

Проектування рідинних композиційних матеріалів для екранування електромагнітних полів

В. А. Глива, В. С. Бахарєв, Н. В. Касаткіна, О. Г. Левченко, Л. О. Левченко,
Н. Б. Бурдейна, С. Г. Гузій, О. В. Панова, О. М. Тихенко, Я. І. Бірук

Розроблено засади проектування та досліджено захисні властивості рідинних матеріалів для екранування електричних, магнітних та електромагнітних полів широкого частотного діапазону. Матеріали виготовлялися на основі концентрату залізної руди та пігментної добавки, у якості матриці були використані водно-дисперсна та геополімерна фарби. Випробування захисних властивостей для електричних та магнітних складових електромагнітного поля промислової частоти показали, що коефіцієнти екранування електричного поля за концентрації екрануючої речовини 15–60 % (за вагою) – 1,1–8,6; магнітного поля – 1,2–5,3. Коефіцієнти екранування матеріалу на основі водно-дисперсної фарби нижчі за геополімерну, що можна пояснити окисленням залізовмісної компоненти і зниження електричної провідності. Коефіцієнти екранування електромагнітного поля частотою 2,45 ГГц складають 1,2–7,9. Найбільші коефіцієнти притаманні матеріалу з наповнювачем із залізорудного концентрату та титановмісного пігментного порошку в пропорції 1:1.

Для проектування матеріалів з необхідними (прогнозованими) захисними властивостями було розраховано відносні магнітну, діелектричну проникності матеріалів. Показано, що отримані дані прийнятно збігаються з результатами прямих вимірювань магнітної та діелектричної проникностей і можуть бути використані для розрахунку хвильового опору матеріалу та прогнозованого коефіцієнта відбиття електромагнітних хвиль. Таким чином, є підстави стверджувати про необхідність формування бази даних щодо частотної залежності ефективних магнітної та діелектричної проникностей для автоматизації процесів проектування композиційних матеріалів із заданими захисними властивостями.

Ключові слова: електромагнітне поле, коефіцієнт екранування, магнітна проникність, діелектрична проникність, композиційні матеріали.

1. Вступ

Світовий науково-технічний розвиток призвів до того, що спостерігається стає підвищення електромагнітного навантаження на виробниче середовище і довкілля в цілому. Це обумовлено підвищенням кількості і щільності розташування електричного та електронного обладнання у виробничих приміщеннях, збільшенням навантаження на силові електричні мережі та розвитком засобів бездротового зв'язку. Перехід на стандарти мобільного зв'язку 5G із застосуванням електромагнітних випромінювань надзвичайно високих частот вимагає збільшення кількості і щільності розташування базових станцій підвищення

гранично допустимих рівнів випромінювань. Тому вивченню даної проблеми приділяється багато уваги. Ще у 1995 році Всесвітня організація охорони здоров'я (ВООЗ) офіційно запровадила термін «глобальне електромагнітне забруднення». ВООЗ включила проблему електромагнітного забруднення в перелік пріоритетних проблем людства, а в 1996 році ВООЗ був створений міжнародний проєкт, щодо визначення потенційних ризиків для здоров'я, пов'язаних з технологіями, які генерують електромагнітні поля. ВООЗ вимагає максимального зниження рівнів полів до чіткого з'ясування меж допустимого впливу електромагнітних полів в залежності від частот і амплітуд. Так, на електромагнітні поля розповсюджено принцип максимального їх зниження у виробничих умовах до отримання надійних і однозначних даних щодо гранично допустимих рівнів. Тобто, на цей фізичний фактор розповсюджується принцип ALAR (as low as reasonably – настільки низький, наскільки це розумно досяжно). Цей принцип використовується навіть у розвинутих країнах у варіанті ALARP (as low as reasonably practicable), який передбачає встановлення розумного рівня небезпеки настільки низьким, наскільки це може бути досягнуто практично з урахуванням соціальних чинників. Цей принцип вимагає від роботодавця створення умов максимального зниження ризиків негативних зрушень у здоров'ї працівників під впливом електромагнітного фактора.

В той же час, медичні дослідження свідчать про можливості несприятливих зрушень у здоров'ї людей під впливом електромагнітних полів малих напруженостей [1, 2]. Це вимагає обґрунтування та розроблення відповідних заходів і засобів захисту людей у виробничих та побутових умовах. Найбільш ефективним методом зниження рівнів електромагнітних полів широко частотного діапазону є екранування. В умовах значного внеску у електромагнітну обстановку електромагнітних полів ультрависоких і вищих частот застосування традиційних металевих екрануючих поверхонь не завжди прийнятно через високі коефіцієнти відбиття. Це обумовлює можливе спрямування відбитих випромінювань у небажаний бік. Найбільш прийнятними є композиційні екрануючі матеріали, основною перевагою яких є керованість коефіцієнтами екранування за рахунок зміни концентрації екрануючої речовини у матриці. Недоліки застосування композиційних матеріалів – складність технологій виготовлення та висока вартість. Але більшість з них мають великі товщини, що ускладнює їх застосування для облицювання поверхонь великих площ, та високі вартості. Тому актуальним є розроблення високоефективних, ширококутових і зручних в експлуатації композиційних матеріалів. Для вирішення задач екранування окремих приміщень, частин будівель, доцільно дослідити можливості вироблення і застосування екрануючих матеріалів на рідинних носіях. Такі матеріали є більш практичними під час нанесення на поверхні будь-якої форми з мінімальною кількістю відходів і регулюванням товщини захисного шару.

2. Аналіз літературних джерел і постановка проблеми

Розробленню та дослідженню захисних властивостей композиційних матеріалів для екранування електромагнітних полів приділяється багато уваги. Більшість з них є металополімерними структурами. У дослідженні [3] визначено

захисні властивості матеріалу з полімерної матриці та металевого наповнювача з феритів мікророзмірів. Останнім часом значна частина робіт присвячена розробленню композицій на основі металевих та металовмісних наноструктур. У статті [4] описано захисний матеріал на основі нанокарбону з матрицею зі складного вуглеводневого полімера. У [5] матриця виготовлена з поширеного поліпропілену, а наповнювач – наночастинки типу феритів та графені. Наведені матеріали мають вищі, порівняно із композиційними матеріалами з мікрочастинками, коефіцієнти екранування. Але залишилися невирішеними питання, пов'язані з технологіями виготовлення та великою вартістю. Таким матеріалом важко облицювати поверхні складної конфігурації. У багатьох випадках виникають проблеми з адгезією полімера. Більш прийнятними є рідинні захисні матеріали, які можна наносити на поверхні будь-якої форми з потрібною товщиною. Саме такий підхід використаний у роботі [6], де наведено результати досліджень композиції типу шпатлівки з вмістом вольфраму (70 %), нікелю (18,6 %) та вуглецю (11,4 %). Але такий матеріал призначений для захисту від іонізуючих випромінювань і розроблений для заміщення свинцю. У дослідженні [7] запропоновано матеріал на основі карбону та аерогелю. Однак, за прийнятних захисних властивостей механічні властивості покриттів незадовільні. Розробка [8] і наведені коефіцієнти екранування свідчать про можливість виготовлення захисних шпатлівок та штукатурок введенням у них магнітного та діелектричного наповнювача. Але їх товщини – до 10 мм, а покриття двошарове. Це ускладнює практичне застосування і підвищує вартість робіт. Ґрунтовні дослідження [9, 10] показали, що застосування дрібнодисперсного графіту та графітизованої сажі у якості наповнювача полімерної матриці забезпечує високі коефіцієнти екранування у широких смугах частот. Але ці наповнювачі (особливо графітизована сажа) виробляється у малих обсягах і мають високу вартість. Полімерна матриця не завжди забезпечує зручність облицювання поверхонь складної конфігурації. У роботі [11] наведені результати досліджень реологічних та адсорбційних властивостей водно-дисперсних та синтетичних фарб на основі геополімерів. Все це надає підстави припустити, що такі фарби можливо використовувати у якості основи металовмісних композицій для екранування електромагнітних полів. Доцільним також є проведення досліджень щодо їх коефіцієнтів екранування електричних, магнітних та електромагнітних полів найбільш поширених частот.

Проведений аналіз дозволяє дійти висновку, що більшість композиційних матеріалів проектується для вузького призначення. За функціональними можливостями та вартістю вони не пристосовані для облицювання поверхонь великих площ та складних конфігурацій. Фактологічний матеріал щодо захисних властивостей рідинних матеріалів на стандартних лакофарбових носіях відсутній. Відомі аналітичні співвідношення щодо визначення магнітних та електрофізичних сумішей не адаптовані до прогнозування магнітних, електрофізичних властивостей рідинних композиційних матеріалів. Вирішення наведених задач дозволить сформувати загальні засади проектування широкосмугових електромагнітних екранів на рідинному носії.

3. Мета і задачі дослідження

Метою дослідження є виявлення захисних властивостей матеріалів на основі фарб з різним вмістом металевої субстанції, надання розрахункового апарату для розроблення електромагнітних екранів з керованими захисними властивостями.

Для досягнення поставленої мети сформульовано наступні задачі:

- дослідити коефіцієнти екранування рідинними композиційними матеріалами електричних, магнітних полів промислової частоти та електромагнітних полів ультрависокої частоти;
- розробити засади проектування захисних матеріалів за рахунок прогнозування магнітних та електрофізичних властивостей матеріалів за різних співвідношень вмісту компонентів.

4. Матеріали та методи дослідження рідинних композиційних матеріалів для екранування електромагнітних полів

Для зручності нанесення захисного матеріалу на поверхні у якості матриці було обрано готові фарби двох типів. Перша – акрилова водно-дисперсійна фарба VD-AK-22W (Білорусь) ($\rho=1,03 \text{ г/см}^3$), друга – геополімерна фарба МК 3/18-9.20 (Україна) ($\rho=1,15 \text{ г/см}^3$).

У якості екрануючого наповнювача використовувався дрібнодисперсний концентрат залізної руди, отриманий методом флотації (flotation) на Полтавському гірничозбагачувальному комбінаті (Україна) зі вмістом Fe – 68–72 %, Fe_3O_4 – 20–22 % ($\rho=6,24 \text{ г/см}^3$). Також у якості наповнювача використовувалася пігментна суміш GreyX виробництва LTD «Українська мінеральна компанія», м. Київ (Україна) з вмістом Al_2O_3 – 50 %, TiO_2 – 25 %, Fe_2O_3 – 10 %.

Відомо [12], що ефективність екранування залежить від дисперсності наповнювача, тому було виконано гранулометричний аналіз сумішей стандартним методом седиментації (sedimentation). Середній розмір частинок залізорудного концентрату після подрібнення складав 22–23 μm , суміші GrayX – 8–9 μm . Екрануючі суміші виготовлялися перемішуванням фарби з потрібною кількістю наповнювача у лабораторному дисольвері (dissolver). Було виготовлено три типи екрануючого захисного матеріалу:

- водно-дисперсійна фарба з додаванням залізорудного концентрату у вагових кількостях 15, 30, 45, 60 % (матеріал № 1);
- геополімерна фарба з додаванням залізорудного концентрату у вагових кількостях 15, 30, 45, 60 % (матеріал № 2);
- геополімерна фарба з додаванням суміші залізорудного концентрату та GreyX у пропорції 1:1 у вагових кількостях 15, 30, 45, 60 % (матеріал № 3).

Усі отримані матеріали наносилися на поверхні. Після висихання товщина захисного шару складала 0,22–0,25.

Вимірювання напруженості електричної та магнітної складових електромагнітного поля промислової частоти здійснювалося каліброваним вимірювачем. ВЕ-метр модифікації «АТ-004» та «50 Hz» з блоком управління «НТМ-термінал» (Російська Федерація) згідно інструкції з експлуатації. Межа допустимої відносної похибки вимірювань середньоквадратичних значень напруже-

ностей електричного та магнітного полів складала 15 %. Для визначення коефіцієнтів екранування електромагнітних полів ультрависоких частот використовувався калібрований вимірювач щільності потоку енергії ПЗ-31 (Російська Федерація) згідно інструкції з експлуатації. Максимальна основна похибка вимірювань не перевищувала 2,7 dB.

Вимірювання коефіцієнтів екранування здійснювалося для геометрично замкнених екранів кубічної форми, розмірами 0,2×0,2×0,2 м, виготовлених з гіпсокартону та вкритих захисною сумішшю.

Вимірювальна антена вміщувалася всередину екрануючої конструкції крізь технологічний отвір, який у процесі вимірювання був щільно зачинений.

5. Дослідження захисних властивостей рідинних композиційних матеріалів щодо екранування електромагнітних полів

5. 1. Дослідження коефіцієнтів екранування електричних, магнітних та електромагнітних полів широкого частотного діапазону

Результати вимірювання коефіцієнтів екранування електричного поля промислової частоти напруженістю 178–180 V/m розробленими матеріалами наведено у табл. 1 та на рис. 1.

Зразок матеріалу № 1 – водно-дисперсійна фарба з додаванням залізорудного концентрату у вагових кількостях 15, 30, 45, 60 %.

Зразок матеріалу № 2 – геополімерна фарба з додаванням залізорудного концентрату у вагових кількостях 15, 30, 45, 60 %.

Зразок матеріалу № 3 – геополімерна фарба з додаванням суміші залізорудного концентрату та GreyX у пропорції 1:1 у вагових кількостях 15, 30, 45, 60 %.

Результати вимірювання коефіцієнтів екранування магнітного поля промислової частоти індукцією 280–285 μT наведено у табл. 2 та на рис. 2

Таблиця 1

Коефіцієнти екранування K_S електричного поля промислової частоти*

Зразок матеріалу	K_S			
	15 %	30 %	45 %	60 %
№ 1	1,1–1,2	1,3–1,4	1,6–1,7	2,8–2,9
№ 2	1,1–1,2	1,6–1,7	2,9–3,0	5,2–5,3
№ 3	1,3–1,4	1,8–1,9	4,2–4,3	8,5–8,6

Примітка: *Коефіцієнт екранування $K_S = E_f / E_s$, де E_f – напруженість електричного поля джерела, E_s – напруженість електричного поля у зоні, захищеній екраном

Таблиця 2

Коефіцієнти екранування K_S магнітного поля промислової частоти

Зразок матеріалу	K_S			
	15 %	30 %	45 %	60 %
№ 1	1,2–1,3	1,5–1,6	2,5–2,6	3,7–3,8
№ 2	1,4–1,5	1,9–2,0	3,8–3,9	7,7–7,8
№ 3	1,2–1,3	1,6–1,7	2,8–2,9	5,6–5,7

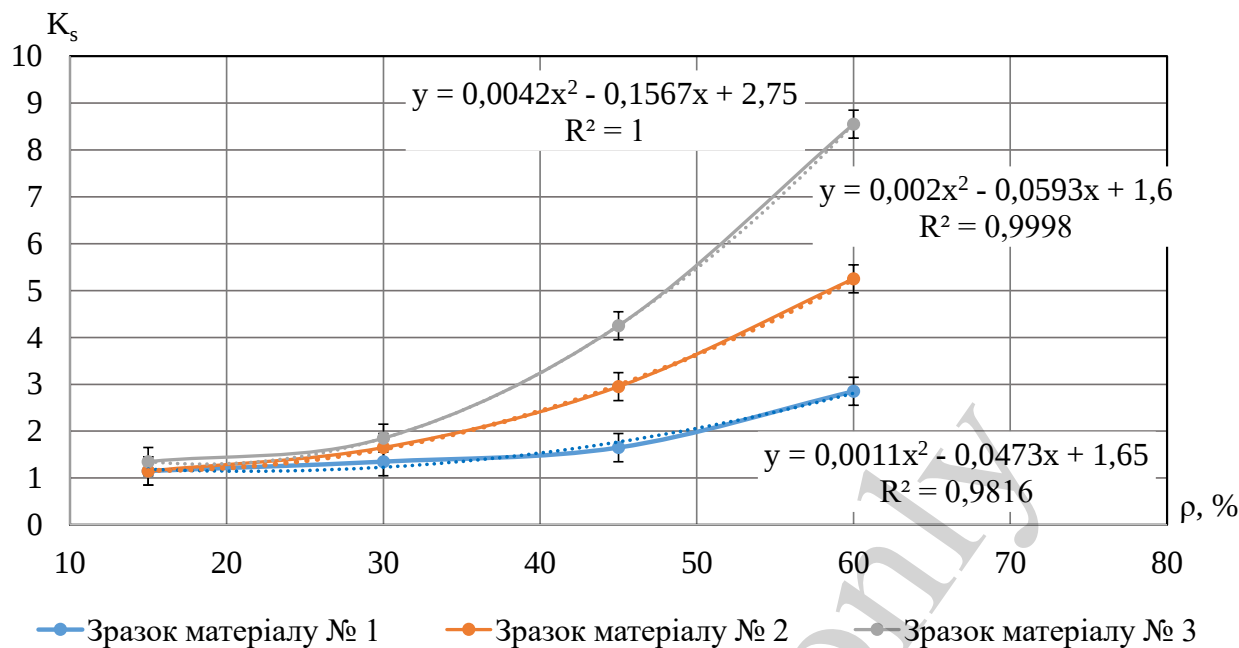


Рис. 1. Залежність коефіцієнтів екранування K_s електричного поля промислової частоти від вмісту екрануючої субстанції

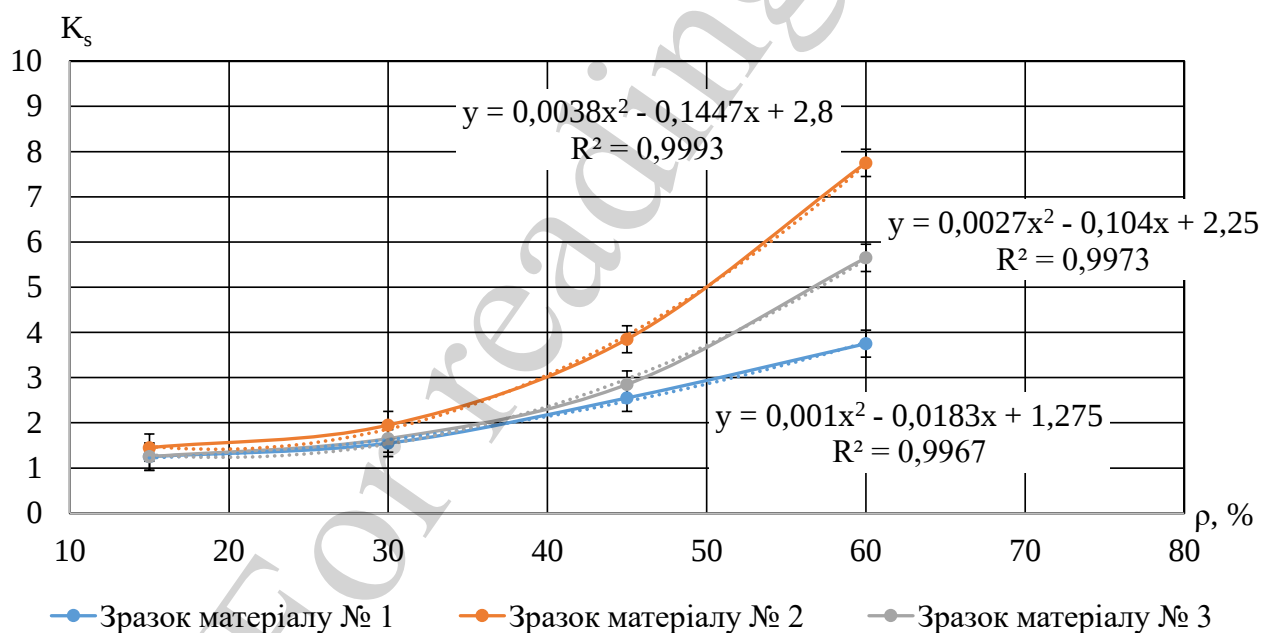


Рис. 2. Залежність коефіцієнтів екранування K_s магнітного поля промислової частоти від вмісту екрануючої субстанції

Результати вимірювань коефіцієнтів екранування електромагнітного поля частотою 2,45 GHz щільністю потоку енергії 178–182 $\mu\text{W}/\text{cm}^2$ наведено у табл. 3 та на рис. 3.

Для високочастотних випромінювань важливим є внесок захисту за рахунок відбиття електромагнітних хвиль у загальний коефіцієнт екранування (мо-

жливість відбиття у небажаний бік). Коефіцієнти відбиття, виміряні за методикою, описаною у [12], наведено у табл. 4 та на рис. 4.

Таблиця 3

Коефіцієнти екранування K_S електромагнітного поля ультрависокої частоти

Зразок матеріалу	K_S			
	15 %	30 %	45 %	60 %
№ 1	1,2–1,3	1,3–1,4	1,8–1,9	4,0–4,1
№ 2	1,3–1,4	1,6–1,7	2,9–3,0	5,5–5,6
№ 3	1,7–1,8	2,3–2,4	4,0–4,1	7,8–7,9

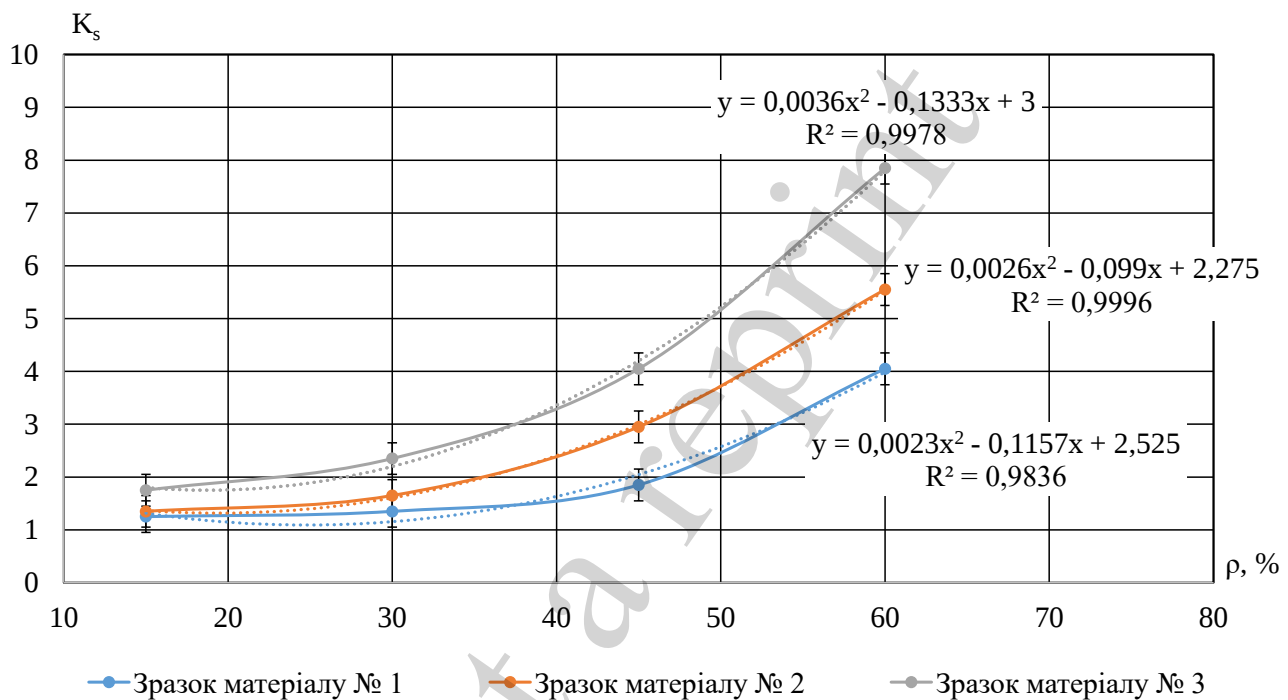


Рис. 3. Залежність коефіцієнтів екранування K_S електромагнітного поля ультрависокої частоти від вмісту екрануючої субстанції

Таблиця 4

Коефіцієнти відбиття K_r електромагнітного поля ультрависокої частоти*

Зразок матеріалу	K_r			
	15 %	30 %	45 %	60 %
№ 1	–	–	0,10–0,15	0,22–0,23
№ 2	–	–	0,15–0,18	0,28–0,29
№ 3	–	–	0,22–0,24	0,32–0,34

Примітка: *Ефект відбиття для концентрацій наповнювача 15, 30 % – за межами чутливості вимірювального приладу

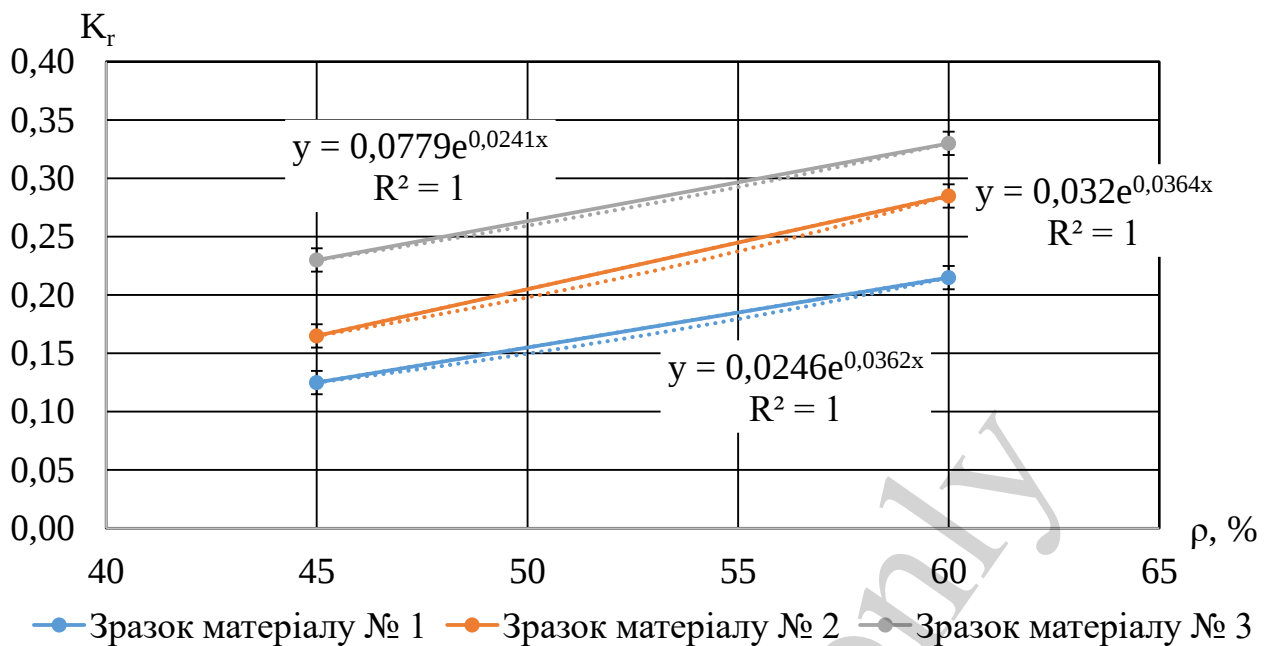


Рис. 4. Залежність коефіцієнтів відбиття K_r електромагнітного поля ультрависокої частоти від вмісту екрануючої субстанції

Отримані коефіцієнти кореляції свідчать про достовірність результатів. Статистична обробка експериментальних даних дозволила отримати аналітичні функції залежності коефіцієнта екранування від вмісту екрануючого матеріалу. Ці функції у процесі проектування захисного матеріалу надають можливість однозначно визначити вміст екрануючого наповнювача у діелектричній матриці для отримання необхідного коефіцієнта екранування як низькочастотного, так і високочастотного електромагнітного поля.

Наведені результати свідчать, що розроблені матеріали придатні для захисту людей від електромагнітних впливів у виробничих та побутових умовах, принаймні за вмісту екрануючої субстанції більше 45 % (за вагою). Вміст наповнювачів за об'ємом є набагато меншим через значні відмінності густин металовмісного наповнювача й використаних фарб. Тому наповнювач суттєво не впливає на зчеплення фарби з поверхнею, що є важливим для практичного застосування отриманих захисних матеріалів.

5. 2. Розроблення засад проектування захисних матеріалів за рахунок прогнозування магнітних та електрофізичних властивостей матеріалів

Для розрахунків з проектування захисних конструкцій потрібної ефективності необхідні кількісні значення магнітних та електрофізичних характеристик матеріалів – ефективних магнітної та діелектричної проникностей, а також питомої провідності. Але для композиційних матеріалів ці дані відсутні. Тому їх доцільно розрахувати, виходячи з параметрів компонентів композиції та співвідношення їх вмісту у матеріалі.

Припустимо, що частинки наповнювача однакові за розміром та формою і розподілені у діелектричній матриці рівномірно. Вважаємо, що об'ємний коефі-

цієнт заповнення матриці екрануючими частинками невеликий, тобто частинки не впливають одна на одну. У цьому випадку можна використати співвідношення Лорентца (Lorentz) для магнітної проникності магнітодіелектриків:

$$\mu = 1 + \frac{\nu_m(\mu_m - 1)}{1 + \frac{1 - \nu_m}{3}(\mu_m - 1)}, \quad (1)$$

де μ – ефективна магнітна проникність магнітодіелектрика, μ_m – магнітна проникність наповнювача, ν_m – об’ємний вміст наповнювача у матеріалі.

У більшості випадків при виготовленні композиції зручно змінювати ваговий вміст наповнювача (як у даній роботі), що обумовлено його порошкоподібним станом та високою дисперсністю.

Для перерахунків слід користуватися співвідношенням:

$$\frac{V_m}{V_d} = \frac{k\rho_d}{\rho_m}, \quad (2)$$

де V_m , V_d – об’єми наповнювача та діелектрика; ρ_m , ρ_d – густина наповнювача та діелектрика; $k = \frac{P_m}{P_d}$ – відношення ваги наповнювача та діелектрика.

Для визначення ефективної діелектричної проникності композиції ε доцільно скористатися співвідношенням Максвелла-Гарнета (Maxwell-Garnet), яка справедлива для $\nu_m < 1/3$:

$$\frac{\varepsilon - \varepsilon_d}{\varepsilon + 2\varepsilon_d} = \nu_m \frac{\varepsilon_m - \varepsilon_d}{\varepsilon_m + 2\varepsilon_d}, \quad (3)$$

ε_d , ε_m – діелектричні проникності матриці та наповнювача, ν_m – об’ємна доля наповнювача у діелектричній матриці.

Матеріали матриці та наповнювача поширені, тому їх діелектричні проникності відомі. У разі потреби, ці величини можна виміряти стандартними приладами.

У багатьох випадках частинки наповнювача не можна вважати сферичними, тому для визначення ефективної діелектричної проникності композиції доцільно скористатися формулою Оделевського (Odelevsky):

$$\varepsilon = \varepsilon_d \left[1 + \frac{\nu_m(\varepsilon_m - \varepsilon_d)}{\left(1 - \frac{\nu_m}{\nu_k}\right) F(\varepsilon_m - \varepsilon_d) + \varepsilon_d} \right], \quad (4)$$

де ε_d , ε_m – діелектричні проникності матриці та наповнювача, v_m – об’ємний вміст наповнювача, v_k – критичний об’ємний вміст наповнювача, за якого екрануючі частинки контактують між собою, F – коефіцієнт деполяризації:

$$F = \ln\left(\frac{2l}{d}\right) / \left(\frac{l}{d}\right)^2, \quad (5)$$

де l – середня довжина частинки, d – середній діаметр.

$$v_k = \frac{[3F(1-F)]^{0,6}}{[4F\sqrt{l/d} + (1+F)/\sqrt{l/d}]^{0,6}}. \quad (6)$$

Показник v_k є дуже важливим для проектування композиційних матеріалів. Як показано у [10], різке підвищення коефіцієнта екранування спостерігається за досягнення порогу протікання електричного струму (формуються ланцюги провідності при контакті частинок наповнювача). Це узгоджується з положеннями електродинаміки суцільних середовищ.

Розраховувачи ефективні значення магнітної та діелектричної проникностей, можна визначити усі параметри, які потрібні для проектування захисного матеріалу. Виходячи зі співвідношення

$$\varepsilon = \varepsilon' + i\varepsilon'' \quad (7)$$

та враховуючи, що у діапазоні наднизьких та низьких частот уявна частина комплексної діелектричної проникності ε'' набагато більша за ε' , якою можна знехтувати

$$\varepsilon = \varepsilon'' = \frac{4\pi\sigma}{\omega}, \quad (8)$$

де σ – питома провідність матеріалу, ω – колова частота електромагнітного поля.

Це співвідношення надає можливість визначити питому провідність матеріалу. З отриманих даних можна визначити еквівалентну глибину проникнення поля у матеріал (глибина, на якій поле знижується у $e=2,7$ разів).

Наприклад, для електромагнітних полів ультрависоких і вищих частот еквівалентна глибина проникнення δ визначається як:

$$\delta = \sqrt{\frac{2}{\omega\mu_a\sigma}}, \quad (9)$$

де μ_a – абсолютна магнітна проникність, $\mu_a = \mu_0\mu$

Якщо, наприклад, поле потрібно зменшити у 10 разів, то товщина захисного екрану не повинна бути меншою за 2,3 δ .

Отримані дані надають можливість попередньо оцінити співвідношення основних параметрів захисного композиційного матеріалу, прискорити і знизити вартість проектних робіт.

6. Обговорення результатів дослідження захисних властивостей композиційних матеріалів та визначення шляхів їх вдосконалення

Аналіз результатів вимірювань, наведених у табл. 1–3, свідчить, що загальні коефіцієнти екранування за вмістом наповнювача 45 % і 60 % (за вагою) цілком прийнятні для практичного застосування розроблених сумішей. Найнижчі коефіцієнти екранування матеріалу на основі водно-дисперсної фарби можна пояснити частковим окисленням наповнювача у присутності води. Цей ефект не проявляється за таких концентрацій залізорудного концентрату у геополімерній фарбі. Відомо, що захисні властивості значною мірою залежать від провідності матеріалу. Тому за наявності контакту між окремими частинками провідність у сумішах № 2 та № 3 більша через відсутність окислення та більшу провідність матеріалу GreyX порівняно з концентратом руди. Крім того, його дисперсність вища, що спрощує утворення ланцюгів провідності.

Перерахунок концентрацій наповнювача за вагою у об'ємну концентрацію за співвідношеннями, наведеними у розділі 6, свідчать, що ваговим концентраціям 45 % і 60 % відповідають об'ємні 15 % та 28 %. За таких концентрацій досягається поріг провідності і відбувається значне підвищення коефіцієнтів екранування.

Для проектування захисних матеріалів необхідні відомості про магнітні та електрофізичні властивості матеріалів за визначених об'ємних концентрацій наповнювача. Розраховані значення відносної магнітної проникності матеріалів складають 1,27–1,48. Ці дані було порівняно з результатами прямих вимірювань відносної магнітної проникності за методикою, описаною у [13]. Наприклад, для суміші № 2 відносна магнітна проникність становить 1,50–1,51, що прийнятно збігається з розрахованим значенням (1,48).

Розраховані відносні діелектричні проникності складають 3,42–3,65, а виміряні – 3,45–3,68. Наприклад, для суміші № 3 відносна діелектрична проникність максимальна. Наведене обумовлює найбільший коефіцієнт екранування магнітної складової електромагнітного поля промислової частоти матеріалом № 2 та електричної складової – матеріалом № 3. При цьому розраховані питомі провідності мають порядок 10^{-3} S/m, що виявляється достатнім для забезпечення прийнятних коефіцієнтів екранування. Підвищення провідності матеріалів призводить до небажаного підвищення коефіцієнтів відбиття. Цей коефіцієнт залежить від співвідношень хвильових опорів Z середовища розповсюдження електромагнітних хвиль (повітря) та захисного матеріалу, які визначаються зі співвідношення:

$$Z = \sqrt{\frac{\mu_a}{\varepsilon_a}}, \quad (10)$$

де μ_a – абсолютна магнітна проникність матеріалу, ε_a – абсолютна діелектрична проникність (60 %).

Для матеріалу № 1 хвильовий опір складає 249 Ω .

Визначення коефіцієнта відбиття здійснюється за відомим співвідношенням:

$$K_S = \frac{Z_1 - Z_2}{Z_1 + Z_2}, \quad (11)$$

де Z_1 і Z_2 – хвильові опори середовища розповсюдження електромагнітних хвиль і захисного матеріалу.

Враховуючи, що хвильовий опір повітря 377 Ω , коефіцієнт відбиття матеріалу $K_S=0,2$, що прийнятно збігається з експериментальними даними, наведеними у табл. 4.

Наведене свідчить, що за наявності даних про електромагнітну обстановку у конкретних умовах і необхідних ступенях екранування (порівняння з гранично допустимими значеннями) можливе попереднє розрахункове оцінювання складу екрануючої суміші для виготовлення захисного екрана.

Проведене дослідження має певні обмеження. Вимірювання загальних коефіцієнтів екранування та коефіцієнта відбиття електромагнітних хвиль виконано для типових частот і обмежених концентрацій екрануючої субстанції у діелектричній матриці.

Недоліком дослідження є відсутність даних у довідкових джерелах щодо магнітних та електрофізичних властивостей композиційних матеріалів. Однак в перспективі цей недолік можна усунути за рахунок створення довідкової бази даних щодо електрофізичних властивостей композиційних матеріалів. Визначення ефективності захисного матеріалу у залежності від умов його застосування є важливим для впровадження автоматизованого проектування захисних композиційних матеріалів. Для автоматизації процесів проектування захисних матеріалів і конструкцій потрібної ефективності доцільно виконати серію експериментальних і теоретичних досліджень. Проведення таких досліджень зумовлено необхідністю створення бази даних щодо фактичних значень і частотних залежностей ефективних магнітної та діелектричної проникностей та їх питомих провідностей від складу та фізичних характеристик компонентів композиційних матеріалів.

7. Висновки

1. Для виготовлення рідинних композицій для екранування електричних, магнітних та електромагнітних полів найбільш поширених частот доцільне використання серійних фарб з додаванням у якості екрануючої субстанції концентрату залізної руди та пігментних металовмісних добавок. Вміст екрануючої

субстанції до 60 % (за вагою) для використаних наповнювачів відповідає вмісту за об'ємом до 28 % і суттєво не впливає на адгезію суміші до поверхонь, на які нанесені композиційні матеріали. Загальні коефіцієнти екранування електромагнітного поля промислової частоти шарів суміші завтовшки 0,22–0,25 mm за вмісту екрануючої субстанції 15–60 % (за вагою) для водно-дисперсної фарби складають 1,1–2,9; для геополімерної фарби – 1,1–5,3. Додавання у суміш 50 % пігментної металовмісної субстанції GreyX підвищує коефіцієнти екранування до 8.6. Коефіцієнти екранування магнітного поля мають також прийнятні значення. Коефіцієнти екранування електромагнітного поля ультрависокої частоти – до 7,9. Низькі коефіцієнти екранування матеріалу на основі водно-дисперсної фарби можна пояснити окисленням металевого наповнювача і зниженням електропровідності матеріалу. За наявності наповнювача до 60 % коефіцієнт відбиття електромагнітного поля ультрависокої частоти не перевищує 0,23 для водно-дисперсної фарби і 0,34 для геополімерної. Це дозволяє обирати склад композиції з потрібними захисними властивостями.

2. Показано, що прогнозування захисних властивостей матеріалів можливе за рахунок розрахунку магнітних та електрофізичних властивостей матеріалу. Застосовані припущення (частинки точкові, рівномірно розподілені у тілі матриці) не вносять суттєвої похибки у результаті відносних обчислень. Розраховані значення магнітної проникності для обраного матеріалу складають 1,48, виміряні – 1,50–1,51; для відносної діелектричної проникності розраховані – 3,65, виміряні – 3,65. При цьому коефіцієнт відбиття електромагнітних хвиль ультрависокої частоти за розрахунками складає 0,20, а вимірний експериментально – 0,22–0,23. Це свідчить про можливість розрахункового визначення ефективності захисного матеріалу у залежності від умов його застосування і впровадження автоматизованого проектування захисних композиційних матеріалів.

Література

1. Vergallo, C., Dini, L. (2018). Comparative Analysis of Biological Effects Induced on Different Cell Types by Magnetic Fields with Magnetic Flux Densities in the Range of 1–60 mT and Frequencies up to 50 Hz. *Sustainability*, 10 (8), 2776. doi: <https://doi.org/10.3390/su10082776>
2. Duhaini, I. (2016). The effects of electromagnetic fields on human health. *Physica Medica*, 32, 213. doi: <https://doi.org/10.1016/j.ejmp.2016.07.720>
3. Patil, N., Velhal, N. B., Pawar, R., Puri, V. (2015). Electric, magnetic and high frequency properties of screen printed ferrite-ferroelectric composite thick films on alumina substrate. *Microelectronics International*, 32 (1), 25–31. doi: <https://doi.org/10.1108/mi-12-2013-0080>
4. Mondal, S., Ganguly, S., Das, P., Khastgir, D., Das, N. C. (2017). Low percolation threshold and electromagnetic shielding effectiveness of nano-structured carbon based ethylene methyl acrylate nanocomposites. *Composites Part B: Engineering*, 119, 41–56. doi: <https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2017.03.022>
5. Yadav, R. S., Kuritka, I., Vilcakova, J., Machovsky, M., Skoda, D., Urbanek, P. et. al. (2019). Polypropylene Nanocomposite Filled with Spinel Ferrite NiFe₂O₄ Nanoparticles and In-Situ Thermally-Reduced Graphene Oxide for Elec-

tromagnetic Interference Shielding Application. *Nanomaterials*, 9 (4), 621. doi: <https://doi.org/10.3390/nano9040621>

6. Tahmasebi Birgani, M. J., Zabihzadeh, M., Aliakbari, S., Behrouz, M. A., Hosseini, S. M. (2019). Evaluation of Putty Metal for Internal Shielding for Patient Protection in Electron Therapy by Monte Carlo Study. *Jundishapur Journal of Natural Pharmaceutical Products*, 14 (2), e12589. doi: <https://doi.org/10.5812/jjnpp.12589>

7. Zhang, L., Bi, S., Liu, M. (2020). Lightweight Electromagnetic Interference Shielding Materials and Their Mechanisms. *Electromagnetic Materials and Devices*. doi: <https://doi.org/10.5772/intechopen.82270>

8. Беляев, А. А., Беспалова, Е. Е., Лепешкин, В. В. (2015). Радиопоглощающие материалы на основе отделочных строительных материалов для защиты от СВЧ излучения базовых станций сотовой связи. *Труды ВИАМ*, 6, 80–88.

9. Barsukov, V., Senyk, I., Kryukova, O., Butenko, O. (2018). Composite Carbon-Polymer Materials for Electromagnetic Radiation Shielding. *Materials Today: Proceedings*, 5 (8), 15909–15914. doi: <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2018.06.063>

10. Senyk, I. V., Kuryptya, Y. A., Barsukov, V. Z., Butenko, O. O., Khomenko, V. G. (2020). Development and Application of Thin Wide-Band Screening Composite Materials. *Physics and Chemistry of Solid State*, 21 (4), 771–778. doi: <https://doi.org/10.15330/pcss.21.4.771-778>

11. Guzii, S., Kryvenko, P., Guzii, O., Yushkevich, S. (2019). Determining the effect of the composition of an aluminosilicate binder on the rheotechnological properties of adhesives for wood. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 6 (6 (102)), 30–38. doi: <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2019.185728>

12. Glyva, V., Podkopaev, S., Levchenko, L., Karaieva, N., Nikolaiev, K., Tykhenko, O. et. al. (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. doi: <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2018.123622>

13. Radionov, A. V., Podoltsev, A. D., Radionova, A. A. (2017). Express - method for determining the quality of a magnetic fluid for operation in the working gap of a magnetic fluid seal. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 233, 012038. doi: <https://doi.org/10.1088/1757-899x/233/1/012038>