

Я. І. Бірук, А. В. Климчук

Київський національний університет будівництва і архітектури, Київ, Україна

ДОСЛІДЖЕННЯ УМОВ МАКСИМАЛЬНОЇ ЕФЕКТИВНОСТІ ПЕРФОРОВАНИХ ЕЛЕКТРОМАГНІТНИХ ЕКРАНІВ

Анотація. Визначені основні співвідношення для розрахунку ефективності екранування електромагнітних полів у дальній зоні металевими матеріалами і конструкціями з отворами круглої та прямокутної форми. Враховане відбиття електромагнітних хвиль від перфорованої поверхні. Показано, що на отворах з кінцевою товщиною стінки можливі виникнення частотних смуг прозорості конструкції внаслідок резонансних явищ. Це випливає з теорії хвильоводів. Товщину стінки екрана вважати хвильоводом такої довжини. Проведено дослідження залежності ефективності екранування від частоти екранованого електромагнітного поля. Встановлено наявність частотних смуг прозорості екрана на частотах, нижчих за частоти зрізу для даних геометричних характеристик отворів. Отримані співвідношення для розрахунку внеску у екранування суцільних ділянок перфорованої конструкції. Співвідношення враховують електрофізичні властивості матеріалу екрана, частоту екранованого електромагнітного поля та глибину проникнення у матеріал. Враховуючи емпіричний характер цих співвідношень і можливі додаткові чинники можливих змін екрануючих властивостей (вплив регулярно розташованих вентиляційних отворів) доцільне тестування спроектованих конструкцій у реальних умовах експлуатації. Перспективним напрямом досліджень є удосконалення форми екранів шляхом подовження глибини отворів.

Ключові слова: екранування, перфорація, хвильовод, електрофізичні властивості.

Вступ

На сьогодні найбільш поширеними є металеві і композиційні матеріали для екранування електромагнітних полів та випромінювань. При цьому застосування суцільних металевих екранів обмежене через високі коефіцієнти відбиття електромагнітних хвиль. Усі сучасні екрануючі матеріали мають різні ступені неоднорідності. Композиційні матеріали, принаймні двокомпонентні – діелектрична матриця з екрануючим електропровідним або магнітним наповнювачем. Металеві структури, як правило, сітчасті і розраховані на екранування електромагнітного випромінювання певної частоти та амплітуди. Але у реальних умовах експлуатації доцільно використовувати екрануючі поверхні з перфорацією різної форми та щільності розташування. Наприклад, для феромагнітних матеріалів це може забезпечити високі коефіцієнти екранування магнітного поля наднизької частоти і знижує коефіцієнти відбиття електромагнітних випромінювань ультрависоких і вищих частот. Крім того, у багатьох випадках отвори потрібні для прокладання комунікацій, охолодження обладнання тощо. Тому доцільно дослідити ефективність екранування перфорованих структур і визначити закономірності змін коефіцієнтів екранування у залежності від частоти випромінювання.

Огляд літературних джерел. Розробленню неоднорідних матеріалів і конструкцій приділяється багато уваги. В основному це композиційні матеріали на основі мікро- та наноструктур [1]. Недоліками таких матеріалів є висока вартість та схильність до деградації в процесі експлуатації [2]. Деградація полімерних матриць можлива не тільки внаслідок внутрішніх процесів, а й під впливом високих температур у разі екранування промислового обладнання. Це стосується і облицювання зовнішніх поверхонь будівель [3].

У дослідженні [4] показано можливість екранування магнітної складової електромагнітного поля промислової частоти сітчастими конструкціями. Але така конструкція повинна мати великі розміри і бути надійно заземленою. У роботі [4] узагальнено існуючі підходи до застосування металевих екранів усіх конструкцій та визначено недоліки. Зокрема показано, що сітчасті структури фактично монохромні. А широка смуга поглинання електромагнітних випромінювань досягається за рахунок ускладнення конструкції. Методологія проектування неоднорідних електромагнітних екранів показана у [5]. Але частина результатів немає достатнього обґрунтування. Також відсутнє експериментальне підтвердження теоретичних даних. У роботі [6] показано, що заходи з екранування електромагнітних полів і випромінювань необхідно здійснювати на основі електромагнітного моніторингу, що обумовлено змінами амплітудно-частотних характеристик цього фактора у просторі у часі. Дослідження [7] свідчить, що ефективність екранування перфорованої металеві структури можна розрахувати з прийнятною похибкою, але не наведено верифікації отриманих результатів. Дослідження щодо неоднорідності великих розмірів, арматури й діелектричних каркасів будівельних конструкцій, [8] свідчить що, для достатньої ефективності такі структури повинні мати велику товщину що не завжди прийнятно. У статті [9] наведено результати теоретичних досліджень щодо екранування електромагнітних випромінювань неоднорідними металевими панелями. Зокрема показано, що зручні у застосуванні співвідношення строго випливають з теорії хвильоводів. Але відомо, що у хвильоводах можливе виникнення резонансних явищ, що вимагає експериментальних досліджень щодо частотної залежності коефіцієнтів екранування. Наведене обумовлює актуальність дослідження.

Викладення основного матеріалу

Врахування наявності отворів у екрануючій конструкції доцільне для частот, нижчих за частоту «зрізу», тобто для електромагнітних хвиль, для яких екран непроникний. При цьому розглядається дальня зона електромагнітного поля. Частоти зрізу строго розраховуються, виходячи з теорії хвильоводів [9]. Для прямокутного отвору $f_3 = 1,5 \cdot 10^8 / b$ Гц, де b – більший розмір отвору. Для отвору круглої форми $f_3 = 1,75 \cdot 10^8 / D$ Гц, де D – діаметр отвору.

При цьому втрати на поглинання для частот, нижчих за f_3 приблизно дорівнюють:

Для прямокутного отвору

$$A = 27 \frac{d}{b}, \text{ дБ},$$

де d – товщина стінки екрануючої конструкції;

Для круглого отвору

$$A = 32 \frac{d}{D}, \text{ дБ}.$$

Обов'язковим є врахування відбиття електромагнітних хвиль R .

Для круглого отвору:

$$R = 102 - 20 \lg(Df), \text{ дБ},$$

Для прямокутного отвору:

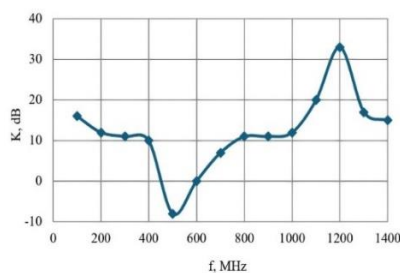
$$R = 100 - 20 \lg(bf) + 20 \lg\left(1 + \ln \frac{b}{a}\right), \text{ дБ},$$

де b, a – ширина та висота прямокутного отвору.

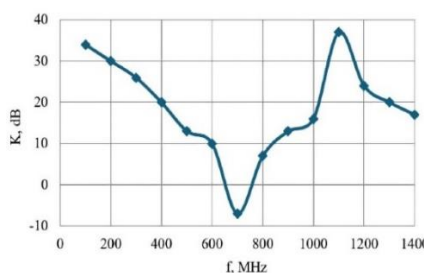
Але, як показано у [10], проходженню електромагнітної хвилі крізь хвильовод притаманні резонансні явища. Це обумовлює те, що хвильовод стає понадмежним за умови $m\lambda / 2a > \sqrt{\epsilon}$, де ϵ – діелектрична проникність середовища, a – висота хвильовода, λ – довжина електромагнітної хвилі, m – натуральне число. Саме різним значенням m відповідають коливання інтенсивності випромінювання.

Для визначення можливих вікон прозорості електромагнітного екрана з отвором на певних частотах були проведені випробування кількох конструкцій з отворами.

Досліджувалися замкнені металеві конструкції, що виключало проникнення електромагнітного поля поза екраном. На рис. 1, а наведено залежність коефіцієнта екранування конструкції зі щілиною розміром 15×5 см від частоти екранованого поля.



а – 15×5 см



б – 10×1 см

Рис. 1. Залежність коефіцієнта екранування металеві конструкції з отвором розміром від частоти екранованого електромагнітного поля

Як видно з наведених даних, конструкція є радіопрозорою на частоті приблизно 400–600 МГц.

Аналогічні дослідження проведені для отвору розміром 10×1 см (рис. 1, б).

На рис. 3 наведено результати випробувань конструкції з отвором розмірами 20×3 см.

Аналізуючи отримані дані, що за різних розмірів отворів спостерігаються частотні смуги прозорості конструкції для електромагнітного поля. Це, очевидно пов'язане з резонансними явищами. Визначити строгу залежність смуги пропускання електромагнітних хвиль у залежності від розмірів отвору складно й не доцільно. Значною мірою цей показник залежить від товщини матеріалу, яку можна вважати довжиною хвильовода. Найбільш раціональним є попередні випробування конструкцій з урахуванням амплітудно-частотних характеристик електромагнітного випромінювання, яке потребує екранування. Ефективність екранування електромагнітного поля може знижуватися внаслідок проникнення поля безпосередньо крізь екрануючий матеріал. При цьому цей показник істотно залежить від частоти поля. Підвищення частоти

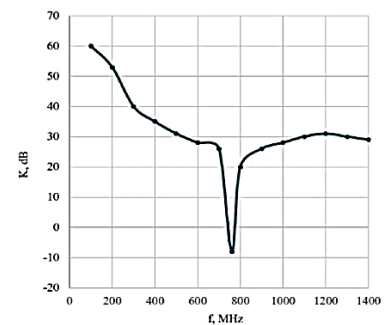


Рис. 2. Результати випробувань конструкції з отвором розмірами 20×3 см

знижує проникність поля у провідний матеріал, тобто зменшується товщина скін-шару.

Для регулярно розташованих отворів поправочний коефіцієнт на проникнення поля через матеріал між отворами можна визначити з емпіричного співвідношення, наведено у [11]:

$$K = -20 \lg\left(1 + 35p^{-2,3}\right), \text{ дБ}; \quad p = \frac{l}{\delta},$$

де l – довжина матеріалу між отворами, δ – товщина скін-шару.

Товщина скін-шару (глибина проникнення поля у матеріал) визначається співвідношенням:

$$\delta = c / (2\pi\sqrt{\sigma f}),$$

де c – швидкість розповсюдження електромагнітних хвиль, σ – питома провідність матеріалу екрана.

Таким чином, поправочний коефіцієнт визначається як:

$$K = -20 \lg\left(1 + 35(2\pi l\sqrt{\sigma f}/c)^{-2,3}\right), \text{ дБ}.$$

Наведені співвідношення є емпіричними, тому їх застосування доцільне для попереднього оцінювання ефективності екранування з урахуванням амплітудно-частотних характеристик екранованого поля. Слід врахувати, що вони виконуються тільки для дальньої зони електромагнітного поля.

У процесі проектування захисної конструкції можуть виникнути додаткові проблеми, наприклад, вплив великої кількості регулярно розташованих отворів для забезпечення вентиляції та охолодження обладнання. Тому для забезпечення нормативних умов перебування людей та забезпечення стабільної роботи електронного обладнання необхідне випробування дослідного зразка екрануючого матеріалу або конструкції у реальних умовах експлуатації. Враховуючи, що для перфорованих захисних конструкцій можливо застосувати теорію хвилеводів, перспективним напрямом досліджень є визначення можливості розроблення конструкцій з певною формою отворів, яка збільшить довжину хвилевода. Такі конструкції сприятимуть підвищенню ефективності екранування без зниження сумарного перерізу отворів.

Висновки

1. Визначено співвідношення для розрахунків ефективності екранування електромагнітних полів у хвильовій зоні з використанням металевих матеріалів отворами. Показано, що за різних геометричних конфігурацій отворів можливі наявності смуг прозорості екрануючих конструкцій для електромагнітних випромінювань.

2. Проведені дослідження частотної залежності ефективності екранування для отворів різної довжини та ширини. Встановлено немонотонність таких залежностей з наявністю зон прозорості, що обумовлене резонансними явищами у отворах матеріалів кінцевої товщини.

3. Наведено співвідношення для розрахунків внеску поглинання електромагнітної енергії металевим матеріалом з урахуванням його електрофізичних властивостей. Наголошено, що враховуючи емпіричність співвідношень, доцільне випробування спроектованих матеріалів і конструкцій у реальних умовах експлуатації.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

- Kolcunová I., Zbojovský J., Pavlík M., Bucko S., Labun J., Hegedus M., Vavra M., Cimbala R., Kurimský J., Dolník B., Petráš J., Džmura J. Shielding Effectiveness of Electromagnetic Field by Specially Developed Shielding Coating. *Acta Physica Polonica*, 2020, Vol. 137 Is. 5, p. 711-713. <http://doi.org/10.12693/APhysPolA.137.711>
- Caramitu A.R., Ion I., Bors A.M., J. Pinte, Caramitu A.-M.D. Preparation and Spectroscopic Characterization of Some Hybrid Composites with Electromagnetic Shielding Properties Exposed to Different Degradation Factors. *MATERIALE PLASTICE*. 2023. 59. 82-94 <https://doi.org/10.37358/MP.22.4.5627>
- Glyva V., Levchenko L., Panova O., Tykhenko O., Radomska M. The composite facing material for electromagnetic fields shielding. *Innovative Technology in Architecture and Design (ITAD 2020): IOP Conf. Series*. 2020. Vol. 907.
- Спосіб виготовлення композиційного матеріалу для екранування електромагнітного поля. Пат. 144972, Україна МПК G12B 17/00 (2020.01); (2006.01) G21F 1/02. № 2020 03227; заявл. 28.05.2020; опубл. 10.11.2020, Бюл. № 21. 4 с.
- Глива В.А., Тихенко О.М., Ходаковський О.В. Методологія проектування неоднорідних електромагнітних екранів. Системи управління, навігації та зв'язку. Полтава, 2019. Вип. 4(56). С. 122–125.
- Касаткіна Н.В., Левченко Л.О., Панова О.В., Тихенко О.М., Ченчевой В.В. Оптимізація параметрів екранування електромагнітних полів різномірних джерел у виробничих будівлях. Вісті ДГП. 2020. Вип. № 1(46). С. 181–188.
- Касаткіна Н.В., Тихенко О.М., Фурсенко О.М. Розрахункові методи проектування електромагнітних екранів із заданими захисними властивостями. Системи управління, навігації та зв'язку. 2020. Вип. 2(620). С. 118–121.
- Burdeina, N., Levchenko, L. and oth.. (2024). Applying heterogeneous building materials for the protection of people against electromagnetic radiation. *EEJET*, 5(10 (131)), 45–52. <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2024.313629>
- Biruk, Y., & Klymchuk, A. (2024). Засади проектування неоднорідних електромагнітних екранів. Системи управління, навігації та зв'язку. *Збірник наукових праць*, 3(77), 199–202. <https://doi.org/https://doi.org/10.26906/SUNZ.2024.3.199>
- Пенкин Ю.М., Бердник С.Л., Катрич В.А., Нестеренко М.В., Пшеничная С.В. Управление энергетическими характеристиками волноводных сочленений с диэлектрическим включением. *Прикладная радиоэлектроника*, 2017, Т. 6, № 1,2, с. 51-60.
- Демковський Д.В., Фомин И.А., Марченко М.В. Автоматизация расчёта эффективности экранирования» *Технологии ЭМС*, №1, 2013, №1, с. 44-54.

Received (Надійшла) 28.11.2024

Accepted for publication (Прийнята до друку) 26.02.2025

Study of conditions for maximum efficiency of perforated electromagnetic screens

Y. Biruk, A. Klymchuk

Abstract. The basic relations for calculating the efficiency of shielding electromagnetic fields in the far zone by metal materials and structures with round and rectangular holes are determined. The reflection of electromagnetic waves from the perforated surface is taken into account. It is shown that at the holes with a finite wall thickness, frequency bands of transparency of the structure may occur due to resonant phenomena. This follows from the theory of waveguides. The thickness of the screen wall is considered to be a waveguide of this length. The dependence of the shielding efficiency on the frequency of the shielded electromagnetic field is investigated. The presence of frequency bands of screen transparency at frequencies lower than the cutoff frequencies for these geometrical openings is established. The relations for calculating the contribution to the shielding of continuous sections of a perforated structure are obtained. The relations take into account the electrophysical properties of the shield material, the frequency of the shielded electromagnetic field, and the depth of penetration into the material. Taking into account the empirical nature of these relations and possible additional factors of possible changes in shielding properties (the influence of regularly spaced ventilation holes), it is advisable to test the designed structures in real operating conditions. A promising area of research is to improve the shape of the screens by lengthening the depth of the holes.

Keywords: shielding, perforation, waveguide, electrophysical properties.