



## МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ЭКРАНИРОВАНИЯ ПОЛЯ МАГНИТНОГО ИМПУЛЬСА ЦИЛИНДРИЧЕСКИМ ЭКРАНОМ С МНОГОСЛОЙНЫМ ПЛЕНОЧНЫМ ПОКРЫТИЕМ

В.Т. Ерофеев<sup>1</sup>, В.Ф. Бондаренко<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Белгосуниверситет, НИИ прикладных проблем математики и информатики, Минск, Беларусь  
bsu\_erofeenko@tut.by

<sup>2</sup> Белорусская государственная академия связи, Минск, Беларусь  
valbond1949@yandex.ru

Актуальной является проблема защиты линий передачи информации от воздействия внешних электромагнитных полей. Используются цилиндрические кабели с тонкостенными покрытиями из специальных материалов [1]. Исследуются плоские экраны из биизотропных материалов при воздействии импульсных электромагнитных полей [2]. В представленной работе предложена математическая модель, описывающая

ослабление поля магнитного импульса с микросекундной длительностью фронта при прохождении через цилиндрический многослойный экран с чередующимися магнитными ( $\mu_r = 10^4$ ) и немагнитными слоями ( $\mu_r = 1$ ).

В свободном пространстве  $\mathbb{R}^3$  с электрической и магнитной постоянными  $\varepsilon_0, \mu_0$  расположен многослойный цилиндрический тонкостенный экран  $D$  ( $R_1 < \rho < R_2$ ,  $|z| < \infty$ ,  $0 \leq \varphi < 2\pi$ ) толщины  $\Delta$ ,  $(\rho, \varphi, z)$  — цилиндрические координаты. Экран состоит из  $N$  цилиндрических слоев  $\Omega_s (\rho_s < \rho < \rho_{s+1})$  с магнитными проницаемостями  $\mu_s = \mu_{rs}\mu_0$ , диэлектрическими проницаемостями  $\varepsilon_s = \varepsilon_{rs}\varepsilon_0$  и удельными электрическими проводимостями  $\gamma_s$ , где  $s = 1, \dots, N$ ,  $\rho_1 = R_1$ ,  $\rho_{N+1} = R_2$ ,  $\Delta_s = \rho_{s+1} - \rho_s$  — толщина  $s$ -го слоя,  $\Delta = \sum_{s=1}^N \Delta_s$  — толщина экрана. Обозначим:  $\Gamma_1 (\rho = R_1)$  — внутренняя поверхность экрана,  $\Gamma_2 (\rho = R_2)$  — внешняя поверхность экрана,  $D_1 (0 \leq \rho < R_1)$  — внутренняя цилиндрическая область,  $D_2 (\rho > R_2)$  — внешняя область. На экран  $D$  из области  $D_2$  воздействует импульсное магнитное поле  $\mathbf{H}_0(t) = -H_0(t)\mathbf{e}_x$  с магнитным потенциалом  $u_0 = H_0(t)\rho \cos \varphi$ ,  $H_0(t) = 0$  при  $t < 0$ .

Обозначим магнитные поля:  $\mathbf{E}_1$  — поле внутри экрана в области  $D_1$ ;  $\mathbf{E}'_2$  — отраженное поле в области  $D_2$ ;  $\mathbf{E}_2 = \mathbf{E}_0 + \mathbf{E}'_2$  — суммарное поле в области  $D_2$ . Потенциалы полей в областях  $D_1$  и  $D_2$  удовлетворяют уравнению Лапласа  $\Delta u_j = 0$ , а магнитные поля определяются формулами

$$\mathbf{H}_0 = -\text{grad } u_0 = -H_0(t)\mathbf{e}_x, \quad \mathbf{H}_1 = -\text{grad } u_1, \quad \mathbf{H}_2 = -\text{grad } u_2.$$

Электромагнитные поля  $\mathbf{E}^{(s)}$ ,  $\mathbf{H}^{(s)}$  в слоях  $\Omega_s$  экрана  $D$  подчиняются уравнениям Максвелла

$$\text{rot } \mathbf{H}^{(s)} = \varepsilon_s \frac{\partial \mathbf{E}^{(s)}}{\partial t} + \gamma_s \mathbf{E}^{(s)}, \quad \text{rot } \mathbf{E}^{(s)} = -\mu_s \frac{\partial \mathbf{H}^{(s)}}{\partial t}$$

и граничным условиям непрерывности тангенциальных составляющих полей на поверхностях раздела сред между слоями.

Краевая задача экранирования решена аналитически, численно исследован коэффициент эффективности экранирования. Показано, что при увеличении слоистости экрана эффективность экранирования увеличивается.

### Литература

1. Громько Г. Ф., Грабчиков С. С., Ерофеенко В. Т., Заяц Г. М. *Эффективность экранирования постоянных магнитных полей цилиндрическим экраном с учетом нелинейных эффектов* // Физические основы приборостроения. 2015. Т. 4, № 4. С. 30–39.
2. Ерофеенко В. Т., Бондаренко В. Ф. *Искажение узкополосных электромагнитных импульсных сигналов при прохождении через биизотропный экран* // Электроника ИНФО. 2013. № 5. С. 176–180.