермаллоя // Дифференциальные уравнения. 2021. № 57 (12). С. 1682–1697.
5. Ерофеенко В.Т., Урбанович А.И. Конструирование импульсных широкополосных и узкополосных электромагнитных сигналов, распространяющихся в пространстве, с применением атомарных функций // Физические основы приборостроения. 2021. № 10 (2). С. 34–41.
6. Кравченко В.Ф. Лекции по теории атомарных функций и некоторым их приложениям. Монография. М.: Радиотехника, 2003. 512 с.
7. Ерофеенко В.Т., Козловская И.С. Аналитическое моделирование в электродинамике. Минск: БГУ, 2014. 304 с.