

Д. М. Самченко¹, О. М. Тихенко², Л. А. Зозуля³, Н. Н. Цибульник⁴

¹ Київський національний університет будівництва і архітектури, Київ, Україна

² Національний авіаційний університет, Київ, Україна

³ Міністерство освіти і науки України, Київ, Україна

⁴ Кременчуцький національний університет імені Михайла Остроградського, Кременчук, Україна

ПРОЄКТУВАННЯ ЕЛЕКТРОМАГНІТНИХ ЕКРАНІВ ГАРАНТОВАНОЇ ЕФЕКТИВНОСТІ ДЛЯ ГАЛУЗЕЙ ЦИВІЛЬНОЇ БЕЗПЕКИ ТА ЕЛЕКТРОМАГНІТНОЇ СУМІСНОСТІ

Анотація. Розглянуто засади проектування композиційних матеріалів з гарантованим (потрібними) ефективностями. Надано основні співвідношення для оцінювання ефективності проєктованого матеріалу. Головною умовою отримання матеріалу з малими коефіцієнтами відбиття електромагнітних хвиль є наближення хвильового опору поверхневого шару до опору повітря. Розрахунки показали, що для забезпечення мінімально прийняттого коефіцієнта відбиття (0,25–0,30) і достатніми коефіцієнтами поглинання електромагнітної енергії (-20 дБ за потужністю) матеріал повинен бути багатошаровим з середнім шаром високих поглинальних властивостей. Це забезпечується його високою електропровідністю. Можливим варіантом є монотонне зростання електрофізичних властивостей від зовнішньої поверхні до внутрішньої. За необхідності одночасного екранування електромагнітного поля ультрависоких та вищих частот та магнітного поля наднизьких частот (промислової та її гармонік і інтергармонік) матеріал повинен містити магнітний наповнювач. Його об'ємна кількість визначається за формулою Оделевського. Коефіцієнт відбиття у цьому випадку визначається співвідношенням абсолютних магнітної та діелектричної проникностей поверхневого шару. Для спрощення проектування матеріалу феромагнітні частинки наповнювача повинні бути електроізолюваними. При цьому радіопоглинальний матеріал (або шар матеріалу) повинен мати у структурі розгалужені кола провідності. У процесі проектування матеріалу при обиранні матриці обов'язковим є врахування не тільки діелектричних проникностей матеріалів, а й тангенсів кутів діелектричних втрат.

Ключові слова: електромагнітний екран, коефіцієнт відбиття, діелектричні втрати.

Вступ

Забезпечення електромагнітної безпеки людей у виробничих та побутових умовах є одним з пріоритетних напрямів досліджень з цивільної безпеки. В той же час розвиток високих технологій призводить до вкрай високої насиченості виробничого середовища, транспортних засобів електронною апаратурою, яка у несприятливому електромагнітному оточенні може працювати нестабільно. Це вимагає розроблення і впровадження ефективних засобів захисту людей і обладнання від електромагнітних впливів. У багатьох випадках забезпечення електромагнітної безпеки та електромагнітної сумісності є двоєдиною задачею. Але деякі необхідні параметри засобів вирішення двох аспектів цієї задачі не співпадають. Це стосується як загальних ефективностей захисних матеріалів і конструкцій, так і окремих їх властивостей – співвідношення захисту за рахунок відбиття та поглинання електромагнітних хвиль, частотний діапазон захисту, масогабаритні показники тощо. Ці питання необхідно узгодити і розробити порядок проектування засобів захисту на засадах розумної достатності.

Сучасний стан питання

Більшість екрануючих матеріалів і конструкцій призначені для екранування електричного, магнітного та електромагнітного полів певної частоти, смуги частот або частотного діапазону.

Так, робота [1] стосується магнітної складової електромагнітного поля промислової частоти. У ній розглядаються гратчасті довгі конструкції, які замикають на себе силові лінії магнітного поля.

У роботі [2] також розглядаються гратчасті структури, але вони стосуються електромагнітних полів ультрависоких і вищих частот. За своїми властивостями вони призначені для екранування полів конкретних частот, у залежності від розмірів комірки.

Суцільні екрани з прийнятною універсальністю, наприклад [3] вироблені на базі магнітної рідини. Такі матеріали складні у практичному застосуванні і мають велику вартість через вартість колоїдного розчину нанозаліза. Існує багато досліджень і розробок щодо матеріалів з широким спектром захисту [4–6].

Але досягається за рахунок великої товщини матеріалу (до 10 мм). При цьому для забезпечення малих коефіцієнтів відбиття матеріал повинен бути або багатошаровим, або піддаватися спеціальній обробці у магнітному полі з метою забезпечення імпедансу поверхневого шару, що наближається до показника повітря (377 Ом). Труднощі із забезпеченням широкосмуговості матеріалу обумовлені різними фізичними механізмами екранування низькочастотних та високочастотних електромагнітних полів. Головним чином це стосується магнітного поля промислової частоти і електромагнітних полів ультрависоких частот. Для екранування магнітної складової поля промислової частоти матеріал повинен мати наповнювач з прийнятними магнітними проникностями, а для високочастотних полів головним фактором є провідність матеріалу.

В останні роки виконано низку досліджень з розробки тонких екрануючих поверхонь [7, 8]. Широкошмуговість досягається вміщенням у полімерну матрицю магнітного матеріалу (магнетиту) та графіту

високої провідності. У якості в'язучого матеріалу застосовується графітізована сажа. За високих захисних властивостей ці матеріали мають високу вартість.

Тому їх застосування прийнятне для забезпечення електромагнітної сумісності електронного обладнання великої вартості.

Більш прості за складом матеріали на рідкій основі (фарби) з вмістом концентрату залізної руди та лускатого графіту для багатьох виробничих умов мають недостатню ефективність [9, 10]. Значною мірою така ситуація обумовлена недостатньою розробленістю теоретичних та експериментальних засад проектування матеріалів для захисту людей та забезпечення електромагнітної сумісності електричного та електронного обладнання.

Мета роботи – розроблення методології проектування електромагнітних екранів із заданими захисними властивостями, придатними для забезпечення електромагнітної безпеки людей та електромагнітної сумісності технічних засобів.

Викладення основного матеріалу

У загальному випадку ступінь екранування електромагнітного поля визначається загальним коефіцієнтом екранування та коефіцієнтом відбиття електромагнітних хвиль (безрозмірні величини). Ефективністю екранування традиційно вважається визначення параметрів у логарифмічних одиницях (дБ). Так, загальна ефективність екранування електромагнітного поля

$$SE_T = 10 \lg \left(\frac{1}{T} \right).$$

Ефективність екранування за рахунок відбиття

$$SE_R = 10 \lg \left(\frac{1}{1-R} \right).$$

Тобто, для створення електромагнітного екрана необхідної ефективності потрібні значення коефіцієнтів проходження електромагнітного поля T та коефіцієнта відбиття R .

У процесі проектування захисного матеріалу або конструкції слід визначитися, за яким параметром визначається ефективність екранування. У разі оцінювання змін напруженості електричного поля перед знаком \lg береться коефіцієнт 10. Якщо оцінюються втрати потужності випромінювання P , то береться коефіцієнт 20 ($P \sim E^2$). У практичній діяльності використовуються усі зазначені кількісні оцінки зміни параметрів електромагнітних полів захисним матеріалом.

Для діелектричних матеріалів захисні властивості визначаються їх комплексною діелектричною проникністю.

$$\hat{\varepsilon} = \varepsilon' + i\varepsilon'' = \varepsilon + i \frac{\sigma}{\omega \varepsilon_0},$$

де ε – діелектрична проникність, σ – питома провідність, ω – циклічна частота випромінювання, ε_0 – електрична стала.

Для високочастотної області електромагнітного спектра найбільш критичною є дійсна складова діелектричної проникності.

За низьких електропровідностей коефіцієнт відбиття електромагнітних хвиль за потужністю визначається як:

$$K_R = \left(\frac{\sqrt{\varepsilon_M} - 1}{\sqrt{\varepsilon_M} + 1} \right)^2,$$

де ε_M – відносна діелектрична проникність матеріалу.

Виходячи з цього співвідношення, діелектрична проникність поверхневого шару захисного матеріалу повинна бути мінімальною, тобто наближатися до показника повітря ($\varepsilon_n = 1$).

Але при цьому необхідно забезпечити достатній рівень поглинання енергії електромагнітної хвилі, тобто значення K_A .

Коефіцієнт поглинання функціонально залежить від питомої електропровідності матеріалу. Причому різке зростання коефіцієнта поглинання відбувається при досяжності перколяційного ефекту – різкого зростання електропровідності за певних співвідношень непровідного та провідного компонента у матеріалі [5].

Це має наслідком зміну діелектричної проникності матеріалу у бік підвищення, що можна визначити розрахунком із застосуванням співвідношення Максвелла-Гарнета. У результаті підвищується коефіцієнт відбиття, що є небажаним у більшості прикладних задач.

Залежність коефіцієнта поглинання від вмісту металів дисперсністю 60–100 мкм наведено на рис. 1.

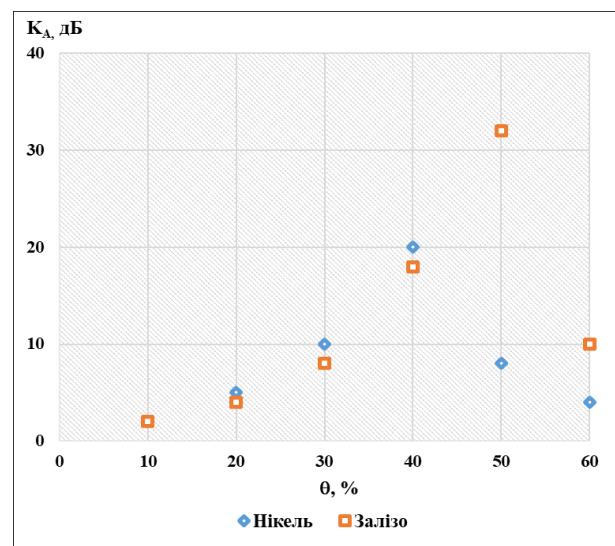


Рис. 1. Залежність коефіцієнта поглинання електромагнітного випромінювання ультрависокої частоти від вмісту металевого порошку

Для вирішення цієї проблеми доцільно застосувати багат шарову структуру. Умовами її ефективності є:

– зовнішній шар повинен мати мінімальну діелектричну проникність, прийнятну для забезпечення механічних властивостей;

– вміст радіопоглинальних частинок або структур повинен забезпечувати монотонне зростання уявної складової ефективної діелектричної проникності від зовнішньої поверхні до внутрішньої і максимальне згасання електромагнітної хвилі на шляху до внутрішньої поверхні. Внутрішню поверхню за необхідності високої ефективності екранування доцільно зробити металевую. Товщини шарів узгоджуються з урахуванням інтерференційних явищ;

– дисперсійна залежність поглинання за частотами повинна забезпечити прийнятну рівномірність поглинання за усією смугою частот. Небажаним є суттєві відбиття на границях розділу шарів.

У багатьох випадках одночасно з екрануванням високочастотного електромагнітного поля потребує екранування електромагнітне поле наднизької частоти (промислової та її гармонік і інтергармонік). Якщо з електричною складовою таких полів проблем не виникає через провідність радіопоглинального шару, то екранування магнітної складової потребує наявності у матеріалі наповнювача з магнітними властивостями.

Це автоматично призводить до зміни імпедансу матеріалу. У даному випадку він визначається співвідношенням $\sqrt{\mu/\epsilon}$, де μ , ϵ – відповідно абсолютні магнітна та діелектрична проникності матеріалу. Слід враховувати, що за складного складу, магнітну проникність потрібно визначати окремо. Це можна зробити експериментально або розраховувати за формулою Оделевського. Для матеріалу з діелектричними властивостями коефіцієнт відбиття електромагнітних хвиль можна оцінити з емпіричного співвідношення:

$$\frac{d\sqrt{\epsilon}}{\lambda_{\min}} < 0,3,$$

де d – товщина матеріалу, λ_{\min} – мінімальна довжина хвилі екранованого електромагнітного поля, 0,3 – максимально прийнятний коефіцієнт відбиття.

Для матеріалу з магнітними властивостями у загальному випадку:

$$|\lg R_p| (\lambda_{\max} - \lambda_{\min}) < 2\pi^2 \sum_i \mu_i d_i,$$

де R_p – максимальний коефіцієнт відбиття електромагнітних хвиль за потужністю, λ_{\max} , λ_{\min} – максимальна і мінімальна довжини хвиль екранованого поля, μ_i – відносна магнітна проникність кожного i -го шару матеріалу, d_i – його товщина.

Застосування цього співвідношення дає прийнятні результати для усього діапазону ультрависоких частот.

Екранування магнітної складової досягається за рахунок достатньої магнітної проникності матеріалу за рахунок магнітних втрат.

При цьому магнітні частинки повинні бути ізолювані, що спрощує процес розрахункового оцінювання електрофізичних і магнітних властивостей матеріалу або кожного шару матеріалу.

Головними вимогами при проектуванні таких матеріалів є:

- наявність кіл провідності;
- наявність ізолюваних одна від одної магнітних частинок;
- забезпечення згасання електромагнітного поля за рахунок діелектричних втрат,
- мінімальна різниця хвильових опорів на границі повітря/поверхня матеріалу.

При обиранні матеріалу матриці композиційного матеріалу слід враховувати не тільки діелектричні проникності, а і тангенсу кутів діелектричних втрат. Наприклад, діелектричні проникності полістиролу і полівінілхлориду близькі за значенням (2,3–2,5 та 2,4–2,7 відповідно), але тангенси кутів діелектричних втрат суттєво відрізняються ($2 \cdot 10^{-4}$ та $5 \cdot 10^{-2}$ відповідно).

Тому для виготовлення радіопоглинальних покриттів у високочастотній області спектра полівінілхлорид має суттєві переваги.

У практичній роботі з розроблення захисних композицій з функціями екранування магнітних полів наднизької частоти застосовується латекс. Але він у звичайному стані має діелектричну проникність до 14. Тому для узгодження хвильових опорів та великих коефіцієнтів екранування у матрицю доцільно додавати наповнювач з високими магнітними проникностями.

Застосування латексу у вигляді пінолатексу знижує діелектричну проникність до 4, тому у якості наповнювача можливо застосовувати магнетит.

При обиранні матеріалу матриці (полімеру або лакофарбового носія) слід враховувати можливі процеси деградації матеріалу у процесі експлуатації. Наприклад, поліетилени мають схильність до зміни механічних властивостей під впливом знакозмінних термічних навантажень. Головною проблемою тут є не руйнування матеріалу, а зміна його діелектричної проникності. Тобто у процесі проектування слід заздалегідь визначитися у якому місці захисний екран буде застосовуватися (ззовні або усередині приміщення). Досвід випробувань і ознайомлення з характеристиками матеріалів розроблених за складними технологіями свідчить, що у багатьох випадках такі матеріали є метастабільними, тобто з часом втрачають свої вихідні властивості (механічні, електрофізичні тощо). Це притаманне багатокомпонентним композиціям з великою кількістю складових.

Наприклад, більшість захисних матеріалів на основі наночастинок втрачають свої властивості через зміни електропровідності або магнітної проникності готової суміші. Тобто у процесі проектування матеріалу у конструктивні рішення необхідно закладати певні вимоги.

Основними з них є:

- ефективність матеріалу з точки зору його основного функціоналу;
- умови експлуатації матеріалу з точки зору фізичних і хімічних впливів на нього;
- необхідні гарантовані терміни експлуатації.

У реальних виробничих умовах ті чи інші вимоги можуть бути головними. Крім того можливі додаткові специфічні вимоги до матеріалу, наприклад,

неможливість його заміни, необхідність підвищення ефективності тощо.

Висновки

1. Головною задачею проектування електромагнітних екранів потрібної ефективності є узгодженість хвильових опорів повітря та поверхневого шару матеріалу. Слід враховувати переважний вплив на захисні властивості у високочастотній області електромагнітного спектра дійсної складової комплексної діелектричної проникності матеріалу.

2. Для досягнення високих захисних властивостей матеріалу одночасно з малими коефіцієнтами

відбиття електромагнітних хвиль матеріал повинен бути багатозаровим, або таким, у якому забезпечено поступове зростання електрофізичних параметрів від зовнішньої поверхні до внутрішньої.

3. Для одночасного екранування електромагнітних полів ультрависоких та вищих частот і магнітних полів наднизьких частот у матеріал додається магнітний наповнювач. Для спрощення розрахункового визначення електрофізичних параметрів кінцевого матеріалу магнітні частинки повинні бути електроізолювані. При обиранні матеріалу матриці слід враховувати не тільки діелектричні проникності матеріалу, а і тангенс кута діелектричних втрат.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. 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>.
2. 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>.
3. 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>.
4. Kefeng JI; Jun GAO; Xiangyu CAO; Jiangfeng HAN; Huanhuan YANG. Design of Ultra-wideband Low RCS Reflecting Screen Based on Phase Gradient Metasurface. *Radioengineering*. Jun 2021, Vol. 30 Issue 2, p. 314-322. <https://doi.org/10.13164/re.2021.0314>.
5. 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 Conference Series: Materials Science and Engineering*. 2020. Vol. 907. URL: <https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1757-899X/907/1/012043/meta> (дата звернення: 23.05.2023).
6. Glyva, V., Kasatkina, N., Nazarenko, V., Burdeina, N., Karaieva, N., Levchenko, L., Panova, O., Tykhenko, O., Khalmuradov, B., 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>.
7. 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.
8. 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.
9. 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>.
10. Бурдейна Н.Б., Бірук Я.І. Засоби підвищення ефективності рідинних матеріалів для екранування електромагнітних полів широкого частотного діапазону. Системи управління, навігації та зв'язку. 2022. Т. 4 (70). С. 138-141. <https://doi.org/10.26906/SUNZ.2022.4.138>.

Received (Надійшла) 30.05.2023

Accepted for publication (Прийнята до друку) 02.08.2023

Design of electromagnetic screens of guaranteed efficiency for civil security and electromagnetic compatibility

D. Samchenko, O. Tykhenko, L. Zozulya, N. Thibulnik

Abstract. The principles of designing composite materials with guaranteed (required) efficiency are considered. The main ratios for evaluating the efficiency of the designed material are given. The main condition for obtaining a material with low reflection coefficients of electromagnetic waves is the approximation of the wave resistance of the surface layer to the air resistance. Calculations showed that in order to ensure a minimally acceptable reflection coefficient (0.25–0.30) and sufficient absorption coefficients of electromagnetic energy (-20 dB in power), the material should be multi-layered with a middle layer of high absorption properties. This is ensured by its high electrical conductivity. A possible option is a monotonous increase in electrophysical properties from the outer surface to the inner one. If it is necessary to simultaneously shield the electromagnetic field of ultra-high and higher frequencies and the magnetic field of ultra-low frequencies (industrial and its harmonics and interharmonics), the material must contain a magnetic filler. Its volumetric amount is determined by Odelevsky's formula. The reflection coefficient in this case is determined by the ratio of the absolute magnetic and dielectric permeabilities of the surface layer. To simplify the design of the material, the ferromagnetic particles of the filler should be electrically insulated. At the same time, the radio-absorbing material (or material layer) must have branched conduction circles in the structure. In the process of designing the material, when choosing the matrix, it is mandatory to take into account not only the dielectric constants of the materials, but also the tangents of the dielectric loss angles.

Keywords: electromagnetic shield, reflection coefficient, dielectric losses.