

Я. І. Бірук, А. В. Климчук

Київський національний університет будівництва і архітектури, Київ, Україна

ЗАСАДИ ПРОЄКТУВАННЯ НЕОДНОРІДНИХ ЕЛЕКТРОМАГНІТНИХ ЕКРАНІВ

Анотація. Розглянуто два класи неоднорідних електромагнітних екранів – екранів на основі регулярних екрануючих елементів та матеріалів з хаотичним розташуванням металомістких частинок. Показано, що точне прогнозування захисних властивостей композиційних матеріалів з хаотичним розташуванням включень неможливе через емпіричний характер відомих співвідношень Лорентца, Максвелла-Гарнета, Оделевського. Запропоновано розроблення будівельних та оздоблювальних матеріалів з регулярним розташуванням захисного матеріалу у будівельних виробках. Головною проблемою надання будівельним і оздоблювальним матеріалам захисних властивостей є зниження основних параметрів цих матеріалів (пружних модулів) через додавання екрануючої субстанції. Для уникнення такого ефекту запропоновано використання технологічних порожнин у будівельних матеріалах. З цієї метою можливо використовувати сажу теплових електростанцій та залізородний концентрат. Теоретичні міркування свідчать, що додавання у вихідну суміш піно- та газобетону екрануючої добавки великої дисперсності у процесі піноутворення сприяє розподілу частинок добавки на внутрішніх поверхнях порожнин. Це значно підвищує захисні властивості матеріалів без зниження пружних модулів виробів. Надано розрахунковий апарат щодо ефективності екранування електромагнітних випромінювань сітчастими металевими структурами. Для надання конструкції широкосмуговості запропоновано застосування двох паралельних структур, налаштованих на максимальну та мінімальну довжину хвиль випромінювання, які визначаються експериментально. Показано, що застосування розв'язку хвильового рівняння для вектора Герца дозволяє отримати прості і зручні співвідношення для визначення мінімальних частот випромінювань, які проникають крізь отвори (частоти зрізу). Це дозволило визначити такі параметри для прямокутних та круглих отворів. Отримано співвідношення для розрахунку ефективності захисту за рахунок поглинання електромагнітної енергії та відбиття електромагнітних хвиль. При цьому показана можливість врахування площі і кількості отворів одиницю площі екрана. Виконані розрахунки стосуються суто геометричних характеристик захисних конструкцій з отворами. Перспективним напрямом досліджень є визначення захисних властивостей неоднорідних електромагнітних екранів з урахуванням електрофізичних та магнітних властивостей матеріалів, з яких конструкції виготовлені.

Ключові слова: електромагнітний екран, регулярна структура, будівельні матеріали, частота зрізу вектор Герца.

Вступ

Екранування є найбільш ефективним методом зниження рівнів електричних, магнітних та електромагнітних полів усіх частотних діапазонів. Традиційними матеріалами для виготовлення електромагнітних екранів є метали і сплави. Але вони мають суттєві недоліки і не завжди задовольняють сучасні вимоги. Головними недоліками металевих матеріалів є неможливість керування захисними властивостями та великі коефіцієнти відбиття електромагнітних хвиль. Цих недоліків позбавлені композиційні матеріали, у яких керування захисними властивостями здійснюється зміною вмісту металевих або металомісних компонентів у діелектричній матриці. Але проектування таких матеріалів пов'язане з низкою проблем. Головними показниками, які обумовлюють захисні властивості композиційних екрануючих матеріалів є електрофізичні та магнітні властивості – питома електропровідність, відносні діелектрична та магнітна провідності. Ці показники для металів і сплавів є довідковими величинами, але для композиційних матеріалів вони різняться у залежності від складу вихідної суміші. Наявні розрахункові методи визначення необхідних параметрів є емпіричними і мають недостатню точність. Крім того вони враховують тільки об'ємний вміст екрануючих добавок у діелектричну матрицю за умови, що такої добавки менше за третину об'єму. При цьому структура

композиту вважається однорідною. Тому постає задача визначення основних підходів до попередньої оцінки захисних властивостей матеріалу, що дозволить скоротити витрати часу й коштів для проектування матеріалу потрібних захисних властивостей.

Огляд публікацій і розробок у галузі проектування електромагнітних екранів. Більшість досліджень і прикладних розробок з проектування композиційних матеріалів для екранування електричних, магнітних та електромагнітних полів широкого частотного діапазону є експериментальним. Здебільшого вони стосуються матеріалів з максимально рівномірним розподілом екрануючих включень у діелектричній матриці.

У дослідженнях [1, 2] показано залежність коефіцієнтів екранування від вмісту дрібнодисперсних включень полімерну матрицю. При цьому встановлена залежність захисних властивостей від дисперсності частинок наповнювача. Робота [3] свідчить, що коефіцієнти екранування певним чином залежать від морфології екрануючих включень. Тобто, наявність певної неоднорідності за рахунок видовженої форми включень впливає на коефіцієнти екранування. Найбільш ефективний захист забезпечують наповнювачі нанорозмірів [4, 5]. Але застосування наноматеріалів автоматично призводить до високої собівартості кінцевого продукту. При цьому рівномірність розподілу частинок наповнювача забезпечується ультразвуковою обробкою вихідної суміші у рідкому стані або

застосуванням дисольверів з великими обертами [6, 7]. Такі технології виготовлення композитів доцільно використовувати для вироблення захисних матеріалів спеціального призначення – забезпечення електромагнітної сумісності чутливого електронного обладнання, технічного захисту інформації, військових потреб. Для широкого застосування вони мають високу вартість. Крім того, вони не можуть бути використані у якості оздоблювальних або будівельних матеріалів. Загальним недоліком усіх металополімерних композитів є ймовірність деградації під впливом фізичних або хімічних чинників [8]. Певним чином метастабільними є усі багатокомпонентні матеріали, на основі мікро- та наноматеріалів [9]. Неоднорідні матеріали сітчастого типу розглядають у роботі [10]. Зокрема показано, що в області дуже високих і вищих частот параметри екрана (відстань між дротами, їх діаметри) повинні однозначно відповідати частотним характеристикам екранованого електромагнітного поля, тобто такі екрани фактично монохромні. Аналогічний екран пропонується для екранування магнітного поля промислової частоти [11]. На сьогодні практично не приділяється уваги проблематиці розроблення і дослідження захисних властивостей композиційних матеріалів на основі макроstruktur, які можуть бути використані у якості оздоблювальних або будівельних матеріалів. Певним чином це обумовлене відсутністю методології розроблення таких матеріалів.

Мета роботи – розроблення загальних засад проєктування неоднорідних електромагнітних екранів на основі макроstruktur.

Викладення основного матеріалу

Макроскопічність екрануючих елементів у діелектричній матриці відносна. Вона залежить від довжини хвилі електромагнітного поля, яке екранується. Для електромагнітних випромінювань надзвичайно високих частот навіть частинки розмірами 150–200 мкм можна вважати макроскопічними. Це підтверджується експериментальними дослідженнями. У роботі [12] показано, що зі зростанням розмірів частинок відбувається різке підвищення коефіцієнта відбиття електромагнітних випромінювань ультрависокої частоти, що свідчить про суцільність екрануючої поверхні.

У загальному випадку існують два класи композицій – матеріали з регулярними екрануючими елементами та матеріали з хаотично розташованими частинками (округленими або видовженими). Ефективність екранування електромагнітних полів регулярними структурами можливо прогнозувати аналітичними методами, виходячи з електрофізичних властивостей матриці і матеріалу регулярної структури, відстаней між елементами цієї структури та її габаритних параметрів.

Для хаотично розміщених частинок наповнювача розрахувати прогнозовані параметри – діелектричну та магнітну проникності, які визначають захисні властивості, можливо із застосуванням формул Лорентца, Максвелла-Гарнета, Оделевського. При цьому формула Оделевського містить коефіцієнт

деполяризації, який враховує співвідношення довжини та ширини частинок. Але усі ці співвідношення емпіричні, тому їх застосування дає великі похибки, що за малих об'ємних вмістах екрануючого наповнювача є критичним.

Найбільш точно можна розрахувати захисні властивості металевих сітчастих регулярних структур. Коефіцієнт екранування сітки за нормального падіння електромагнітної сітки визначається співвідношенням:

$$K_s = 10 \lg \left(4 \left(\frac{d}{\lambda} \ln \frac{d}{2\pi r_0} \right)^2 / \left(1 + 4 \left(\frac{d}{\lambda} \ln \frac{d}{2\pi r_0} \right)^2 \right) \right),$$

де r_0 – радіус металевого дроту, d – середня відстань між дротами, λ – довжина падаючої електромагнітної хвилі.

У випадку падіння електромагнітної хвилі під деяким кутом до екрана:

$$K_r = 10 \lg \frac{4 \left((d \cos \varphi / \lambda) \cdot \ln (d / (2\pi r_0)) \right)^2}{1 + 4 \left((d \cos \varphi / \lambda) \cdot \ln (d / (2\pi r_0)) \right)^2},$$

$$K_s = 10 \lg \frac{(1 - \cos \varphi)^2 + 4 \left((d / \lambda) \cdot \ln (d / (2\pi r_0)) \right)}{1 + 4 \left((d / \lambda) \cdot \ln (d / (2\pi r_0)) \right)},$$

де φ – кут між напрямком розповсюдження електромагнітної хвилі і нормаллю до поверхні екрана.

Але, як зазначалося вище, недоліком таких структур є монохромність поглинання. Для подолання цього недоліку доцільно застосувати дві сітчасті регулярні структури, розташовані паралельно. Одна з них розраховується, виходячи з мінімально можливої довжини хвилі, друга – максимально можливої. Ці довжини хвиль визначаються або з технічної документації потенційних джерел електромагнітних полів, або експериментально. Такий підхід робить конструкцію широкосмуговою. Доцільно розглянути також можливість підвищення ефективності конструкції певним зсувом однієї сітки відносно іншої.

Найбільш привабливим способом забезпечення екранування електромагнітних полів широкого частотного діапазону є екранування полів будівельними матеріалами. Але будь-які екрануючі домішки до силовини змінюють міцнісні характеристики будівельних матеріалів (пружні модулі), що небажано, принаймні для стінових конструкцій та перекриттів. Тому для забезпечення захисних властивостей будівельних матеріалів екрануючий матеріал доцільно вмішувати у існуючі порожнини, як конструктивно закладені у цеглу, шлакоблоки, панелі тощо. Такі матеріали використовуються у великих обсягах, тому екрануючі добавки повинні мати мінімально можливу вартість. Зазвичай, високі коефіцієнти екранування непотрібні, тому для визначених цілей доцільно використовувати відходи або побічні продукти виробництва. Попередні дослідження показали, що коефіцієнти екранування електромагнітних полів на рівні 2,0–2,5 може забезпечити сажа, яка у великих обсягах утворюється на теплових електростанціях.

Для екранування стаціонарних та квазістаціонарних магнітних полів доцільно використовувати залізорудний концентрат, який у великих обсягах виробляється на гірничо-збагачувальних комбінатах України. Найбільш перспективним напрямом отримання високих коефіцієнтів екранування електромагнітних полів наднизької частоти (промислової) та ультрависоких і вищих частот є використання порожнин піно- та газобетону для розміщення екрануючих матеріалів. Виходячи з теоретичних міркувань, можна передбачити, що доданий у вихідну бетонну суміш залізорудний концентрат у процесі піноутворення буде осідати на внутрішніх поверхнях порожнин піно- та газобетону. Відомі експерименти з пінолатексом [13] показали, що додавання пилу із вмістом дрібнодисперсної залізної руди, отриманого в процесі подрібнення руди, навіть за товщини матеріалу 10 мм забезпечує коефіцієнти екранування магнітного поля промислової частоти – до 38, електромагнітного поля ультра високої частоти – до 52 (вміст екрануючого матеріалу – до 20 % за масою).

Значна частина будівельних матеріалів, особливо тих, що використовуються для оздоблювальних робіт є перфорованими. Використовується велика кількість перетинок перфорованої структури. Такі матеріали можливо застосовувати для цілей електромагнітної безпеки. Існують кілька простих співвідношень для визначення ефективності екранування електромагнітних полів матеріалами з отворами. Вони вважаються емпіричним і не мають широкого застосування. Але прості у застосуванні співвідношення можна строго отримати з теорії хвильоводів. Причому це можливо з будь-якою точністю у залежності від потреб. Для цього треба застосовувати хвильове рівняння для вектора Герца:

$$\frac{\partial^2 \Pi_z}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \Pi_z}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 \Pi_z}{\partial z^2} + R^2 \Pi_z = 0$$

або

$$\frac{\partial^2 \Pi_z}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \Pi_z}{\partial y^2} + (k^2 - h^2) \cdot \Pi = 0,$$

де $\Pi = c \sin(m\pi x/a) \sin(n\pi y/b)$ (хвильовий вектор Герца), k – хвильове число, h – повздовжнє хвильове число, яке характеризує розповсюдження хвилі уздовж осі Z , m , n – натуральні коефіцієнти, a , b – ширина і довжина хвильоводу.

Наявність можливості розкладання функції Π у ряд забезпечує необхідну точність обчислень. Будь-який отвір можна вважати хвильоводом малої довжини, тому відповідні розрахунки є коректними. Розв'язуючи хвильове рівняння, обирається співвідношення k та h , яке відповідає найбільшій довжині хвилі, яка проникає крізь отвір. Таку довжину можна визначити як критичну. Якщо r – радіус отвору, то для прямокутного отвору $\lambda_{кр} = 2/\sqrt{1/a^2 + 1/b^2}$, для круглого отвору $\lambda_{кр} = 2\pi r/1,84 = 3,4r$.

Такі отвори є непроникними для електромагнітного випромінювання з довжиною хвилі $\lambda_{кр}$. У практичному застосуванні зручніше користуватися критичною частотою, так званою «частотою зрізу».

Для прямокутного отвору $f_3 = 1,5 \cdot 10^8/b$, Гц, де b – найбільший розмір прямокутного отвору. Для круглого отвору $f_3 = 1,75 \cdot 10^8/D$, Гц, де D – діаметр отвору. Тоді, застосовуючи стандартні визначення ефективності поглинання електромагнітних хвиль A , отримуємо для прямокутного отвору $A = 27,3 \cdot l/b$, дБ; для круглого отвору $A = 32 \cdot l/D$, дБ, де l – товщина стінки екрана.

Для розрахунку втрат на поглинання зони з отвором (апертурою), обирається частота, яка за наближеними співвідношеннями нижча за f_3 .

З наведених співвідношень можна зробити висновки, що для підвищення ослаблення поля необхідно збільшувати глибину апертури l . Втрати на відбиття у загальному випадку визначаються як:

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

де b – ширина отвору, a – висота отвору, f – частота випромінювання.

Відповідно до круглого отвору втрати на відбиття розраховуються зі співвідношення

$$R = 102 - 20 \lg(df), \text{ дБ}$$

де d – діаметр отвору.

Кількість отворів (щільність розташування) враховується співвідношенням $K_n = 10 \lg(Sn)$, дБ, де S – площа одного отвору, n – кількість отворів на одиницю площі. Добуток Sn надає частку площі отворів на одиницю площі екрана у відносних одиницях. Тобто, коефіцієнт K_n має від'ємне значення ($Sn < 1$). Фізичне тлумачення цього факту полягає у тому, що ефективність екранування знижується зі збільшенням загальної площі отворів.

Було розглянуто суто геометричні критерії ефективності екранування неоднорідних провідних структур. У подальшому доцільно визначити ефективності екранування неоднорідних структур з урахуванням електрофізичних властивостей матеріалів з яких вони виготовлені.

Висновки

1. Розглянуто два класи неоднорідних матеріалів для екранування електромагнітних полів. Показано, що матеріали з хаотичним розташуванням екрануючих елементів складні щодо прогнозування їх захисних властивостей через емпіричний характер відповідних математичних співвідношень. Надано розрахунковий апарат щодо розрахунку ефективності сітчастих металевих структур. Показано, що застосування паралельних сітчастих структур робить конструкцію широкосмуговою.

2. Надано обґрунтовані рекомендації щодо підвищення екрануючих властивостей стандартних будівельних та оздоблювальних матеріалів. Для запобігання зниженню пружних модулів матеріалів екрануючі добавки розміщуються у існуючих порожнинах шлакоблоків, вироби із піно- та з газобетону. Для цього доцільно використовувати відходи теплових електростанцій та залізорудний концентрат.

3. Встановлено, що прості і зручні у використанні співвідношення для визначення захисних властивостей екрануючих поверхонь з отворами можна строго математично отримати з теорії хвильоводів. Для цього здійснюється розв'язок хвильового

рівняння для вектора Герца. Надано співвідношення для визначення критичних довжин хвиль (частот зрізу), які пропускаються отвором. Визначені коефіцієнти поглинання та відбиття для екранів з отворами прямокутної та круглої форм.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

- Glyva, V., Kasatkina, N., Nazarenko, V., Levchenko, L., Panova, O., Tykhenko, O., Khodakovskyy, O. Development and study of protective properties of the composite materials for shielding the electromagnetic fields of a wide frequency range. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 2020, 2(12-104), pp. 40–47. <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2020.201330>.
- Glyva V., Kovalenko V., Levchenko L., Tykhenko O. Research into protective properties of electromagnetic screens based on the metal-containing nanostructures. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. 2017. Vol. 3, № 12 (87). P. 50–56. <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2017.103167>
- Касаткіна Н.В., Тихенко О.М., Панова О.В., Бірук Я.І. Підвищення ефективності композиційних електромагнітних екранів регулюванням морфології феромагнітного наповнювача. «Системи управління навігації та зв'язку», – 2020. Вип. № 3(61), С. 115-119. <https://doi.org/10.26906/SUNZ.2020.3.115>
- Tudose I.V., Mouratis K., Ionescu O.N., Romanitan C., Pachiou C., Popescu M., Khomenko V., Butenko O., Chernysh O., Kenanakis G., Barsukov V.Z., Sucheа M.P., Koudoumas E. Novel Water-Based Paints for Composite Materials Used in Electromagnetic Shielding Applications. *Nanomaterials*. 2022, 12(3). P. 487. <https://doi.org/10.3390/nano12030487>
- Glyva, V., Podkopaev, S., Levchenko, L., Karaieva, N., Nikolaiev, K., Tykhenko, O., Khodakovskyy, O., & Khalmuradov, B. (2018). Design and study of protective properties of electromagnetic screens based on iron ore dust. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 1(5 (91)), 10–17. <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2018.123622>
- Glyva, V., Bakharev, V., Kasatkina, N., Levchenko, O., Levchenko, L., Burdeina, N., Guzii, S., Panova, O., Tykhenko, O., Biruk, Y. Design of liquid composite materials for shielding electromagnetic fields. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 2021, 3(6-111), pp. 25–31. <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2021.231479>
- Senyk I., Kuryptia Y., Barsukov V., Butenko O., Khomenko V. Development and application of thin wide-band screening composite materials. *Physics and Chemistry of Solid State*. 2020. 21(4). Pp. 771–778. <https://doi.org/10.15330/pccs.21.4.771-778>
- Alina Ruxandra Caramitu, Ioana Ion, Adriana Mariana Bors, Violeta Tsakiris, Jana Pinteа, Ana-Maria Daniela Caramitu. 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>
- Butenko O., Boychuk V., Savchenko B., Kotsyubynsky V., Khomenko V., Barsukov V. Pure ultrafine magnetite from carbon steel wastes. *Materials Today: Proceedings*. 2019. V. 6, pp. 270–278.
- Панова О.В. Дослідження захисних властивостей металевих електромагнітних екранів та визначення умов їх максимальної ефективності. Системи управління навігації та зв'язку. 2020. 2(60), с. 127–130. <https://doi.org/10.26906/SUNZ.2020.2.127>
- Grinchenko V.S. Mitigation of three-phase power line magnetic field by grid electromagnetic shield. *Tekhnichna Elektrodynamika*. 2018. Vol. 2018, Issue 4. P. 29–32. <https://doi.org/10.15407/techned2018.04.029>
- Glyva V.A., Podoltsev A.D., Bolibrukh 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. <https://doi.org/10.15407/techned2018.04.014>
- 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.

Received (Надійшла) 24.04.2024

Accepted for publication (Прийнята до друку) 10.07.2024

Principles of designing inhomogeneous electromagnetic screens

Y. Biruk, A. Klymchuk

Abstract. Two classes of inhomogeneous electromagnetic shields are considered: shields based on regular shielding elements and materials with a chaotic arrangement of metal-containing particles. It is shown that an accurate prediction of the protective properties of composite materials with a chaotic arrangement of inclusions is impossible due to the empirical nature of the known Lorentz, Maxwell-Garnet, and Odelevsky relations. The development of building and finishing materials with a regular arrangement of protective material in construction products is proposed. The main problem of imparting protective properties to building and finishing materials is the reduction of the main parameters of these materials (elastic modules) due to the addition of a shielding substance. To avoid this effect, it is proposed to use technological cavities in building materials. For this purpose, it is possible to use soot from thermal power plants and iron ore concentrate. Theoretical considerations indicate that the addition of a screening additive of large dispersion to the initial mixture of foam and aerated concrete during foaming promotes the distribution of additive particles on the inner surfaces of the cavities. This significantly increases the protective properties of materials without reducing the elastic modulus of products. A calculation apparatus for the efficiency of shielding electromagnetic radiation by mesh metal structures is presented. To make the structure broadband, it is proposed to use two parallel structures tuned to the maximum and minimum wavelengths of radiation, which are determined experimentally. It is shown that the use of the solution of the wave equation for the Hertz vector allows obtaining simple and convenient relations for determining the minimum frequencies of radiation penetrating through the holes (cutoff frequencies). This made it possible to determine such parameters for rectangular and circular openings. The relations for calculating the effectiveness of protection due to the absorption of electromagnetic energy and the reflection of electromagnetic waves were obtained. The possibility of taking into account the area and number of holes per unit area of the screen is shown. The calculations performed concern purely geometric characteristics of protective structures with holes. A promising area of research is to determine the protective properties of heterogeneous electromagnetic shields, taking into account the electrophysical and magnetic properties of the materials from which the structures are made.

Keywords: electromagnetic shield, regular structure, building materials, cutoff frequency, Hertz vector.