

Н. В. Касаткіна¹, О. М. Тихенко², О. М. Фурсенко³

¹ Національний університет харчових технологій, Київ, Україна

² Національний авіаційний університет, Київ, Україна

³ Інститут державного управління та наукових досліджень з цивільного захисту, Київ, Україна

РОЗРАХУНКОВІ МЕТОДИ ПРОЕКТУВАННЯ ЕЛЕКТРОМАГНІТНИХ ЕКРАНІВ ІЗ ЗАДАНИМИ ЗАХИСНИМИ ВЛАСТИВОСТЯМИ

Анотація. На сьогоднішній день основна частина досліджень та прикладних розробок щодо розроблення матеріалів для екранування електромагнітних полів різних частотних діапазонів є експериментальними, особливо це стосується сучасних композиційних матеріалів. Встановлено, що актуальною є задача вироблення раціональної методології розрахункового прогнозування ефективності матеріалів для екранування електромагнітних полів. Мета роботи – надання зручного у використанні розрахункового апарату для прогнозування захисних властивостей матеріалів для екранування електромагнітних полів, що дозволить мінімізувати обсяги експериментальних робіт під час проектування захисних конструкцій. Наведено, виходячи з фундаментальних співвідношень електродинаміки суцільних середовищ, зручні у використанні залежності коефіцієнтів екранування металевих та композиційних матеріалів від їх геометричних, магнітних та електрофізичних властивостей. Обґрунтовано співвідношення щодо визначення внеску відбиття електромагнітних хвиль у загальний коефіцієнт екранування. Це дозволяє розрахувати товщину електромагнітного екрана на принципах розумної достатності. Показано, що для ефективного використання розрахункових методів оцінювання захисних властивостей композиційних матеріалів для екранування магнітних та електромагнітних полів потрібна наявність надійних експериментальних даних щодо магнітних та електрофізичних властивостей найбільш поширених за складом композиційних матеріалів.

Ключові слова: електромагнітне поле, екранування, композиційні матеріали, коефіцієнт екранування, електромагнітний екран.

Вступ

Переважає більшість досліджень та прикладних розробок щодо розроблення матеріалів для екранування електромагнітних полів різних частотних діапазонів є експериментальними. Особливо це стосується сучасних композиційних матеріалів. Значною мірою це обумовлене відсутністю довідкових даних щодо магнітних та електрофізичних властивостей таких матеріалів, що є обов'язковим для використання розрахункових методів. Більшість аналітичних методик стосуються металевих захисних матеріалів для яких існують табличні дані для розрахунків. Але наявність експериментальних даних щодо коефіцієнтів екранування композиційних матеріалів для різних частот та частотних смуг електромагнітних полів дозволяє адаптувати існуючий математичний апарат до сучасних задач оцінювання та прогнозування захисних властивостей композитів різного складу та технологій виготовлення.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Ґрунтовні довідкові й наукові джерела щодо розрахункових методів визначення ефективності магнітних та електромагнітних екранів [1, 2] розглядають виключно металеві екрани. До того ж вони стосуються саме екранів різної форми, не екрануючих матеріалів. У роботі [3] надано придатні для використання фахівцями з цивільної безпеки співвідношення для визначення коефіцієнтів екранування, але вони також розглядають металеві матеріали. В останні роки набули розвитку чисельні методи визначення потрібних параметрів захисних матеріалів [4, 5]. Ці роботи стосуються тільки тонких оболонок у високочастотних електромагнітних полях. У дослідженні [6] визначено модельними методами та

числовим експериментом ефективність шару магнітної рідини. Практичного застосування це не має через неможливість виробити матеріал з чистої рідини. Але властивості магнітної рідини (достатня магнітна проникність, висока дисперсність екрануючих частинок) роблять її перспективним матеріалом для вироблення екрануючого матеріалу, що підтверджено у [7]. У цій роботі на основі експериментальних даних щодо коефіцієнтів екранування магнітного поля промислової частоти розраховано зміну ефективної магнітної проникності матеріалу, яка є головним показником щодо захисних властивостей матеріалу.

Таким чином, актуальною є задача вироблення найбільш раціональної методології розрахункового прогнозування ефективності матеріалів для екранування електромагнітних полів.

Постановка завдання. Мета роботи – надання зручного у використанні розрахункового апарату для прогнозування захисних властивостей матеріалів для екранування електромагнітних полів, що дозволить мінімізувати обсяги експериментальних робіт під час проектування захисних конструкцій.

Виклад основного матеріалу

Відомо, що зміна напруженостей магнітного та електричного полів у тілі металевого матеріалу відбувається за експоненціальним законом:

$$H_1 = H_0^{-\lambda d},$$

$$E_1 = E_0^{-\lambda d},$$

де H_0 , E_0 – напруженості магнітного та електромагнітного полів у повітрі; H_1 , E_1 – напруженості полів

у товщі металу; d – товщина матеріалу; λ – коефіцієнт згасання поля.

У свою чергу

$$\lambda = \sqrt{\pi f \mu \sigma},$$

де f – частота екранованого поля; μ – абсолютна магнітна проникність матеріалу; σ – питома проникність матеріалу.

Як видно, для визначення зміни напруженостей магнітного та електричного полів необхідні дані про магнітні та електричні властивості матеріалів. Для переважної більшості металевих матеріалів ці дані є табличними й представлені у довідкових джерелах. Наведені співвідношення можливо застосовувати для композиційних матеріалів, які не є діелектриками.

На сьогоднішній день для багатьох композиційних матеріалів такі дані отримані експериментально. Наприклад у роботі [8] наведено зміну питомої провідності металополімерного композиту на основі латексу та залізорудного пилу: за зміни концентрації такого пилу у полімерній матриці з 10 до 17 % питома провідність змінюється з $5 \cdot 10^{-7}$ См/м до 6 См/м. У дослідженні [9] наведені дані про зміну діелектричної проникності металополімерів на основі залізорудного пилу з таким же вмістом наповнювача у межах 12–100. Ці дані надають змогу отримати усі необхідні для оцінювання розрахунків кількісні значення для хвильового поля:

$$\varepsilon(\omega) = i \frac{4\pi\sigma}{\omega}, \quad (1)$$

де ω – колова частота електромагнітного поля за $\mu=1$, $n^2 - \psi + 2in\psi = \varepsilon' + i\varepsilon''$, де n – коефіцієнт заломлення електромагнітної хвилі у матеріалі; ψ – коефіцієнт поглинання середовища (швидкість затухання хвилі при її розповсюдженні у матеріалі), ε' – дійсна, а ε'' – уявна складові комплексної діелектричної проникності.

Для провідних матеріалів, у області частот, що відповідають умові (1), уявна складова ε велика порівняно з дійсною і має значення

$$\varepsilon'' = \frac{4\pi\delta}{\omega},$$

Нехтуючи ε' порівняно з ε'' , у відповідності до відомих співвідношень:

$$n = \sqrt{\frac{\varepsilon' + \sqrt{\varepsilon'^2 + \varepsilon''^2}}{2}}, \quad \psi = \sqrt{\frac{-\varepsilon' + \sqrt{\varepsilon'^2 + \varepsilon''^2}}{2}},$$

маємо $n = \psi = \sqrt{\frac{2\pi\sigma}{\omega}}$.

При цьому виконується фундаментальне співвідношення $n = \sqrt{\varepsilon\mu}$.

При виборі товщини екрана необхідно брати до уваги еквівалентну глибину проникнення δ високо-частотного поля у товщу матеріалу екрана:

$$\delta = \sqrt{\frac{1}{\pi f \mu \sigma}}.$$

Це глибина, на якій поле знижується у $e = 2,7$ рази (8,7 дБ).

Фактична глибина проникнення залежить від потрібного коефіцієнта екранування. За зниження рівня поля у 100 разів фактична глибина складає $4,6\delta$, у 10 разів – $2,3\delta$.

У багатьох випадках необхідно з'ясувати внесок відбиття у загальний коефіцієнт екранування. Ефективність екранування (коефіцієнт екранування) за рахунок відбиття електромагнітних хвиль на межі розділу повітря – екран обумовлена відмінністю хвильового опору повітря Z_n й характеристичного опору матеріалу екрана Z_e . Ефективність екранування через відбиття електромагнітних хвиль:

$$K_b = 20 \lg \frac{Z_n}{4Z_e},$$

де Z_n (у ближній зоні відносно електричного та магнітного полів) визначається зі співвідношення:

$$Z_n = \sqrt{\frac{i\omega\mu}{\sigma + i\omega\varepsilon}},$$

де ε – абсолютна діелектрична проникність повітря.

Для однорідних провідних матеріалів $\delta > i\omega\varepsilon$, тому

$$Z_e = \sqrt{\frac{2\pi f \mu}{\sigma}}.$$

Наведене свідчить, що коефіцієнти відбиття не залежать від товщини екрана.

Ефективність екранування магнітного поля та магнітної складової електромагнітного поля залежить від ефективної магнітної проникності екрануючого матеріалу. Для композиційних матеріалів магнітну проникність можливо визначити експериментальними методами. У роботах [7, 9] надані розрахунки щодо визначення коефіцієнта екранування квазістаціонарного магнітного поля циліндричним та сферичним екранами відомих радіусів та товщини стінок:

$$K_{\psi} = \frac{\mu_{eff} (b^2 - a^2)}{4b^2}; \quad (2)$$

$$K_{\varphi} = \frac{(2\mu_{eff} + 1)(\mu_{eff} - 2) - 2(\mu_{eff} - 1)^2 a^3/b^3}{9\mu_{eff}}, \quad (3)$$

де a і b відповідно внутрішні та зовнішні радіуси екранів.

Експериментально визначаючи коефіцієнти екранування, можна розрахувати ефективну магнітну проникність матеріалу.

При визначенні необхідної та достатньої товщини електромагнітного екрана важливим показником є погонне ослаблення поля захисним матеріалом, яке можна визначити зі співвідношення:

$$\tau = \left[\tau_1 - 10 \lg \left(\frac{1}{1 - K_b} \right) \right] d,$$

де τ – погонне ослаблення, дБ/мм; τ_1 – ослаблення електромагнітної хвилі, дБ; K_b – коефіцієнт відбиття електромагнітних хвиль від матеріалу на відповідній частоті; d – товщина зразка, мм.

При визначенні ефективності перфорованих екранів виникають дві основні задачі: розрахунок частоти зрізу та ефективності поглинання частки випромінювання частот, нижчих за частоту зрізу. Суперечності у даному випадку немає через обов'язкову часткову проникність екрана внаслідок дифракційних явищ. Взагалі такі розрахунки досить складні, але існують спрощені напівемпіричні співвідношення, цілком прийнятні для вирішення прикладних задач.

Так частота зрізу для круглого отвору визначається зі співвідношення:

$$f_3 = \frac{1,75 \cdot 10^5}{d}, \text{ МГц}$$

де d – діаметр отвору, мм.

Відповідно втрати енергії випромінювання на поглинання визначаються як:

$$K_n = 32 \frac{a}{d}, \text{ дБ}$$

де a – товщина стінки екрана, мм.

Наведене співвідношення впливає з теорії хвилеводів. При цьому величину a можна вважати довжиною хвилеводу.

Розглянуті формули визначалися для використання у радіотехніці.

Як зазначено у [10] вони розглядають частоту зрізу як частоту до якої хвилевод послаблює певною мірою інтенсивність електромагнітних хвиль, що є не зовсім прийнятним з точки зору охорони праці [11].

Для визначення ступеня захисту необхідно знати частоту випромінювань нижче якої отвори можна вважати повністю непроникними для випромінювання. Хоча у будь-якому випадку за наявності багатьох отворів у конструкції вони є поза межними хвилеводами.

Тому для використання такого ефекту у галузі електромагнітної безпеки доцільно використовувати співвідношення:

$$f_3 = \frac{1,8 \cdot 10^4}{d},$$

де f_3 – частота зрізу, МГц; d – діаметр отвору, мм.

Розрахунки з використанням цього співвідношення показали, що отвори стають непроникними для випромінювання за їх діаметрів або довжин хвиль (для прямокутного отвору), які дорівнюють приблизно 0,1 довжини падаючої електромагнітної хвилі.

Це добре узгоджується з експериментальними дослідженнями і має практичне значення.

Значення коефіцієнта екранування можна визначити зі співвідношення довжини падаючої хвилі і максимальної довжини отвору:

$$K_e = 20 \lg \left(\frac{\lambda}{2d} \right).$$

Слід зауважити, що визначення K_e виходячи з діаметра і довжини хвилевода використовується тільки для частот нижчих за частоту зрізу.

Найбільш перспективним напрямом робіт зі зниження відбивальних властивостей електромагнітних екранів, на нашу думку може бути, оптимізація співвідношень магнітних та електричних параметрів.

Хвильовий опір непровідного матеріалу Z визначається як:

$$Z = \sqrt{\frac{\mu}{\varepsilon}},$$

де μ – магнітна проникність матеріалу; ε – діелектрична проникність.

Обираючи μ та ε таким чином, що Z буде дорівнювати опору вільного простору ($Z_0 = 377$ Ом), ми забезпечимо проходження границі розділу «вільний простір - екран» без відбиття. При цьому металеві включення у матриці повинні забезпечити максимальне поглинання електромагнітної енергії, що визначає загальний коефіцієнт екранування.

Однак у реальних виробничих умовах такі процеси складніші. Відомо, що для кутів падіння хвиль, відмінних від нормального, коефіцієнт відбиття суттєво змінюється. Розглянемо частоту випромінювання разом з діелектричною проникністю і провідністю матеріалу, тобто зведену частоту Ω :

$$\Omega = \frac{f \cdot \varepsilon}{\sigma},$$

де f – частота випромінювання; ε – діелектрична проникність матеріалу; σ – провідність матеріалу.

За різних значень Z виявляється, що мінімальний коефіцієнт відбиття спостерігається за $Z=0,5$. При цьому прийнятні коефіцієнти відбиття (0,2 і менше) спостерігаються для $Z=0,5$ і $\Omega > 1$.

У загальному випадку, за великої товщини екрана необхідно враховувати фактор багатократного відбиття на границях розділу середовищ. Втрати на перевідбиття визначаються показником K_{nb} . У більшості випадків цим показником нехтують, але для більш точного визначення загального коефіцієнта екранування він визначається зі співвідношення:

$$K_{nb} = 20 \lg \left(1 - e^{-2l\sqrt{\pi f \mu \sigma}} e^{-j2l\sqrt{\pi f \mu \sigma}} \right),$$

де l – товщина екрана, м; f – частота, Гц; μ – абсолютна магнітна проникність, Гн/м; σ – провідність матеріалу екрана, См/м.

Як видно, в усіх випадках, навіть для оцінювання захисних властивостей матеріалів необхідно мати експериментальні дані щодо магнітних та електрофізичних характеристик матеріалів.

З використанням (2), (3) та програмних засобів Comsol отримані апроксимації щодо ефективної магнітної проникності композиційних металополімерних матеріалів з рівномірним розподілом ферромагнітних частинок у полімерній матриці. Але для більшості композиційних матеріалів такі дані поодинокі і не дозволяють застосовувати їх для матеріалів іншого складу. Тому для можливості визначення потрібних параметрів матеріалів розрахунковими методами доцільно провести серію експериментальних досліджень щодо типових компонентів, що дозволить створити базу даних необхідних для розрахунків кількісних значень щодо складу та магнітних й електрофізичних параметрів захисних матеріалів.

Висновки

1. Виходячи з фундаментальних співвідношень електродинаміки суцільних середовищ, надано

зручні у використанні залежності коефіцієнтів екранування металевих та композиційних матеріалів від їх геометричних, магнітних та електрофізичних властивостей.

2. Надано співвідношення щодо визначення внеску відбиття електромагнітних хвиль у загальний коефіцієнт екранування та визначення поганого ослаблення електромагнітного поля у товщі екрана. Це дозволяє розрахувати товщину електромагнітного екрана на принципах розумної достатності.

3. Показано, що для ефективного використання розрахункових методів оцінювання захисних властивостей композиційних матеріалів для екранування магнітних та електромагнітних полів потрібна наявність надійних експериментальних даних щодо магнітних та електрофізичних властивостей найбільш поширених за складом композитів.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Аполлонский С. М. Справочник по расчёту электромагнитных экранов. 1998. 224 с.
2. Резинкина М. М. Использование численных расчётов для выбора средств экранирования от действия магнитных полей. *Журнал технической физики*. 2007. Т. 77. № 11. С. 17–24.
3. Назаренко М. В., Гончарова О. М., Панова О. В. Розрахункові методи визначення захисних властивостей електромагнітних екранів. *Проблеми охорони праці в Україні*. 2012. Вип. 23. С. 84–89.
4. Громыко Г. Ф., Ерофеев В. Т., Заяц Г. М. Численное исследование структуры магнитного поля в цилиндрическом пленочном экране. *Информатика*. 2015. № 2. С. 5–18.
5. Lavrova O., Polevikov V., Tobiska L. Modeling and simulation of magnetic particles diffusion in a ferrofluid layer. *Magneto hydrodynamics*. 2016. Vol. 52. № 4. P. 417–430.
6. Полевиков В. К., Ерофеев В. Т. Численное моделирование взаимодействия магнитного поля с цилиндрическим слоем магнитной жидкости. *Информатика*. 2017. № 2(54). С. 5–14.
7. Glyva V.A., Podoltsev A.D., Bolibruch B.V., Radionov A.V. A Thin Electromagnetic Shield of a Composite Structure Made On the Basis of a Magnetic Fluid. *Tekhnichna elektrodynamika*. 2018. № 4. P. 14–18. DOI: <https://doi.org/10.15407/techned2018.04.014>
8. Glyva V., Lyashok J., Matvieieva I., Frolov V., Levchenko L., Tykhenko O., Panova O., Khodakovskyy O., Khalmuradov B., Nikolaiev K. Development and investigation of protective properties of the electromagnetic and soundproofing screen. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. 2018. Iss. 6/5 (96). P. 54–61. DOI: <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2018.150778>
9. Glyva V., Podkopaev S., L. Levchenko, N. Karaieva, K. Nikolaiev, O. Tykhenko, O. Khodakovskyy, B. Khalmuradov. Design and study of protective properties of electromagnetic screens based on iron ore dust. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. 2018, Iss. 1/5 (91). PP. 10–17. DOI: <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2018.123622>
10. Демский Д. В. Метод расчета эффективности экранирования для неоднородных электромагнитных экранов: дис. ... канд. техн. наук: 05.12.14 / Демский Дмитрий Викторович. М., 2014. 114 с.
11. Коваленко В. В., Глива В. А., Тихенко О. М., Лук'яненко С. О. Розрахункові методи визначення захисних властивостей електромагнітних екранів у дальній зоні електромагнітного поля. Системи обробки інформації. 2016. № 7 (144). С. 55–57.

Received (Надійшла) 12.03.2020

Accepted for publication (Прийнята до друку) 29.04.2020

Computational methods of design of electromagnetic screens with predefined protective properties

N. Kasatkina, O. Tykhenko, O. Fursenko

Abstract. To date, most of the research and design works on the development of materials for shielding electromagnetic fields of different frequency ranges is based on experiments, and it is especially true for modern composites. It is established that there is a need to develop rational methodology for the calculation of the efficiency of materials for shielding electromagnetic fields. The purpose of this work is to provide an easy-to-use calculator for predicting the protective properties of materials for shielding electromagnetic fields, which will minimize the amount of experimental work during the design of protective structures. Based on the fundamental relationships between the electrodynamics of continuous media, the usable dependences of the shielding coefficients of metallic and composite materials on their geometric, magnetic, and electrophysical properties are provided. The equation for determining the contribution of the electromagnetic waves reflection to the total shielding factor is substantiated. This makes it possible to calculate the thickness of the electromagnetic screen based on the principles of reasonable sufficiency. It is shown that the effective use of the computational methods for evaluating the protective properties of composite materials for shielding magnetic and electromagnetic fields requires reliable experimental data on the magnetic and electrophysical properties of the most common composite materials.

Keywords: electromagnetic field, shielding, composite materials, shielding factor, electromagnetic screen.