

УДК 537.87:669.162.12 (045)

## ЕЛЕКТРОМАГНІТНИЙ ЕКРАН ГРАДІЄНТНОГО ТИПУ

GRADIENT SHIELDING OF ELECTROMAGNETIC FIELDS

Левченко Л. О., Осадчий Б. М., Панова О. В., Бірук Я. І.

Levchenko L., Osadshiy B., Panova O., Biruk Y.



У роботі розглянуто основні принципи проектування та вироблення матеріалів для екранування електромагнітних полів широкочастотного діапазону включно з промчастотою та різноманітним діапазоном її гармонік та інтергармонік, які генеруються при виробництві та передачі електроенергії. Сформульовано головні вимоги до таких матеріалів. Головними з них є: лицьова поверхня повинна мати електрофізичні властивості (діелектричну та магнітну проникність), мінімально можливі для забезпечення низьких коефіцієнтів відбиття електромагнітних хвиль. При цьому обов'язковим є одночасне забезпечення міцнісних характеристик, вогнестійкості, нетоксичності тощо. Вміст радіопоглинальної субстанції у прошарку шарової структури й закономірності зростання ефективної діелектричної (магнітної) проникності у бік підкладки повинні забезпечувати широку смуговість та ефективність матеріалу. Дисперсійна залежність повинна забезпечити рівномірне у заданому діапазоні частот поглинання електромагнітної енергії та її проходження від вхідної поверхні до підкладки. Надано розрахунок необхідної товщини градієнтного матеріалу за заданого коефіцієнта відбиття, виходячи з максимальної та мінімальної довжини хвиль екранованого поля, магнітної проникності та товщини окремих шарів. Показано можливість виготовлення монолітного металополімерного екрана з поверхневим шаром з малою діелектричною проникністю за рахунок термооброблення поверхні матеріалу під час виготовлення. Показано можливість та надано технологічні рішення щодо створення монолітного металополімерного екрана з керованим градієнтом ферромагнітної дрібнодисперсної субстанції у напрямку від лицьової поверхні до нижньої. Такий матеріал можливо застосовувати для керування співвідношень коефіцієнтів екранування високо частотних електромагнітних полів, електричних та магнітних полів наднизьких частот і супутнього екранування природного магнітного поля.

The paper considers the basic principles of the design and production of materials for shielding electromagnetic fields with a wide frequency range, including the power frequency and various harmonics and interharmonics, which are generated by production and passing electric power. Basic requirements for such materials are formulated and the main ones are: the front surface must have electrophysical properties of «dielectric and magnetic permeability», at least to ensure low coefficients of reflection of electromagnetic waves. In this case, it is imperative that it simultaneously provides characteristics such as toughness, fire resistance, and non-toxicity. Contents

*of radio-absorbing substances in the interlayers of spherical structures and the growth regularities of the effective dielectric (magnetic) permeability towards the substrate should ensure the broadband and efficiency of the material.*

*The dispersion dependence should ensure uniform absorption of electromagnetic energy in a given frequency range and its transmission from the input surface to the substrate. The calculation of the required thickness of the gradient material for a given reflection coefficient, based on the maximum and minimum wavelengths of the screened field, magnetic permeability, and the thickness of individual layers is provided. The possibility of manufacturing a monolithic metal-polymer screen with a surface layer that has a low dielectric constant due to heat treatment of the material surface during manufacturing is shown. The possibility is shown and technological solutions are provided for creating a monolithic metal-polymer screen with a controlled gradient of a ferromagnetic finely dispersed substance in the direction from the front surface to the bottom. Such material can be applied to control ratios of shielding coefficients of high-frequency electromagnetic fields, electric and magnetic fields of ultralow frequencies, and the accompanying shielding of a natural magnetic field.*

Продовжуючи цикл робіт [1... 2; пат. № 145491 10.12.2020], у яких розглянуто підхід до можливості створення зручного захисного костюму для працівників служб ліній електричних мереж, екранування від електромагнітних полів персоналу і обладнання диспетчерських служб ПС 35-330 кВ та аналогічних служб різноманітних відомств, вкрай необхідно поставити задачу розрахункового визначення та прогнозування захисних властивостей екрануючих матеріалів, розробити основні алгоритми проектування захисних облицювальних матеріалів градієнтного типу, визначити можливості їх застосування для керованого зниження рівнів електромагнітних полів.

Останнім часом, у зв'язку зі зростанням усвідомлення щодо шкідливості гіпогеомагнітного

поля (штучно зниженого природного магнітного поля), необхідності стабільного функціонування засобів бездротового зв'язку з одночасним зниженням напруженостей техногенних полів іншого походження виникла потреба у розробленні захисних матеріалів, які на прийнятному рівні задовольняють ці вимоги. Але суцільні металеві конструкції з регулярними металевими структурами та більшість композиційних матеріалів не відповідають висунутим вимогам. Це обумовлене великими коефіцієнтами відбиття усіх суцільних металевих (кристалічних та аморфних) матеріалів, екранування вузькосмугових високочастотних полів ґратчастими та сітчастими матеріалами, високими коефіцієнтами екранування наднизькочастотних та високочастотних полів компо-

зиційними металовмісними матеріалами.

Для вирішення задач раціоналізації ступенів захисту від електричних, магнітних та електромагнітних полів, виходячи з теоретичних міркувань, доцільно розглянути захисні матеріали градієнтного типу – багат шарові й гетерогенні суцільні з градієнтом електрофізичних та магнітних властивостей у тілі матеріалу.

**Аналіз останніх досліджень і публікацій.** Проблематиці розроблення та дослідження захисних властивостей неоднорідних матеріалів приділяється достатньо уваги [4, 5]. Але розроблені у них технології стосуються вирішення задач електромагнітної сумісності, тобто зниження полів заздалегідь відомих амплітудно-частотних характеристик [6], призначених

також для задач електромагнітної сумісності в авіаційній галузі, тому поряд з фіксованими вимогами щодо захисту у визначеній смузі частот, у цьому матеріалі, багато уваги приділено підвищенню міцнісних характеристик та зниженню ваги.

У ґрунтовній оглядовій роботі [7] показано, що градієнтні властивості можуть мати й матеріали, призначені для індивідуального захисту й мало придатні для облицювання поверхонь. У дослідженні [8] показано, що можливо отримати градієнт фізичних властивостей у гетерогенному матеріалі.

Важливою є задача розрахункового визначення та прогнозування захисних властивостей матеріалів або попередній розрахунок можливої конструкції, виходячи з потрібного функціоналу [9, 10]. Але в першій публікації, хоча йдеться про оптимізацію захисту, задача оптимізації не розв'язувалася ні аналітично, ні графічно. В другій – розроблений матеріал, особливо за вмістом вологи, хоча й має високі функціональні якості, схильний до деградації й неприйнятний для облицювання великих площ.

У матеріалах [11] представлені сучасні підходи до проектування облицювальних поверхонь, параметри яких можна розрахувати. А в роботі [12] показано принципову можливість

раціоналізувати ступені захисту впливу магнітних та електромагнітних полів різнорідних джерел, що є ґрунтом для подальших досліджень.

Вочевидь, сучасні облицювальні матеріали повинні відповідати низці вимог – загальним та спеціальним.

До загальних належать вимоги щодо механічних властивостей – міцності, питомої ваги, надійності (відсутності деградації матеріалу в процесі експлуатації), надійності закріплення на робочих поверхнях, а також високої вогнестійкості й мінімального виділення шкідливих речовин.

До спеціальних вимог належать – високі коефіцієнти екранування в широкому діапазоні частот (з можливістю керування коефіцієнтами поглинання електромагнітної енергії) та мінімально можливі коефіцієнти відбиття електромагнітних хвиль.

Однозначне забезпечення всіх наведених вимог у одному матеріалі на оптимальному рівні практично неможливе, тому існує широка номенклатура захисних та облицювальних матеріалів, які вирішують локальні задачі електромагнітної безпеки. Але існує можливість раціоналізувати співвідношення ступенів захисту для різних критичних частот або частотних смуг магнітних, електричних та електромагнітних полів. Необ-

хідним є досягнення компромісу між бажаним та технічно досяжним ефектом для кожного окремого електромагнітного впливу з урахуванням інших впливів, підходи до екранування яких можуть суперечити один одному. Наприклад, знижуючи рівні техногенних магнітних полів наднизьких частот, включно з промисловою частотою та її гармоніками, ми можемо за певних умов заекранувати природне магнітне поле, що шкідливо для людей і регулюється відповідним нормативом.

У загальному випадку найпростішою задачею є зниження рівнів електромагнітних полів дуже високих, ультрависоких та надзвичайно високих полів частот, притаманних випромінюванню засобів зв'язку та частині промислового та побутового обладнання. Будівлю або окремі приміщення можна заекранувати металевим або композиційним пласким матеріалом, враховуючи малу довжину електромагнітної хвилі і незначні дифракційні явища на кромках захисних конструкцій. Але значний внесок у захист від високочастотних випромінювань припадає на відбиття електромагнітних хвиль, що є небажаним через відбиття в бік інших будівельних приміщень, підвищення електромагнітного фону через перевідбиття всередині будівель і приміщень.

Уникнення такого ефекту можливе за рахунок застосування градієнтних екрануючих матеріалів (багатошарових та суцільних). Не дивлячись на те, що метод зменшення коефіцієнтів відбиття за рахунок створення між двома поверхнями зазору завтовшки у чверть довжини падаючої хвилі, загальновідомий, у багатьох випадках його застосовують невірно (не враховують електрофізичні та магнітні властивості верхнього та нижнього шарів). До того ж така конструкція має вузько-смуговий захист.

Коефіцієнт відбиття електромагнітної хвилі однозначно визначається електричними та магнітними властивостями поверхні. Наприклад, коефіцієнт відбиття електромагнітної хвилі за її нормального падіння на поверхню:

$$K_r = \frac{1 - \sqrt{\epsilon_m}}{1 + \sqrt{\epsilon_m}},$$

де  $\epsilon_m$  — діелектрична проникність поверхневого шару матеріалу, на який падає хвиля.

Для забезпечення широко-смуговості матеріалу чверть-хвильовий проміжок, (або проміжки) слід заповнювати одним з багатьох розроблених радіопоглинальних елементів на основі феритів, вуглецевих з'єднань тощо. При розробленні матеріалу для екранування високочастотних полів необхідно виходити з таких принципів:

— лицьова поверхня повинна мати діелектричну проникність, мінімально можливу за забезпечення заданих вимог до матеріалу (міцність, негорючість тощо);

— вміст радіопоглинальної субстанції у прошарку (прошарках) і закономірність його зміни за товщиною повинні забезпечити поступове зростання еквівалентної (ефективної) діелектричної проникності (в основному уявної частини комплексної діелектричної проникності) у напрямку поверхня падіння хвилі — підкладки;

— дисперсійна залежність повинна забезпечити рівномірне поглинання електромагнітної енергії за її проходження від вхідної поверхні до підкладки і у зворотному напрямку.

Необхідну товщину матеріалу можна оцінити виходячи зі співвідношення [13]

$$|\ln R_r|(\lambda_{\max} - \lambda_{\min}) < \sum_i \mu_i d_i,$$

де  $R_r$  — максимальний коефіцієнт відбиття за потужністю;  $\lambda_{\max}$ ,  $\lambda_{\min}$  — максимальна та мінімальна довжина хвиль частотної смуги;  $\mu_i$  — відносна магнітна проникність кожного  $i$ -того шару;  $d$  — його товщина. Для немагнітних матеріалів у правій частині виразу замість суми береться повна товщина структури матеріалу.

В загальному випадку втрата (поглинання) енергії електро-

магнітних хвиль у середовищі визначається комплексним характером величин його діелектричної та/або магнітної проникностей.

Якщо комплексні проникності:

$$\epsilon = \epsilon' + i\epsilon'', \quad \mu = \mu' + i\mu'',$$

де  $\epsilon'$ ,  $\mu'$  — дійсні, а  $\epsilon''$ ,  $\mu''$  — уявні складові комплексних проникностей, то коефіцієнт втрат (поглинання) визначається як:

$$\alpha = (\sqrt{\epsilon\mu})'',$$

При цьому ослаблення енергії хвилі, що пройшла у середовищі відстань  $d$ , складає

$$\frac{-4\pi\alpha d}{e^{\lambda}},$$

де  $\lambda$  — довжина електромагнітної хвилі у вільному просторі.

Але виробництво багатошарових структур, принаймні таких, що потребують з'єднання шарів, пов'язане з низкою технологічних проблем (забезпечення довготривалої адгезії шарів, точного витримання розмірів проміжків тощо). Крім того, це потребує в якості лицьового шару використовувати матеріали з максимально низькими значеннями  $\epsilon$  та  $\mu$  для мінімізації коефіцієнтів відбиття. При цьому обов'язковою умовою є наявність металевої підкладки у багатошаровій структурі, яка може повністю блокувати сигнали мобільного зв'язку, та на-

веденої частотної компоненти промчастоти.

Застосування композиційних матеріалів — металополімерів — може вирішити задачу одночасного зниження рівнів електричних та магнітних полів наднизьких частот — промислової та її гармонік. Але більшість полімерів мають значні діелектричні проникності. Наприклад, латекс, який застосовувався в якості матриці в роботі [14], має  $\epsilon \approx 24$ , що автоматично забезпечує високі коефіцієнти відбиття. В той же час залізорудний пил, який застосовувався в якості екрануючого наповнювача, має  $\epsilon \approx 1,5$ . Дослідження свідчать, що під час термічної обробки металолатексного матеріалу в приповерхневому шарі відбувається накопичення металовмістких залізорудних частинок. Тобто, зменшити коефіцієнт відбиття матеріалом можливо, створивши градієнт концентрації частинок наповнювача під час нагрівання

і вулканізації поверхневого шару (рис. 1).

Як видно з рисунку, тонкий приповерхневий шар переважно насичений залізорудними частинками, що наближає діелектричну проникність до мінімально можливих для таких композицій значень.

При цьому сам металополімерний композит має, через вміст заліза та його оксидів, високі екранувальні властивості щодо низькочастотних магнітних та електричних полів.

Експериментальні дані та теоретичні міркування свідчать, що з металополімерної суміші можливо отримати захисний матеріал градієнтного типу без накладання окремо вироблених шарів. Для цього необхідно в усьому тілі матриці створити градієнт концентрації екрануючої субстанції у тілі полімерної матриці. Це реалізується за рахунок застосування залізорудного пилу різної дисперсності і ваги

окремих частинок, які з різною швидкістю осідають у рідкій суміші (рис. 2).

Наведений спосіб дозволяє застосовувати у градієнтному матеріалі без металевої підкладки.

Практична реалізація такого способу можлива за рахунок оброблення готової вихідної суміші, наливої на пласку поверхню постійним неоднорідним магнітним полем, що створить градієнт екрануючих частинок з ущільненням у нижній частині кювети з розчином, де розташовані магніти. Але в цьому випадку необхідно застосувати наповнювач з вищими магнітними властивостями, наприклад, залізорудний концентрат, який має дисперсність 150–200 мкм і добре перемішується з рідким полімером. Але одночасне отримання верхнього, насиченого залізорудним пилом шару та поступове ущільнення розподілу частинок у напрямку

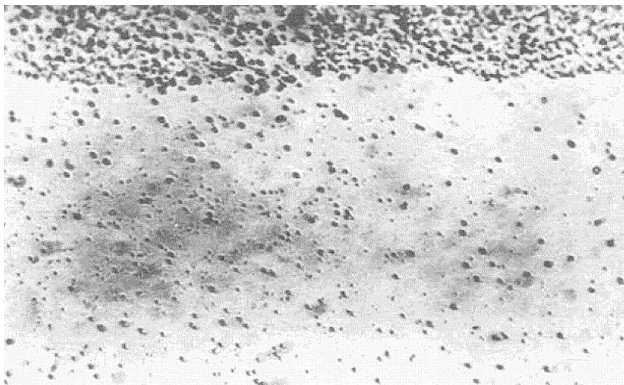


Рис. 1. Переріз термообробленого зразка металополімерного матеріалу

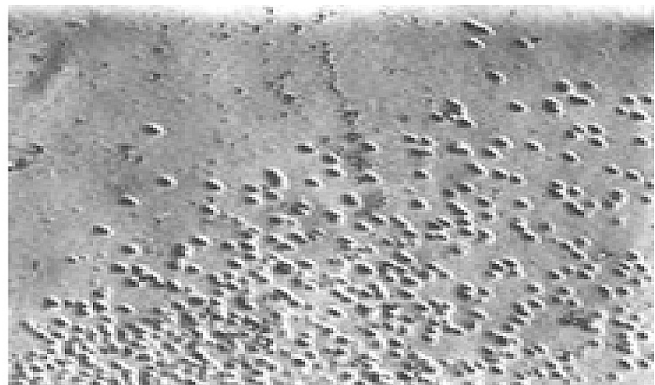


Рис. 2. Градієнт концентрації залізорудних частинок у полімерній матриці

нижньої сторони матеріалу досить складне, тому в кожному конкретному випадку слід визначатися з пріоритетним фактором впливу на електромагнітну обстановку і обирати конструктивні рішення щодо впровадження екранування.

### Висновки

1. Визначено вимоги до сучасних облицювальних матеріалів для екранування електромагнітних полів. Головними з них є: екранування електромагнітних полів частот (смуг частот), притаманних більшості джерел техногенних електромагнітних полів, найбільш критичних з точки зору безпеки людей, механічна міцність, зчеплення з основою, вогнетривкість, нетоксичність.

2. Показано, що екранування полів дуже високих, ультрависоких та надзвичайно високих частот доцільно здійснювати градієнтною багат шаровою структурою, і надано засади її проектування. Надано основні критерії щодо забезпечення необхідного рівня захисту, зокрема до лицьового шару багат шарової конструкції. Запропоновано розрахункове прогнозування ефективності захисної конструкції, виходячи з електрофізичних та магнітних властивостей матеріалів та смуги частот електромагнітного поля, що екрануються.

3. Представлено спосіб отримання поверхневого шару у суцільному матеріалі з малими діелектричними проникностями. Він полягає у поверхневій термообробці рідкої суміші метало-полімеру.

4. Запропоновано спосіб отримання градієнту концентрації металевих і металовмісних частинок у композиційному метало-полімерному матеріалі, що дозволяє виробляти облицювальні матеріали високої ефективності у широкому діапазоні частот. Перевагою такого матеріалу є малі маса та вартість, монолітність, що знижує імовірність розшарування та деградації під впливом фізико-хімічних чинників.

### Література

1. Глива В. А., Левченко Л. О., Коваленко В. В., Осадчий Б. М. Екранування магнітних полів лінійних струмонесучих елементів об'єктів енергетики / Новини енергетики № 6, 2017, с. 28–31.

2. Глива В. А., Осадчий Б. М., Левченко Л. О., Остапенко О. В. Дослідження можливостей створення електромагнітних екранів на основі відходів збагачення залізної руди / Новини енергетики № 9, 2020, с. 11–15.

3. Патент № 145449 Україна МПК G 12 B 17/00 Пристрій для виготовлення магнітного матеріалу на текстильній основі

10. 12. 2020 / Левченко Л. О., Осадчий Б. М., Панова О. В., Бірук Я. І. / Заявники і патентотримувачі; заявл. 27. 07. 2020: опубл. 10.12.2020.; Бюл. № 23.

4. The extension of the Maxwell Garnett mixing rule for dielectric composites with non uniform orientation of ellipsoidal inclusions // Progress in Electromagnetics Research Letters. – 2012. V. 30. P. 173–184.

5. Конструкционный радиопоглощающий материал трехслойной структуры с согласующим слоем [Беляев А. А., Агафанова А. С., Антипова Е. А., Ботаногова Е. Д.] // Труды ВИАМ 2013, № 4, с. 62–68.

6. Панова О. В. Особенности формирования монолитных конструкционных радиопоглощающих материалов на основе композитов, наполненных резистивным волокном [Агафанова А. С., Беляев А. А., Кондрашов Э. К., Романов А. М.] // Авиационные материалы и технологии. – 2013. – № 3. – С. 56–59.

7. Новые технологии создания экранов электромагнитного излучения на основе модифицированных порошковых, наноструктурированных и пленочных материалов [Л. М. Лыньков, В. А. Богущ, Т. В. Борботько и др.] // Доклад БТУИР, 2019. – № 2. – С. 85–99.

8. Glyva V., Kovalenko V., Levchenko L., Tykhenko O.

Research into protective properties of electromagnetic screens based on the metal-containing nanostructures / V. Glyva, V. Kovalenko, L. Levchenko, O. Tykhenko. Восточно-Европейский журнал передовых технологий, — 2017, 50–56 с.

9. *Беляев А. А., Широков В. В., Романов А. М.* Особенности оптимизации резонансных радиопоглощающих материалов немагнитного типа // Труды ВИАМ. — 2014. — № 11. С. 62–68.

10. *Украинец Е. А., Колбун Н. В.* Экранирующие свойства многослойных конструкций электромагнитных экранов на основе материалов с малоразмерными включениями металлов и жидких сред // Доклады БГУИР. — 2013. — № 4. — С. 115–118.

11. *Глива В. А., Левченко Л. О., Панова О. В., Тихенко О. М., Радомська М. М.* Композиційний металополімерний облицювальний матеріал для екранування електромагнітних полів. Тези доповідей IV Міжнародної науково-практичної конференції «Інноваційні технології в архітектурі і дизайні». 21–22 травня 2020 р. Харків, ХНУБА. Секція 4 «Новітні будівельні матеріали та сучасні технології в архітектурі та дизайні», с. 155–158. <http://www.itad.com.ua/%D0%9A%D0%BE%D0%BD%D1%84%D0%B5%D1%80%D0%B5%D0%BD%D1%86%D1%96%D1%8F-2020/>

12. *Касаткіна Н. В., Левченко Л. О., Панова О. В., Тихенко О. М., Ченчевой В. В.* Оптимізація параметрів екранування електромагнітних по-

лів різномірних джерел у виробничих будівлях. ВІСТІ Донецького гірничого інституту № 1 (46). 2020. ISSN 1999-981X/Розділ — безпеки життєдіяльності. <https://doi.org/10.31474/1999-981x-2020-1-181-188>

13. *Розанов К. А.* Фундаментальные ограничения для ширины рабочего диапазона радиопоглощающих покрытий // Радиотехника и электроника. — 1999. — Т. 44. — С. 526–530.

14. *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. — Р. 14–18. DOI: <https://doi.org/10.15407/techned.2018.04.014>.

## «Новини енергетики»

щомісячний науково-технічний інформаційно-аналітичний журнал

### П І Д П И С К А :

#### Через відділення УКРПОШТИ:

Передплатний індекс за Каталогом видань України на 2021 рік: **08231**

#### Через видавця: ДП «НТУКЦ»

тел. (044) 425-49-92; факс (044) 482-55-36  
e-mail: [ntukc@bigmir.net](mailto:ntukc@bigmir.net)

Адреса редакції: 04080, Київ-80, вул. Кирилівська, 19-21, офіс 910

#### У передплатній агенції ТОВ «ПресЦентрКиїв»

тел./факс (044) 536-11-75; (044) 536-11-80  
e-mail: [podpiska1@prescentr.kiev.ua](mailto:podpiska1@prescentr.kiev.ua)

Передплата он-лайн:

<http://www.prescentr.kiev.ua/list/product/15346>

