

ЭКРАНИРОВАНИЕ ИМПУЛЬСНЫХ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ ПОЛЕЙ, ИСПОЛЬЗУЕМЫХ В НАТУРНЫХ ЭКСПЕРИМЕНТАХ, ЭКРАНАМИ ИЗ ПЕРМАЛЛОЯ

В.Т. Ерофеев, Г.Ф. Громыко, Г.М. Заяц

Сформулируем трёхобластную краевую задачу экранирования плоского импульсного электромагнитного поля экраном из пермаллоя с нелинейным уравнением для поля намагниченности.

Краевая задача. Для первичного поля $\mathbf{E}_0, \mathbf{H}_0$ в области $D_1 (z < 0)$, воздействующего на плоский экран $D (0 < z < \Delta)$ (рис.1), требуется определить электромагнитные поля $\mathbf{E}'_1, \mathbf{H}'_1; \mathbf{E}_2, \mathbf{H}_2$ в областях $D_1 (z < 0), D_2 (z > \Delta)$ и поля $\mathbf{E}, \mathbf{H}, \mathbf{M}$ в слое D , которые удовлетворяют следующим условиям [1]:
– уравнениям Максвелла:

$$\operatorname{rot} \mathbf{E}'_1 = -\mu_0 \frac{\partial}{\partial t} \mathbf{H}'_1, \quad \operatorname{rot} \mathbf{H}'_1 = \varepsilon_0 \frac{\partial}{\partial t} \mathbf{E}'_1, \quad z < 0, \quad (1)$$

$$\operatorname{rot} \mathbf{E}_2 = -\mu_0 \frac{\partial}{\partial t} \mathbf{H}_2, \quad \operatorname{rot} \mathbf{H}_2 = \varepsilon_0 \frac{\partial}{\partial t} \mathbf{E}_2, \quad z > \Delta, \quad (2)$$

$$\frac{\partial \mathbf{H}}{\partial t} = \frac{1}{\sigma \mu_0} (\Delta \mathbf{H} - \operatorname{grad} \operatorname{div} \mathbf{H}) - \dot{\gamma} \mathbf{P}, \quad \frac{\partial \mathbf{M}}{\partial t} = \dot{\gamma} \mathbf{P}, \quad 0 < z < \Delta, \quad (3)$$

\mathbf{P} – нелинейное поле;

– граничным условиям непрерывности тангенциальных составляющих электромагнитных полей $\mathbf{E}_1, \mathbf{H}_1; \mathbf{E}_2, \mathbf{H}_2$, в областях D_1, D_2 и полей $\mathbf{E}, \mathbf{H}, \mathbf{M}$ в слое D на плоскостях $\Gamma_1 (z = 0), \Gamma_2 (z = \Delta)$:

$$(\mathbf{E}_\tau - \mathbf{E}_{1\tau})|_{z=0} = 0, \quad ((\mathbf{H} + \mathbf{M})_\tau - \mathbf{H}_{1\tau})|_{z=0} = 0, \quad \mathbf{E}_1 = \mathbf{E}_0 + \mathbf{E}'_1, \quad \mathbf{H}_1 = \mathbf{H}_0 + \mathbf{H}'_1, \\ (\mathbf{E}_\tau - \mathbf{E}_{2\tau})|_{z=\Delta} = 0, \quad ((\mathbf{H} + \mathbf{M})_\tau - \mathbf{H}_{2\tau})|_{z=\Delta} = 0; \quad (4)$$

– граничным условиям для поля намагниченности на плоскостях Γ_1, Γ_2 :

$$M_x|_{z=0} = 0, \quad M_y|_{z=0} = 0, \quad (\mathbf{H} + \mathbf{M}, \mathbf{n})|_{z=0} = H_{sm} c(t'), \quad \mathbf{n} = \mathbf{e}_z, \\ M_x|_{z=\Delta} = 0, \quad M_y|_{z=\Delta} = 0, \quad (\mathbf{H} + \mathbf{M}, \mathbf{n})|_{z=\Delta} = 0, \quad (5)$$

$H_{sm}, c(t')$ определены в [1];

– условиям излучения на бесконечность в областях D_1, D_2 .

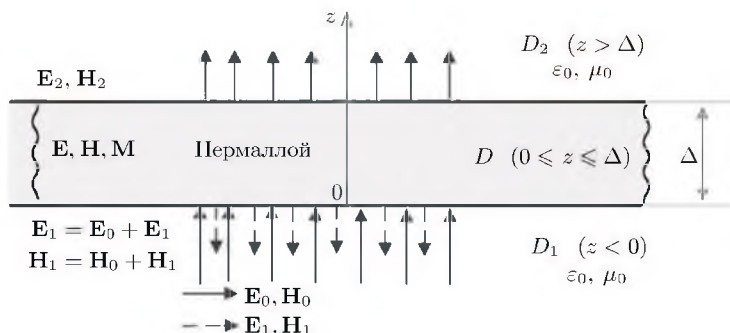


Рис. 1. Экранирование электромагнитного импульса $\mathbf{E}_0, \mathbf{H}_0$ экраном D .

В качестве первичного поля рассмотрим импульсное поле

$$\mathbf{E}_0(z, t) = -B_0 (T^{(-)}) \mathbf{e}_y, \quad \mathbf{H}_0(z, t) = \frac{1}{Z_0} B_0 (T^{(-)}) \mathbf{e}_x, \quad B_0(t') = Z_0 H_0 b(t'),$$

где H_0 – максимальное значение магнитного поля \mathbf{H}_0 , $T^{(-)} = \frac{ct - z}{c\tau}$, $\tau = \frac{1}{2} T_{\text{имп}}$,

$T_{\text{имп}}$ – длительность импульса, $t' = \frac{2t}{T_{\text{имп}}}$ – безразмерное время, c – скорость света.

В технических экспериментах используются импульсы вида (рис. 2)

$$b(t') = \begin{cases} 0.5 \sin(0.5\pi(10t' - 1)) + 0.5, & 0 \leq t' \leq 0.2, \\ \exp(-c_0(10t' - 2)^2), \quad c_0 = \ln 2/9, & 0.2 \leq t' \leq 2, \\ 0, & t' \leq 0, \quad t' \geq 2, \end{cases} \quad (6)$$

в которых $t' = 0.2$ – время фронта импульса, $t' = 0.5$ – время полуспада, $t' = 2$ – время длительности импульса.

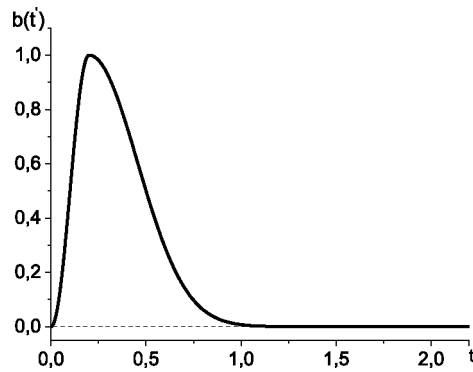


Рис. 2. Структура импульса (6) магнитного поля \mathbf{H}_0 , воздействующего на экран D .

Коэффициент эффективности экранирования, показывающий во сколько раз ослабевает электромагнитный импульс при прохождении через экран, определим формулой

$$\Theta = \frac{\max_{0 \leq t < \infty} |\mathbf{E}_0(0, t)|}{\max_{0 \leq t < \infty} |\mathbf{E}_2(\Delta, t)|}.$$

Краевая задача (1)–(5) является трёхобластной краевой задачей для областей D_1 , D_2 , D , которая для численной реализации преобразована [1] в однообластную начально-краевую задачу относительно безразмерных компонент магнитного поля u_i и компонент поля намагниченности v_i , $i = 1, 2, 3$. Для решения используется сеточный метод.

Численно исследованы характеристики электромагнитного поля в зависимости от начального импульса. Вычислен коэффициент эффективности экранирования Θ в зависимости от характеристик экрана. Например, для экрана толщиной $\Delta = 10^{-4}$ м с проводимостью $\sigma = 6 \cdot 10^3$ См/м и $H_{sm} = 10^2$ А/м, $H_0 = 10^3$ А/м получен коэффициент эффективности экранирования $\Theta = 115.0$, а с проводимостью $\sigma = 5 \cdot 10^3$ – $\Theta = 95.0$.

Литература

1. Ерофеев В. Т., Громько Г. Ф., Заяц Г. М. Численное моделирование задач экранирования импульсных электромагнитных полей экранами из пермаллоя // Дифференциальные уравнения. 2021. Т. 57. № 12. С. 1682–1697.