

**Панова Олена Василівна**

Кандидат технічних наук, доцент, завідувач кафедри фізики, [orcid.org/0000-0001-7975-1584](https://orcid.org/0000-0001-7975-1584)

Київський національний університет будівництва і архітектури, Київ

**Краснянський Григорій Юхимович**

Кандидат фізико-математичних наук, доцент, доцент кафедри фізики, [orcid.org/0000-0002-2421-1270](https://orcid.org/0000-0002-2421-1270)

Київський національний університет будівництва і архітектури, Київ

**Азнаурян Ірина Олександрівна**

Доцент кафедри фізики, [orcid.org/0000-0002-7085-7291](https://orcid.org/0000-0002-7085-7291)

Київський національний університет будівництва і архітектури, Київ

## РОЗРАХУНОК ЕФЕКТИВНОСТІ ЕЛЕКТРОМАГНІТНОГО ЕКРАНУВАННЯ КОМПОЗИЦІЙНИМИ МАТЕРІАЛАМИ З ЕЛЕКТРОПРОВІДНИМИ НЕМАГНІТНИМИ ДОБАВКАМИ

***Анотація.** Представлено результати теоретичних досліджень захисних властивостей композиційних облицювальних матеріалів на основі діелектричної матриці з немагнітним електропровідним наповнювачем у широкому діапазоні частот падаючого електромагнітного випромінювання. Отримано вирази для величин проходження, відбиття та поглинання і розрахованої на їх основі ефективності екранування електромагнітного випромінювання матеріалом. Необхідні для розрахунків залежності діелектричної проникності та електропровідності композиту від об'ємної частки електропровідної добавки отримано на підставі гіпотези подібності при врахуванні ненульової провідності діелектричної матриці. Встановлено задовільну відповідність результатів розрахунків із вимірними характеристиками екранування зразків металосилікатних матеріалів на основі гідросилікатів кальцію та мідного порошку. Загалом наведені результати показують адекватність запропонованої розрахункової методики і свідчать, що вона може бути використана для попередніх оцінок характеристик екранування при проектуванні електромагнітних екранів на основі композиційних облицювальних матеріалів.*

***Ключові слова:** електромагнітне випромінювання; електромагнітні екрани; ефективність екранування; металосилікатні матеріали; електропровідні добавки; діелектрична проникність; електропровідність*

### Вступ

У сучасних умовах значного посилення електромагнітного техногенного навантаження на здоров'я людей захист від електромагнітного випромінювання (ЕМВ) стає все більш важливим завданням. При цьому необхідно враховувати відносно новий фактор погіршення електромагнітної обстановки – зростання рівнів ЕМВ надвисоких частот (НВЧ), джерелами якого є засоби бездротового зв'язку та інші радіотехнічні прилади. Всесвітня організація охорони здоров'я поширила на електромагнітні впливи принцип ALARA (As low as reasonably achievable).

Така мінімізація техногенних впливів не завжди можлива. У будь-якому випадку вона має визначатися гранично допустимими рівнями інтенсивності електромагнітного випромінювання, які містяться в основних нормативних актах [1; 2].

Крім впливу на здоров'я людей, ЕМВ, що проникає всередину приміщень, може як виводити з ладу, так і впливати на якість роботи радіоелектронного обладнання. З розвитком інформаційних технологій, що використовують випромінювання НВЧ діапазону, виникли серйозні проблеми, пов'язані з електромагнітними перешкодами.

Найбільш дієвим способом захисту від шкідливого впливу ЕМВ є екранування. З цієї точки зору найефективнішими є металеві екрани. Їх недолік полягає в тому, що внаслідок високої електропровідності металів вони сильно відбивають ЕМВ, що не завжди допустимо. Екрани, що поглинають ЕМВ, зазвичай проектуються на основі гетерогенних матеріалів, властивості яких можуть змінюватися в широких межах шляхом варіювання складу та технології виготовлення.

Поширеними композиційними матеріалами, призначеними для екранування ЕМВ, є матеріали на основі діелектриків з металевими добавками завдяки

їхній високій електропровідності та хорошим механічним властивостям [3 – 6]. У той же час їх використання лімітується великою вагою. Зазначений недолік частково усувається при використанні в якості провідного компонента технічного вуглецю, графіту, деревного вугілля [7 – 9].

Набувають застосування і екрани з магнітними металевими добавками, що мають високі коефіцієнти поглинання в діапазоні НВЧ [3]. Особливий інтерес становлять металополімерні матеріали, що містять дрібнодисперсний залізородний концентрат [10 – 13].

Останнім часом об'єктом численних досліджень стали екрани на основі полімерних матеріалів з вуглецевими нанонаповнювачами, такими як графен, вуглецеві нанотрубки, графітові нанопластинки [3; 14 – 17]. Ці матеріали відрізняються високими електро- та теплопровідністю, легкістю, високою корозійною стійкістю.

Властивість екранувати електромагнітне випромінювання мають практично всі будівельні матеріали. Водночас ефективність такого екранування недостатня.

З метою нормалізації показників відповідно до загальноєвропейських міжнародних нормативів з електромагнітної безпеки в будівельних конструкціях як захисні екрани мають застосовуватися спеціально розроблені будівельні матеріали. Зокрема, раніше нами було показано принципову можливість використання як ефективних екранів електромагнітного випромінювання облицювальних матеріалів на основі металосилікатних композицій [5; 6].

При проектуванні електромагнітних екранів, що мають задані характеристики, необхідна попередня оцінка захисних властивостей матеріалу. Такі розрахунки зазвичай проводять на основі попередньо вимірених величин електропровідності і діелектричної проникності матеріалу при різних вмістах провідної добавки та частотах, які відповідають очікуванім частотам ЕМВ, що екранується [3; 14; 15].

### Мета роботи

Метою роботи є теоретичні дослідження захисних властивостей композиційних облицювальних матеріалів на основі діелектричної матриці з електропровідним немагнітним наповнювачем у широкому діапазоні частот випромінювання.

У тому числі – розроблення математичної моделі, яка давала б змогу не лише правильно оцінювати значення характеристик екранування, а й призначати оптимальний склад матеріалу, що забезпечує такі характеристики.

### Виклад основного матеріалу

Першочерговим завданням у процесі вивчення екрануючих властивостей композиційних матеріалів є отримання теоретичних залежностей, які дають адекватний опис процесів розсіювання ЕМВ в тілі композиту.

Задача знаходження відбиття  $R$  та проходження  $T$  плоскої електромагнітної хвилі, що падає на плоскопаралельний шар речовини, який перебуває між вакуумом і довільним середовищем, має точний розв'язок [18]. При цьому, однак, вирази, що отримуються, не можуть застосовуватися для практичних розрахунків внаслідок їх громіздкості. Використання відповідних формул стає можливим за певних умов, при яких вони суттєво спрощуються. Так, якщо комплексна діелектрична проникність  $\hat{\epsilon}$  шару композиційного матеріалу, що містить немагнітні електропровідні добавки, дуже велика, а третє середовище – вакуум, то за нормального падіння хвилі на шар за умови  $1/|\hat{\epsilon}| = (\omega d)/c = 1/|\hat{\epsilon}|^{1/2}$ , де  $\omega$  – циклічна частота випромінювання;  $d$  – товщина шару;  $c$  – швидкість світла у вакуумі, вирази для  $R$  і  $T$  набувають вигляду:

$$R = 1 - \frac{4c\epsilon''}{\omega d |\hat{\epsilon}|^2}, \quad (1)$$

$$T = \frac{4c^2}{\omega^2 d^2 |\hat{\epsilon}|^2}. \quad (2)$$

Якщо ж  $(\omega d)/c \ll 1/|\hat{\epsilon}|$ , то:

$$R = \frac{\omega^2 d^2}{4c^2} |\hat{\epsilon}|^2, \quad (3)$$

$$T = 1 - \frac{\omega d \epsilon''}{c}. \quad (4)$$

Тут  $\epsilon''$  – уявна частина комплексної діелектричної проникності

$$\hat{\epsilon} = \epsilon_d + i \frac{\sigma}{\omega \epsilon_0}, \quad (5)$$

де  $\sigma$  – електропровідність матеріалу;  $\epsilon_0$  – електрична стала (використовуємо систему одиниць СИ).

Слід зазначити, що ці умови виконуються в обмеженій кількості випадків. Так, для розглянутого нижче прикладу екрана на основі металосилікатного матеріалу завтовшки 0,5 мм співвідношення (1) і (2) можуть бути використані при  $\nu < 10^7$  Гц. Якщо ж, як у нашому випадку,  $\nu \sim 10^{10}$  Гц, (1) і (2) застосовні для екранів завтовшки  $d < 10$  мкм. Такі тонкі екрани нині створені на основі полімерних композицій, що містять вуглецеві нанотрубки [19]. У більшості випадків товщина екрануючого матеріалу становить 1 – 5 мм і, якщо падаюче випромінювання належить

до діапазону НВЧ, наведені співвідношення не справедливі.

Нижче показано, що для оцінювання відбиття та проходження при нормальному падінні ЕМВ на матеріал можуть бути застосовані наближені співвідношення, отримані при використанні виразу для амплітуди хвилі, що поширюється в середовищі з поглинанням. Розв'язок рівнянь Максвелла для цього випадку дає:  $E_0 \exp(-\alpha d)$ , де  $\alpha = (2\omega\kappa)/c$  – коефіцієнт поглинання;  $\kappa$  – уявна частина  $\sqrt{\epsilon} = n + i\kappa$ .

Тоді, при врахуванні багаторазового відбиття від внутрішніх поверхонь шару в припущенні, що перше і третє середовище – вакуум (повітря), отримуємо:

$$R = R_{12} \left( 1 + (1 - R_{12})^2 \exp(-2\alpha d) \times M \right), \quad (6)$$

$$T = (1 - R_{12})^2 \exp(-\alpha d) \times M. \quad (7)$$

У (6), (7)  $R_{12}$  – коефіцієнт відбиття від напівнескінченного середовища з діелектричною проникністю, що дорівнює діелектричній проникності матеріалу:

$$R_{12} = \frac{(n-1)^2 + \kappa^2}{(n+1)^2 + \kappa^2}, \quad (8)$$

та  $n$  і  $\kappa$  визначаються співвідношеннями:

$$n = \left( \frac{\epsilon' + (\epsilon'^2 + \epsilon''^2)^{1/2}}{2} \right)^{1/2}, \quad (9)$$

$$\kappa = \left( \frac{-\epsilon' + (\epsilon'^2 + \epsilon''^2)^{1/2}}{2} \right)^{1/2}, \quad (10)$$

де  $\epsilon'$  – дійсна частина комплексної діелектричної проникності.

Множник

$$M = \left( 1 - R_{12}^2 \exp(-2\alpha d) \right)^{-1} \quad (11)$$

визначає внесок багаторазового відбиття.

Слід зазначити, що врахування  $M$  помітно впливає на величини  $R$  та  $T$  за умови:  $d < 3\delta$ , де  $d = 1/\alpha$  – товщина шару, на якій інтенсивність хвилі зменшується в  $e$  разів. Ця умова виконується при малих  $\kappa$ , які визначають поглинання випромінювання матеріалом, невисоких частотах падаючого випромінювання, або для дуже тонких екранів. В іншому випадку багаторазове відбиття можна не враховувати.

Визначивши величини відбиття та проходження, можна оцінити поглинання ЕМВ матеріалом із умови:  $A = (1 - R - T)$ .

Таким чином, знаючи величини дійсної та уявної частини діелектричної проникності зразків з різним вмістом електропровідного компоненту, можна розрахувати залежності  $T$ ,  $R$  і  $A$  від об'ємного вмісту провідної добавки та частоти падаючої електромагнітної хвилі.

Вирази для залежностей електропровідності і діелектричної проникності композиту від об'ємної частки провідного компоненту  $\theta$  були отримані нами раніше [5; 20] для квазістаціонарного електромагнітного поля на підставі гіпотези подібності [21; 22] (аналогії з теорією фазових переходів) з урахуванням ненульової провідності діелектричної матриці. При вмістах провідного компонента, що відповідають допороговій області  $\tau = (\theta - \theta_c) < 0$ , ( $\theta_c$  – поріг протікання), залежності  $\epsilon''(\omega, \theta)$  і  $\epsilon'(\omega, \theta)$  мають вигляд:

$$\epsilon''(\omega, \theta) = \frac{\sigma_m}{\omega\epsilon_0} \left[ B_0 h (-\tau)^{-q} + B_1 \left( h^2 - \left( \frac{\omega\epsilon_0\epsilon_d}{\sigma_m} \right)^2 (-\tau)^{-p} \right) \right], \quad (12)$$

$$\epsilon'(\omega, \theta) = B_0 \epsilon_d (-\tau)^{-q}, \quad (13)$$

де  $h = \sigma_d / \sigma_m$  і  $\sigma_d, \epsilon_d$  – електропровідність та діелектрична проникність діелектричної матриці;  $\sigma_m$  – електропровідність провідної добавки;  $q$  і  $p$  – критичні індекси теорії протікання [21; 23; 24];  $B_0, B_1$  – константи.

При вмісті провідного компонента вище порогового ( $\tau > 0$ ):

$$\epsilon''(\omega, \theta) = A_0 \frac{\sigma_m}{\omega\epsilon_0} \tau^t, \quad (14)$$

$$\epsilon'(\omega, \theta) = A_1 \epsilon_d \tau^{-q}, \quad (15)$$

де  $t$  – критичний індекс;  $A_0, A_1$  – константи.

Вирази (12) – (15) справедливі при  $|\tau| \ll \Delta$ , де:

$$\Delta = \left[ h^2 + \left( \frac{\omega\epsilon_0\epsilon_d}{\sigma_m} \right)^2 \right]^{s/2t} \quad (16)$$

– інтервал поблизу порога протікання, де відбувається перехід від залежностей (12), (13) до залежностей (14), (15);  $s$  – ще один критичний індекс.

Крім того, (14) виконується для таких значень  $\theta$ , при яких  $\sigma(\theta) \ll \sigma_m$ , а (13) і (15) – при  $\epsilon(\theta) \ll \epsilon(\theta_c)$ . Відмітемо, що для  $\theta$ , достатньо далеких від  $\theta_c$ , співвідношення (15) не описує поведінку  $\epsilon'(\theta)$ . При таких вмістах провідної добавки вільні електрони призводять до появи уявної частини  $\epsilon_m$  і  $\epsilon(\theta)$  може ставати від'ємною.

В інтервалі вмісту провідного компонента  $\Delta$  поблизу  $\theta_c$  значення  $\varepsilon''$  для зразків кінцевих розмірів не визначені, а  $\varepsilon'$  прямує до кінцевої межі, значення якої можна оцінити із співвідношення:

$$\varepsilon'(\omega, \theta_c) = a_0 \varepsilon_d \left( \frac{\sigma_m}{\omega \varepsilon_0 \varepsilon_d} \right)^{1-s}, \quad (17)$$

де  $a_0$  – константа.

З (13), (15) і (17) випливає, що при наближенні до порога протікання з обох боків має спостерігатися різке зростання дійсної частини діелектричної проникності. Якісно це може бути інтерпретовано на підставі таких міркувань. Кожну пару найближчих провідних кластерів, розділених поблизу порога протікання тонким діелектричним прошарком, можна розглядати як конденсатор. Тоді, при наближенні до порога протікання, ефективна поверхня такого конденсатора різко зростає, внаслідок чого має різко збільшитись ефективна ємність системи.

При практичних розрахунках спочатку визначають поріг протікання  $\theta_c$  на підставі вимірної залежності  $\sigma(\theta)$  за будь-якого значення  $\omega$ , в тому числі – на постійному струмі ( $\theta_c$  не залежить від  $\omega$ ). Потім, враховуючи, що при однорідному розподілі частинок провідного компонента за розмірами та в об'ємі матеріалу процес електроперенесення в таких системах задовільно описується в рамках ґраткової моделі вузлів теорії протікання, для величин  $t$  і  $q$  застосовують значення 1,6 та 1,0 відповідно [21; 23]. Критичні індекси  $p$  і  $s$  пов'язані з  $t$  і  $q$  виразами:

$$q = \frac{t(1-s)}{s} \quad \text{і} \quad p = t \left( \frac{2}{s} - 1 \right), \quad (18)$$

які впливають із співвідношень Крамерса – Кроніґа. Константи  $B_0$ ,  $B_1$ ,  $A_0$ ,  $A_1$  оцінюють із умов:  $\sigma(\theta) = \sigma_d$ ,  $\varepsilon(\theta) = \varepsilon_d$  при  $\theta = 0$ ,  $\sigma(\theta) = \sigma_m$  при  $\theta = 1$ ,  $A_1 = B_0$ .

Розрахувавши за пропонованою методикою величини  $R$ ,  $T$  і  $A$ , можна оцінити як загальну ефективність екранування ЕМВ матеріалом  $SE_T = 10 \log(1/T)$ , так і ефективності екранування за рахунок відбиття  $SE_R = 10 \log(1/(1-R))$  і поглинання  $SE_A = SE_T - SE_R$ :

$$SE_T = 20 \log \left( \frac{(n+1)^2 + \kappa^2}{4n} \right) + 10ad \log e - 10 \log M, \quad (19)$$

$$SE_R = 10 \log \left( \frac{(n+1)^2 + \kappa^2}{4\pi} \right) -$$

$$- 10 \log \left[ 1 - \frac{4n \left( (n-1)^2 + \kappa^2 \right) e^{-2ad} \times M}{\left( (n+1)^2 + \kappa^2 \right)^2} \right]. \quad (20)$$

Для ілюстрації застосування описаної розрахункової методики використовували отримані раніше результати експериментальних досліджень електрофізичних властивостей металосилікатних матеріалів [5; 20; 25].

Металосилікатні матеріали, що поєднують аморфізовані силікатні речовини та металеві порошки [26], мають низку технологічних та функціональних переваг у порівнянні з іншими будівельними матеріалами, призначеними для захисту від електромагнітного випромінювання. Найбільш істотним є можливість управління такими властивостями цих матеріалів, як електропровідність, теплопровідність, модуль пружності тощо за рахунок спрямованої дії на мікроструктуру композиту. Високі фізико-механічні та будівельно-технічні характеристики уможливають застосування металосилікатних матеріалів для виготовлення облицювальних (у т. ч. зовнішніх) виробів. При цьому, змінюючи вид силікатного компонента, можна змінювати довговічність виробів.

Особливість електрофізичних властивостей металосилікатних матеріалів полягає в тому, що при наближенні об'ємної частки металевого компонента до деякого значення (порога протікання) електропровідність системи стрибкоподібно збільшується (на 6–7 порядків), а діелектрична проникність зростає до значень  $\sim 10^3$  [5; 20]. Наявність у них подібних електрофізичних характеристик дає змогу припустити, що за відповідної оптимізації складу композиції на основі металевих порошків і аморфізованих силікатів вони можуть мати виражені екрануючі властивості.

Методика експерименту, приготування зразків, вимірювання їх діелектричної проникності та електропровідності, коефіцієнтів проходження та відбиття ЕМВ описана в [6; 27]. Як діелектричну матрицю при виготовленні зразків використовували аморфізовані дисперсні гідросилікати кальцію. В якості електропровідної добавки застосовували порошок міді з розмірами частинок не більше 60 мкм. Вживали спеціальних заходів для забезпечення рівномірного розподілу гранулярної міді в об'ємі матеріалу. Розміри зразків – плиток становили 125×66×5 мм. Вимірювання проходження та відбиття проводили на частотах ЕМВ із діапазону 19 – 26 ГГц.

Слід зазначити, що умова квазістаціонарності ( $v \ll c/d$ ) для досліджуваних зразків у вказаному діапазоні частот точно не виконується. Ці частоти є граничними, за яких ще можлива оцінка величин  $\sigma$  і  $\varepsilon$  із співвідношень (12) – (16).

На рис. 1 представлені залежності проходження, відбиття та поглинання, а на рис. 2 – ефективності екранування зразків металосилікатного матеріалу,

розраховані за описаною вище методикою при вмістах металевої добавки, що відповідають допороговій області  $\theta < \theta_c$  ( $\theta_c = 0,162$  за результатами вимірювань), та частоті падаючого випромінювання 20 ГГц.

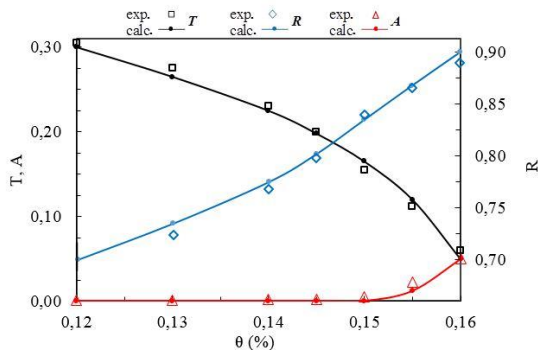


Рисунок 1 – Залежності величин проходження  $T$ , відбиття  $R$  та поглинання  $A$  від вмісту металевої добавки  $\theta$  у металосилікатному матеріалі при  $\theta < \theta_c$

Як видно з рис. 1, де для порівняння наведено також виміряні величини  $T$ ,  $R$  та  $A$ , спостерігається задовільна відповідність теоретичних та експериментальних значень, що свідчить про адекватність запропонованої методики розрахунку. При цьому слід зауважити, що похибка вимірювань зазначених величин поблизу порога протікання збільшується через розкид експериментальних точок внаслідок значного впливу флуктуацій локальних параметрів композиту на електропровідність та діелектричну проникність.

Аналіз даних рис. 1 показує, що поглинання ЕМВ матеріалом у цьому діапазоні вмісту металу стає помітним лише поблизу порога протікання при  $\theta > 0,15$ . Це пояснюється тим, що електричні втрати, які викликають поглинання, визначаються уявною частиною діелектричної проникності  $\epsilon''$ . При цьому перший член рівняння (12) для  $\epsilon''$  відповідає за джоулеві втрати, пов'язані з наскрізною провідністю, другий – описує дисипацію енергії випромінювання в матеріалі внаслідок поляризації ізольованих провідних кластерів і превалує при частоті випромінювання, для якої проводилися розрахунки та вимірювання.

Мале поглинання в допороговій області вмісту металу призводить також до збільшення втрат інтенсивності випромінювання за рахунок багаторазового відбиття від внутрішніх поверхонь зразка, що спричиняє суттєве зростання величин  $R$  при  $\theta < \theta_c$ .

Отже, слід зробити висновок, що ефективність екранування в допороговій області вмісту металу (рис. 2) мала і не відповідає комерційно прийнятним значенням  $SE_t > 20$  дБ.

При  $\theta > \theta_c$  (рис. 3, 4) електричні втрати визначаються наскрізною провідністю, що росте зі

зростанням  $\theta$ . При цьому, незважаючи на різке зменшення  $\epsilon'$  при відході від порога протікання, величина відбиття  $R$  зменшується повільно внаслідок одночасного зростання електропровідності композиту (рис. 3). Водночас через збільшення поглинання зменшується і величина проходження  $T$ . Отже, внесок поглинання у сумарну ефективність екранування  $SE_t$  стає переважним (рис. 4). При  $\theta > \theta_c$  практично у всій дослідженій області вмісту металевої добавки  $SE_t > 20$  дБ і досягає значення 50 дБ при  $\theta = 0,2$ .

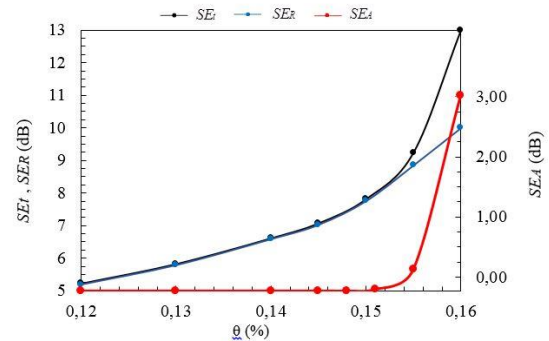


Рисунок 2 – Залежності ефективності екранування – загальної  $SE_t$ , за рахунок відбиття  $SE_R$  та поглинання  $SE_A$  – від вмісту металевої добавки  $\theta$  у металосилікатному матеріалі при  $\theta < \theta_c$

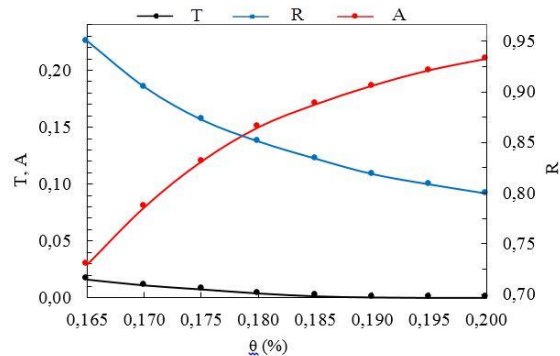


Рисунок 3 – Залежності величин проходження  $T$ , відбиття  $R$  та поглинання  $A$  від вмісту металевої добавки  $\theta$  у металосилікатному матеріалі при  $\theta > \theta_c$

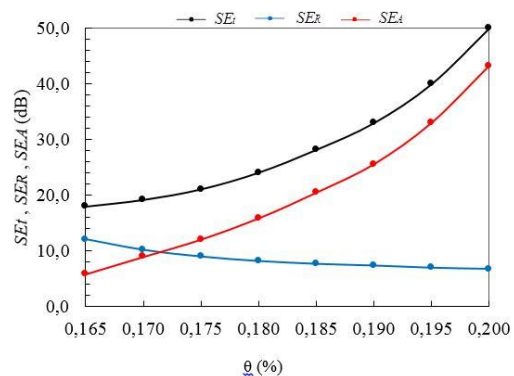


Рисунок 4 – Залежності ефективності екранування – загальної  $SE_t$ , за рахунок відбиття  $SE_R$  та поглинання  $SE_A$  – від вмісту металевої добавки  $\theta$  у металосилікатному матеріалі при  $\theta > \theta_c$

Як впливає з (12) та (14), з підвищенням частоти падаючого випромінювання  $\varepsilon''$  має зменшуватися. Крім того, при великих  $\theta$  і високих частотах, коли процес електроперенесення в матеріалі відбувається за металевим типом,  $\varepsilon''$  може зменшуватись також внаслідок скін-ефекту, що призводить до зменшення електропровідності. В результаті зі збільшенням частоти має відбуватися зниження ефективності екранування.

Порівнюючи рис. 1, 2 з рис. 3, 4 можна зробити висновок, що не спостерігається плавного переходу відповідних залежностей при  $\theta < \theta_c$  до залежностей при  $\theta > \theta_c$ . Це можна пояснити, якщо врахувати, що сингулярність  $\sigma(\theta)$  і  $\varepsilon(\theta)$  поблизу порога протікання, яка впливає з (12) – (15), поширюється на інтервал  $\theta$ , що дорівнює  $\Delta$ , який визначається (16). І, оскільки в цьому інтервалі значення  $\varepsilon''$  не визначено, розрахунок у ньому величин R, T та A стає не коректним. Щодо експериментальних значень, то на точність їх визначення поблизу порога протікання істотно впливає флуктуація локальних параметрів композиту.

На закінчення відзначимо, що при проведенні розрахунків за запропонованою методикою необхідно враховувати, що припущення про нормальне падіння ЕМВ на матеріал і контакт обох граней матеріалу з повітрям, використані при

отриманні робочих формул, не відповідають реальним умовам, в яких експлуатується облицювальний матеріал, що екранує. Задня поверхня екрана контактує зі стіновим матеріалом, імпеданс якого ближче до імпедансу екрана, а отже, реальний внесок у ефективність екранування за рахунок відбиття буде нижчим, ніж розрахунковий.

## Висновки

Проведено теоретичні дослідження захисних властивостей композиційних облицювальних матеріалів на основі діелектричної матриці з електропровідним немагнітним наповнювачем у широкому діапазоні частот падаючого електромагнітного випромінювання. Запропоновано розрахункову методику, що дає змогу оцінювати величини проходження, відбиття, поглинання та ефективність екранування електромагнітного випромінювання матеріалом. Встановлено задовільну відповідність результатів розрахунків із вимірними характеристиками екранування зразків металосилікатних матеріалів на основі гідросилікатів кальцію та мідного порошку. Отже, наведені результати показують адекватність запропонованої розрахункової методики і свідчать, що вона може бути використана для попередніх оцінок характеристик екранування при проектуванні електромагнітних екранів на основі облицювальних композиційних матеріалів.

## Список літератури

1. Guidelines for limiting exposure to time-varying electric, magnetic, and electromagnetic fields up to 300 GHz. International Commission on Non-Ionizing Radiation Protection HealthPhys. 1998. 74(4). P. 494 – 524. URL: <https://www.icnirp.org/cms/upload/publications/ICNIRPemfgdl.pdf>
2. Directive 2013/35/EU of the European Parliament and of the Council of 26 June 2013 on the minimum health and safety requirements regarding the exposure of workers to the risks arising from physical agents (electromagnetic fields) Official Journal of the European Union. 2013. 56. – L179/1-L179/21. URL: <https://eur-lex.europa.eu/LexUriServ/LexUriServ.do?uri=OJ:L:2013:179:0001:0021:EN:PDF>
3. Kruzalac J., Kvasnicakova A., Hlozekova K., Hudec I. Progress in polymers and polymer composites used as efficient materials for EMI shielding. Nanoscale Adv. 2021. 3. P. 123 – 172.
4. Chung D. D. L. Materials for electromagnetic interference shielding. J. Mater. Eng. Perform. 2000. 9. P. 350-354.
5. Краснянский Г. Е., Максунев С. Е., Величко Т. П.: Электрофизические свойства металлосиликатных материалов контактного твердения, Тез. докл. III Всесоюз. науч.-практ. конф. Шлакощелочные цементы, бетоны и конструкции, КИСИ, Киев, СССР, 1989, т.1, С. 209 – 210.
6. Клапченко В. И., Краснянский Г. Е., Глыва В. А., Азнаурян И. А. Управление защитными свойствами электромагнитных экранов на основе металлосиликоновых материалов. *Гігієна населених місць*. 2009. Вип. 53. С. 200 – 207.
7. Chuhg Deborah D. L. Carbon Composites: Composites with Carbon Fibers, Nanofibers, and Nanotubes. New York: Butterworth-Heinemann. 2016. 706 P.
8. Voiprav O. V., Ayad H. A. E., Lynkou L. M. Electromagnetic radiation shielding properties of copper containing activated carbon. Doklady BGUIR. 2019. 1 (119). P. 51 – 55.
9. Айад, Х. А. Э., Белоусова Е. С., Пулко Т. А. Влияние состава композиционных покрытий на основе порошкообразного древесного угля на экранирование электромагнитных излучений. Доклады БГУИР. 2016. № 3 (97). С. 89 – 94.
10. Glyva V. A., Levchenko L. O., Panova O. V., Tykhenko O. M., Radomska M. M. The composite facing material for electromagnetic fields shielding. IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering. 2020. P. 907. doi:10.1088/1757-899X/907/1/012043.
11. Glyva V., Barabash O., Kasatkina N., Katsman M., Levchenko L., Tykhenko O., Nikolaiev K., Panova O., Khalmuradov B., Khodakovskyy O. Studying the shielding of an electromagnetic field by a textile material containing ferromagnetic nanostructures. Eastern-European Journal of Enterprise Technologies. 2020. Vol 1 No 10 (103). P. 26 – 31.

12. 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 Materials Science*. 2020. Vol 2 No 12 (104). P. 40–47.
13. 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. 6/5 (96). P. 54–61.
14. Vovchenko Ludmila et al. Polyethylene Composites with Segregated Carbon Nanotubes Network: Low Frequency Plasmons and High Electromagnetic Interference Shielding Efficiency. *Materials*. 2020. 13. P. 1118. doi:10.3390/ma13051118
15. Gonzalez M., Pozuelo J., Baselga J. Electromagnetic shielding materials in the GHz range. *Chem. Rec*. 2018. 18. P. 1–11.
16. Abbas N. and Kim H. T. Multi-walled carbon nanotube/polyethersulfone nanocomposites for enhanced electrical conductivity, dielectric properties and efficient electromagnetic interference shielding at low thickness. *Macromol. Res*. 2016. 24. P. 1084–1090.
17. Song W. L., Cao M. S., Lu M. M., Bi S., Wang C. Y., Liu J., Yuan J., Fan L. Z. Flexible graphene-polymer composite films in sandwich structures for effective electromagnetic interference shielding. *Carbon*. 2014. 66. P. 67–76.
18. Ландау Л. Д., Лифшиц Е. М. Электродинамика сплошных сред. Москва: Наука, 1982. 621 с.
19. Zi Ping Wu, De Ming Cheng, Wen Jing Ma, Jing Wei Hu, Yan Hong Yin, Ying Yan Hu and Ye Sheng Li. Electromagnetic interference shielding effectiveness of composite carbon nanotube macro-film at a high frequency range of 40 GHz to 60 GHz. *AIP Advances*. 2015. 5 067130. <https://doi.org/10.1063/1.4922599>
20. Клапченко В. И., Краснянский Г. Е., Азнаурян И. А. Электрофизические исследования строительных материалов. Киев: ВИПОЛ, 2002. 84 с.
21. Efros A. L. and Shklovskii B. I. Critical behaviors of conductivity and dielectric constant near the metal-nonmetal transition. *Pfys. Status solidi*. 1976. Vol 76. No 2. P. 475–485.
22. Балагуров Б. Я. К теории дисперсии проводимости двухкомпонентных сред. *ЖЭТФ*, 1985, Т.88, №5. С. 1664–1675.
23. Kirkpatrick S. Percolation and Conduction. *Rev. Mod. Phys*. 1973. 45. No 4. P. 574–587.
24. Stauffer D., Aharony A. Introduction to Percolation Theory. Taylor & Francis: London UK. 1992. 192 p.
25. Глуховский В. Д., Казанский В. М., Краснянский Г. Е., Максунев С.Е. Электропроводность металлосиликатных материалов контактного твердения. *Известия АН СССР. Неорганические материалы*. 1988. т. 24(5). С. 824–827.
26. Глуховский В. Д., Рунова Р. Ф., Максунев С. Е. Вяжущие и композиционные материалы контактного твердения. Киев: Вища школа, 1991. 242 с.
27. Краснянский Г. Е., Азнаурян И. А., Кучерова Г. В. Методика электрофизических исследований бетона на ранних стадиях твердения. *Містобудування та територіальне планування*: Наук.-техн. зб. Київ, КНУБА, 2013. Вип. 50. С. 310–315.

Стаття надійшла до редколегії 15.11.2021

#### **Panova Olena**

PhD (Eng.), Associate Professor, Chair of Physics, [orcid.org/0000-0001-7975-1584](https://orcid.org/0000-0001-7975-1584)  
Kyiv National University of Construction and Architecture, Kyiv

#### **Krasnyansky Grigory**

PhD (Eng.), Associate Professor, [orcid.org/0000-0002-2421-1270](https://orcid.org/0000-0002-2421-1270)  
Kyiv National University of Construction and Architecture, Kyiv

#### **Aznauryan Irina**

Associate Professor, [orcid.org/0000-0002-7085-7291](https://orcid.org/0000-0002-7085-7291)  
Kyiv National University of Construction and Architecture, Kyiv

### **EVALUATION OF ELECTROMAGNETIC RADIATION SHIELDING CHARACTERISTICS OF FACING BUILDING MATERIALS**

**Abstract.** The article presents the results of theoretical studies of the protective properties of composite facing materials based on a dielectric matrix with an electrically conductive non-magnetic filler in a wide frequency range of incident electromagnetic radiation. Expressions are got for the values of the transmission, reflection and absorption, and the electromagnetic radiation shielding efficiency calculated on their basis. The dependences of the permittivity and electrical conductivity of the composite on the volume fraction of the electrically conductive additive required for calculations were got based on the hypothesis of similarity, considering the nonzero conductivity of the dielectric matrix. Satisfactory agreement between the calculation results and the measured shielding characteristics of specimens of metal silicate materials based on calcium hydro silicates and copper powder was established. The results presented show the adequacy of the proposed calculation method and indicate that it can be used for preliminary estimates of the shielding characteristics when designing electromagnetic radiation shields based on composite facing materials.

**Keywords:** electromagnetic radiation; electromagnetic radiation shields; shielding efficiency; metal silicate materials; electrically conductive additives; permittivity; electrical conductivity

## References

1. Guidelines for limiting exposure to time-varying electric, magnetic, and electromagnetic fields up to 300 GHz. (1998) *International Commission on Non-Ionizing Radiation Protection HealthPhys.*, 74(4), 494–522.
2. Directive 2013/35/EU of the European Parliament and of the Council of 26 June 2013 on the minimum health and safety requirements regarding the exposure of workers to the risks arising from physical agents (electromagnetic fields) Official Journal of the European Union (2013). 56, L179/1-L179/21.
3. Kruzalak, J., Kvasnicakova, A., Hlozekova, K. & Hudec, I. (2021). Progress in polymers and polymer composites used as efficient materials for EMI shielding. *Nanoscale Adv*, 3, 123–172.
4. Chung, D. D. L. (2000). Materials for electromagnetic interference shielding. *J. Mater. Eng. Perform*, 9, 350–354.
5. Krasnianskyi, G., Maksunov, S. & Velichko, T. (1989). Electrophysical properties of contact hardening metallosilicate materials. *Proc. 3-rd All-Union Scientific and Practical Conf. Slag-alkali cements, concretes and constructions (Kiev)*, 1, 209–210.
6. Klapchenko, V., Krasnyansky, G., Glyva, V. & Aznaurian, I. (2009). Protective properties of electromagnetic screens based on metal silicate materials in the microwave range. *Hygiene of populated places*, 53, 200–207.
7. Chuhg, Deborah D. L. (2016). *Carbon Composites: Composites with Carbon Fibers, Nanofibers, and Nanotubes*, New York, Butterworth-Heinemann, 706.
8. Boiprav, O. V., Ayad, H. & Lynkou, L. M. (2019). Electromagnetic Radiation Shielding Properties of Copper Containing Activated Carbon. *Doklady BGUIR*, 1, 51–55.
9. Ayad, H. A., Belousova, E. S. & Pulko, T. A. (2016). Influence of Composite Coatings Based on Powdered Charcoal on Electromagnetic Radiation Shielding. *Doklady BGUIR*, 3, 88–94.
10. Glyva, V. A. at al. (2020). The composite facing material for electromagnetic fields shielding. *IOP Conf. Ser.: Mater. Sci. Eng.*, 907, 012043.
11. Glyva, V., Barabash, O., Kasatkina, N., Katsman, M., Levchenko, L., Tykhenko, O., Nikolaiev, K., Panova, O., Khalmuradov, B. & Khodakovskyy, O. (2020). Studying the shielding of an electromagnetic field by a textile material containing ferromagnetic nanostructures. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 1, 10 (103), 26–31.
12. Glyva, V., Kasatkina, N., Nazarenko, V., Burdeina, N., Karaieva, N., Levchenko, L., Panova, O., Tykhenko, O., Khalmuradov, B. & Khodakovskyy, O. (2020). 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*, 2, 12 (104), 40–47.
13. Glyva, V., Lyashok, J., Matvieieva, I., Frolov, V., Levchenko, L., Tykhenko, O., Panova, O., Khodakovskyy, O., Khalmuradov, B. & Nikolaiev, K. (2018). Development and investigation of protective properties of the electromagnetic and soundproofing screen. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 6, 5(96), 54–61.
14. Vovchenko, L. et al. (2020). Polyethylene Composites with Segregated Carbon Nanotubes. Network: Low Frequency Plasmons and High Electromagnetic Interference Shielding Efficiency. *Materials*, 13, 1118.
15. González, M., Pozuelo, J. & Baselga, J. (2018). Electromagnetic Shielding Materials in GHz Range. *Chem Rec.*, 18, 1–11.
16. Abbas, N. & Kim, H. T. (2016). Multi-walled carbon nanotube/polyethersulfone nanocomposites for enhanced electrical conductivity, dielectric properties and efficient electromagnetic interference shielding at low thickness. *Macromol. Res.*, 24, 1084–1090.
17. Song, W. L. at al. (2014). Flexible graphene/polymer composite films in sandwich structures for effective electromagnetic interference shielding. *Carbon*, 66, 67–76.
18. Landau, L. D. & Lifshitz, E. M. (1982). *Electrodynamics of Continuous Media*. Moscow, Science, 621.
19. Zi, Ping Wu at al. (2015). Electromagnetic interference shielding effectiveness of composite carbon nanotube macro-film at a high frequency range of 40 GHz to 60 GHz. *AIP Advances*, 5, 067130.
20. Klapchenko, V., Krasnyansky, G. & Aznaurian, I. (2002). *Electrophysical Investigations of Building materials*. Kyiv, VIPOL, 84.
21. Efros, A. L. & Shklovskii, B. I. (1976). Critical behaviors of conductivity and dielectric constant near the metal-nonmetal transition. *Phys. Status solidi*, 76, 2, 475–485.
22. Balagurov, B. Ya. (1985). On the theory of dispersion of the conductivity of two-component media. *JETP*, 88, 5, 1664–1675.
23. Kirkpatrick, S. (1973). Percolation and Conduction Rev. *Mod. Phys*, 45, 4, 574–587.
24. Stauffer, D. & Aharony, A. (1992). *Introduction to Percolation Theory*. London: Taylor & Francis, 192.
25. Glukhovskiy, V. D., Kazansky, V. M., Krasnianskyi, G. Yu., Maksunov, S. E. (1988). Electrical conductivity of metal-silicate materials of contact hardening. *Izvestiya AN SSSR, Inorganic materials*, 24(5), 824–827.
26. Glukhovskiy, V. D., Runova, R. F. & Maksunov, S. E. (1991). Contact hardening binders and composite materials. Kyiv, Vyshcha Shkola, 242.
27. Krasnianskyi, G., Aznaurian, I. & Kucherova, I. (2013). Methods of electrophysical research of concrete in the early stages of hardening. *Mistobuduvannya ta terytorialne planuvannya*, 50, 310–315.

## Посилання на публікацію

- APA Panov, O., Krasnianskyi, G. & Aznaurian, I. (2021). Evaluation of electromagnetic radiation shielding characteristics of facing building materials. *Management of Development of Complex Systems*, 48, 152–159, dx.doi.org/10.32347/2412-9933.2021.48.152-159.
- ДСТУ Панова, О.В., Краснянський Г. Ю., Азнаурян І. О. Розрахунок ефективності електромагнітного екранування композиційними матеріалами з електропровідними немагнітними добавками. *Управління розвитком складних систем*. Київ, 2021. № 48. С. 152 – 159, dx.doi.org/10.32347/2412-9933.2021.48.152-159.