

К. Д. Ніколаєв^{1,2}, А. С. Білик^{1,3}, К. М. Сапожников¹, О. О. Козлітін⁴

¹ Науково-дослідний інститут військової розвідки, Київ, Україна

² Міжрегіональна академія управління персоналом, Київ, Україна

³ Київський національний університет будівництва і архітектури, Київ, Україна

⁴ НУ «Київський авіаційний інститут», Київ, Україна

АНАЛІЗ ТЕОРЕТИЧНИХ ЗАСАД КЕРУВАННЯ ЗАХИСНИМИ ВЛАСТИВОСТЯМИ ЕЛЕКТРОМАГНІТНИХ ЕКРАНІВ

Анотація. Проаналізовано можливості розрахункового прогнозування електрофізичних властивостей композиційних матеріалів для екранування електромагнітних випромінювань. Показано, що електрофізичні властивості є основним показником ефективності екранування. Проаналізовано основні емпіричні співвідношення для розрахунку діелектричної та магнітної проникностей композицій, виходячи з показників матриці та наповнювача. Визначено роль коефіцієнта деполаризації частинок наповнювача несферичних форм. Показано, що визначення показників за об'ємним вмістом наповнювача складне у практичній діяльності. Тому доцільно проводити попередній перерахунок об'ємних параметрів у масові. Слід враховувати, що співвідношення Максвелла-Гарнета та Оделевського дають прийнятну похибку для об'ємного вмісту наповнювача до 0,3. При цьому співвідношення призначені для двокомпонентних композицій. Для об'ємного вмісту наповнювача більше 0,3 для визначення діелектричної проникності композицій доцільно використовувати співвідношення Бругемана. Перевагою цього співвідношення є придатність до проектування багатокомпонентних композиційних матеріалів. Усі наведені співвідношення дають коректні результати для наповнювачів мікророзмірів. У проектних необхідно враховувати можливе зменшення об'єму матриці у процесі полімеризації або висихання. Особливо це стосується водовмісних матеріалів. У цьому випадку знижується поріг протікання електричного струму (перколяційного ефекту), що впливає на коефіцієнт екранування. При перевищенні порогу протікання різко підвищується коефіцієнт відбиття, що у багатьох випадках, наприклад електромагнітного камуфляжу, є небажаним. Для визначення порогу протікання електричного струму слід використовувати фундаментальні співвідношення електродинаміки суцільних середовищ.

Ключові слова: електромагнітне випромінювання, екранування, електрофізичні властивості, композиційний матеріал.

Вступ

Електромагнітні екрани призначені, у першу чергу, для захисту людей від електромагнітних впливів. Крім того, вони призначені для забезпечення електромагнітної сумісності електронного обладнання. Досвід відбиття широкомасштабної збройної агресії проти України засвідчив, що ефективність сучасних бойових дій та, зокрема, розвідки критично залежить від зниження радіолокаційної та радіотехнічної помітності військових об'єктів. У сучасних умовах бойових дій надзвичайно актуальним є захист засобів розвідки, зв'язку та управління від впливу електромагнітних випромінювань. Ефективні екранувальні та поглинальні покриття дозволяють підвищити живучість апаратури, зменшити ймовірність її виявлення та забезпечити стабільну роботу радіоелектронних систем у складній електромагнітній обстановці.

Електромагнітні поля радіолокаційних станцій, засобів зв'язку та іншої апаратури створюють складну електромагнітну обстановку та впливають на роботу радіоелектронних засобів. Для зменшення радіолокаційної помітності об'єктів і підвищення заводської якості використовуються поглинальні покриття різної будови, у тому числі багатопарові композити. До таких покриттів висуваються одночасно вимоги щодо широкосмугового поглинання, обмежених масогабаритних показників та технологічності виготовлення, що особливо важливо для військової техніки. Забезпечення цих вимог пов'язане з вибором складу та структури багатопарових композитів, для чого потрібні адекватні теоретичні моделі їх електрофізичних характеристик.

Існує багато емпіричних та напівемпіричних співвідношень для визначення магнітних та електрофізичних характеристик багатокомпонентних композицій. Але не завжди вони дають задовільний результат. Тому доцільно визначити межі їх придатності, що спростить процеси проектування матеріалів з потрібними захисними властивостями.

Огляд досліджень і розробок

Проектування композиційних матеріалів з потрібними коефіцієнтами екранування електромагнітних випромінювань є дуже складною задачею. Це пояснюється тим, що коефіцієнти відбиття та проходження електромагнітних хвиль залежать від діелектричної та магнітної проникностей і електропровідності. Ці показники, у свою чергу, залежать від показників окремих компонентів, композитів та їх об'ємних вмістів у кінцевому продукті. Експериментальний підбір цих співвідношень вимагає великих обсягів робіт та витрат часу і коштів. Тому доцільне попереднє оцінювання (прогнозування) ефективності з використанням певних математичних функцій та моделей. Тому цій проблематиці присвячено багато уваги.

У роботі [1, 2] розроблено теоретичні засади і верифіковано результати проектування неоднорідних захисних матеріалів. Але ці роботи стосуються неоднорідностей макророзмірів. З іншого боку, багато досліджень присвячено неоднорідним композиціям на основі наноструктур [3, 4]. Прогнозування ефективності таких структур для визначення коефіцієнтів екранування через визначення електрофізичних та магнітних властивостей практично неможливо, що обумовлено, у

тому числі, і квантовими ефектами. У дослідженнях [5, 6] показано, що визначити коефіцієнт екранування та внесок у нього відбиття електромагнітних хвиль можливо тільки експериментально, а математичний апарат використовується тільки для пояснення ефектів. Зокрема, визначається коефіцієнт відбиття за поверхневим імпедансом кінцевого продукту. В той же час дані робіт [7, 8] свідчать, що ефективність екранування як низькочастотних, так і високочастотних електромагнітних полів залежить від розмірів і форми частинок наповнювача у діелектричній матриці. Поодинокі дослідження, які аналізують співвідношення прогнозування електрофізичних та магнітних властивостей композитів [9, 10] тільки констатують даний факт можливості застосування для оціночного визначення ефективності матеріалів. Але порівняння експериментальних і розрахункових робіт і розрахункових даних свідчить, що у багатьох випадках збіжність незадовільна [11]. Тому актуальною задачею є оцінювання придатності та меж застосування співвідношень для визначення електрофізичних та магнітних властивостей композиційних матеріалів.

Метою статті є аналіз існуючих математичних моделей ефективної діелектричної і магнітної проникностей композитів та оцінка їх придатності для розрахунку захисних властивостей багатошарових композитів, призначених для екранування електромагнітних випромінювань у широкому діапазоні частот, з встановленням області коректного застосування.

Викладення основного матеріалу

Вибір конструкції одно- та багатошарового композиту потребує розуміння фізичних процесів, що протікають при взаємодії електромагнітної хвилі з матеріалом, та математичного апарату для розрахунку його магнітних та електрофізичних характеристик. Тому спочатку розглянемо основні механізми екранування та поглинання, а потім перейдемо до аналізу теоретичних моделей ефективної діелектричної проникності композитів.

Фізичні механізми екранування та поглинання. Поведінка електромагнітної хвилі при поширенні в шарі матеріалу визначається його хвильовим опором, діелектричною та магнітною проникністю. Хвильовий опір однорідного шару в наближенні плоскої хвилі при нормальному падінні на ізотропне середовище записують як:

$$Z = \sqrt{\mu/\varepsilon},$$

де Z дає нормований (безрозмірний) хвильовий опір; $Z_0 = 120\pi$ Ом – це опір вільного простору (має розмірність).

Справжній опір у Ом: $Z_{\text{фізичний}} = Z * Z_0$; ε – відносна діелектрична проникність; μ – відносна магнітна проникність.

Для нормального падіння плоскої хвилі чим ближче Z наближається до одиниці (узгодження з вільним простором), тим меншим є коефіцієнт відбиття хвилі на межі поділу середовищ.

Поглинання енергії хвилі в шарі зумовлене втратами в діелектричній підсистемі (провідність, поляризаційні та релаксаційні процеси) та в магнітній

підсистемі (гістерезис, вихрові струми, рух доменних стінок). У багатошарових структурах, де ε та μ змінюються від шару до шару, можна послідовно узгоджувати хвильовий опір і розподіляти поглинання енергії за товщиною покриття, що дає можливість отримати широкосмуговий захист. У загальному випадку для похилого падіння хвилі хвильовий опір залежить також від поляризації та кута падіння. Таким чином, саме керовані значення ε та μ у шарах композиції забезпечують можливість узгодження хвильового опору та досягнення заданого рівня поглинання.

Розрахунок товщини шару для інтерференційного узгодження. Оптимальну товщину однорідного шару для інтерференційного зменшення відбиття можна оцінити за умовою, що оптична товщина шару дорівнює чверті довжини хвилі в матеріалі:

$$d = \frac{c}{4f\sqrt{\varepsilon\mu}},$$

де d – товщина шару, м; c – швидкість світла у вакуумі, м/с; f – робоча частота, Гц (с^{-1}); ε – відносна діелектрична проникність матеріалу; μ – відносна магнітна проникність матеріалу.

Це співвідношення виводиться з принципу інтерференції хвиль на межах шару та справедливе для нормального падіння хвилі з нехтуванням дисперсією параметрів ε і μ у межах робочої смуги.

Ця залежність показує, що при збільшенні частоти f необхідна товщина d зменшується, що накладає технологічні обмеження на реалізацію поглинальних покриттів у міліметровому діапазоні. Для розширення робочої смуги доцільно переходити від однорідних шарів до багатошарових структурованих середовищ із градієнтним профілем ε та μ .

Розведення позначень для діелектричної проникності. У композитах розрізняють чотири типи діелектричної проникності:

ε – локальна діелектрична проникність конкретного матеріалу (однорідного шару або фази);

ε_d – діелектрична проникність матриці (суцільної основної фази композиту, наприклад полімеру або полімерної матриці);

ε_m – діелектрична проникність наповнювача (дисперсних частинок, які розташовані в матриці, наприклад оксидів металів або феритів);

ε_{ef} – ефективна діелектрична проникність композиту як цілого, розраховується за теоретичними моделями на основі ε_d , ε_m та концентрації наповнювача.

Аналогічно розрізняють μ_d (проникність матриці) та μ_m (проникність наповнювача), а також μ_{ef} (ефективна проникність композиту). Модель Максвелла–Гарнета визначає ε_{ef} через параметри складових фаз (матриці та наповнювача) та їх вміст у композиті. У подальшому v_m та v_k використовуються як еквівалентні позначення об'ємної концентрації наповнювача (частка від 0 до 1).

Модель Максвелла–Гарнета. Для композитів, що складаються з діелектричної матриці та дисперсних включень, ефективну діелектричну проникність ε_{ef} можна оцінити за моделлю Максвелла–Гарнета, яка базується на теорії ефективного середовища і

була запропонована для малих концентрацій сферичних частинок:

$$\varepsilon_{ef} = \varepsilon_d \cdot \frac{2\varepsilon_d + \varepsilon_m + 2v_m(\varepsilon_m - \varepsilon_d)}{2\varepsilon_d + \varepsilon_m - v_m(\varepsilon_m - \varepsilon_d)},$$

де ε_{ef} – ефективна діелектрична проникність композиту; ε_d – діелектрична проникність матриці (суцільної фази, наприклад полімеру); ε_m – діелектрична проникність наповнювача (дисперсних частинок); v_m – об’ємна частка наповнювача в композиті.

Модель базується на розв’язанні рівня електростатики для ізольованої сферичної частини в однорідному полі з подальшим усередненням поля для об’ємного композиту. Модель добре описує системи з відносно малими концентраціями включень ($v_m < 0,3$) та сферичною формою частинок. Зі збільшенням v_m ефективна проникність ε_{ef} зростає і наближається до ε_m , що дозволяє зменшити необхідну товщину шару для досягнення заданого рівня поглинання.

Слід зазначити, що модель Максвелла–Гарнета та наведена нижче модель Оделевського належать до класу квазістатичних моделей ефективного середовища, які виведені в наближенні $\lambda \gg d$, де λ – довжина хвилі в матеріалі, d – характерний розмір частинок наповнювача. При переході до міліметрового діапазону ($f > 30$ ГГц), коли λ стає порівнянною з розмірами неоднорідностей, ці моделі можуть потребувати корекції з урахуванням дисперсії та розсіяння на окремих частинках. У таких випадках доцільно застосовувати повні електродинамічні розрахунки або уточнені моделі, що враховують розсіяння, подібне до композиційного.

Модель Оделевського. Для врахування впливу форми частинок застосовують модель Оделевського, яка узагальнює підхід Максвелла–Гарнета на еліпсоїдальні включення довільної орієнтації:

$$\varepsilon_{ef} = \varepsilon_d \cdot \frac{1 + 2Fv_k}{1 - Fv_k},$$

де ε_{ef} – ефективна діелектрична проникність композиту; ε_d – діелектрична проникність матриці; F – фактор форми частинок (безрозмірний параметр, що визначається співвідношенням півосей еліпсоїда); v_k – об’ємна концентрація включень.

Ця модель дає змогу враховувати анізотропію композиту, зумовлену орієнтацією частинок, і узгоджується з моделлю Максвелла–Гарнета при $F = 1$ (сферичні частинки). При $F = 1$ обидві моделі дають однакові результати для малих концентрацій. Для витягнутих частинок F може приймати значення від 0 до 1, що дає більшу гнучкість у описі композитів з анізотропним наповнювачем.

Порівняння математичних моделей. З метою визначення придатності наведених вище моделей для опису електрофізичних властивостей багатошарових композитів, призначених для екранування електромагнітних випромінювань у широкому діапазоні частот, проведено їх порівняння за показниками: основні параметри, які в них враховуються; врахування морфології частинок; складність розрахунків; точність для сферичних включень; точність для несферичних включень; практичне застосування. Результати порівняння наведені у табл. 1.

Таблиця 1 – Порівняння математичних моделей ефективної діелектричної проникності композитів

Характеристика	Модель Максвелла–Гарнета	Модель Оделевського
Основні параметри	$\varepsilon_d, \varepsilon_m, v_m$	$\varepsilon_d, \varepsilon_m, F, v_k$
Врахування морфології частинок	Ні (лише об’ємна частка)	Так (фактор форми F)
Складність розрахунків	Низька	Середня
Точність для сферичних включень	Висока ($v_m < 0,3$)	Висока
Точність для несферичних включень	Низька	Висока
Практичне застосування	Оцінювання ефективної проникнення композитів, як попередня оцінка у розробленій структур	Розрахунок параметрів композитів з рахунком форми частинок під час проектування структур

Як бачимо, порівняння математичних моделей ефективної діелектричної проникності показує, що модель Максвелла–Гарнета є придатною для швидких оцінок властивостей ізотропних композитів зі сферичними включеннями при помірних концентраціях. Модель Оделевського доцільно застосовувати для анізотропних композитів, у яких істотною є форма та орієнтація включень.

У наведених нижче прикладах використано модель Максвелла–Гарнета як базову та найпростішу для ізотропних композитів зі сферичними включеннями, що дозволяє наочно продемонструвати вплив концентрації наповнювача на ефективну діелектричну проникність.

Приклад 1. Розрахунок при вищій концентрації наповнювача. Розглянемо композит, у якому діелектрична матриця має проникність $\varepsilon_d = 2,5$, наповнювач (оксид металу) має проникність $\varepsilon_m = 15$, а об’ємна частка наповнювача становить $v_m = 0,2$ (20 % за

об’ємом). Згідно з моделлю Максвелла–Гарнета ефективна діелектрична проникність дорівнює:

$$\varepsilon_{ef} = 2,5 \cdot \frac{2 \cdot 2,5 + 15 + 2 \cdot 0,2(15 - 2,5)}{2 \cdot 2,5 + 15 - 0,2(15 - 2,5)} \approx 3,57.$$

Отримане значення $\varepsilon_{ef} \approx 3,57$ у 1,43 рази більше, ніж проникність матриці ($3,57 / 2,5 \approx 1,43$). Це означає, що шар такого композиту матиме більшу оптичну щільність і дозволяє зменшити його товщину при тій самій матеріальній інтенсивності покриття, що також забезпечує кращу узгодженість хвильового опору при фіксованій товщині. Такий підхід використовується при проектуванні багатошарових структур, коли кожен шар має задану товщину та попередньо розраховану концентрацію наповнювача.

Приклад 2. Розрахунок при нижчій концентрації наповнювача. Для порівняння розглянемо той самий тип композиту з меншою об’ємною часткою наповнювача $v_m = 0,1$ (10 % за об’ємом) при $\varepsilon_d = 2,5$ та $\varepsilon_m = 15$.

$$\text{Тоді } \varepsilon_{ef} = 2,5 \cdot \frac{2 \cdot 2,5 + 15 + 2 \cdot 0,1(15 - 2,5)}{2 \cdot 2,5 + 15 - 0,1(15 - 2,5)} \approx 3,0.$$

У цьому випадку ефективна проникність лише на 20 % більша за проникність матриці ($3,0 / 2,5 = 1,20$). Зменшення v_m з 0,2 до 0,1 приводить до помітного зменшення ε_{ef} , що важливо враховувати при синтезі багат шарових структур та виборі профілю проникності за товщиною. Цей приклад показує, як варіюванням концентрації наповнювача можна формувати градієнтні композити, у яких ε_{ef} змінюється в контрольованому діапазоні від шару до шару.

На основі наведених розрахунків стає зрозумілим принцип побудови градієнтних структур. Такі структури формуються як набір із 5–7 шарів, у яких концентрація наповнювача змінюється за заданим законом (лінійним або експоненціальним). Це забезпечує плавне узгодження хвильового опору на межі «повітря – покриття» та мінімізацію відбиття в широкій смузі частот, що є основним завданням при проектуванні сучасних засобів екранування. Слід враховувати, що наведені співвідношення оперують об'ємним містом наповнювача у діелектричній матриці. На практиці дотриматися потрібного співвідношення важко. Це пояснюється великою дисперсністю наповнювача у насипному вигляді. Тому для проектування матеріалу слід застосовувати перерахунок об'ємного місту наповнювача у масовий міст, наведений у [11]. Крім того, слід враховувати, що у процесі висушування або полімеризації композиції відбувається зміна об'єму матриці. При цьому у разі вмісту води або розчинника така зміна може бути критичною. У такому випадку поріг протікання електричного струму (перколяційний ефект) зміщується, що автоматично веде до підвищення коефіцієнтів відбиття електромагнітних хвиль [12]. Цей ефект обумовлений фундаментальними співвідношеннями електродинаміки суцільних середовищ, тому вміст наповнювача слід визначати достатньо точно. В той же час розглянуті співвідношення мають прийнятну похибку для об'ємного вмісту наповнювача, меншого за 0,3. При більших вмістах доцільно застосовувати співвідношення Бругемана:

$$\sum_{i=1}^N g_{m_i} \frac{\varepsilon_{eff} - \varepsilon_i}{\varepsilon_i + 2\varepsilon_{eff}} = 0.$$

Його перевагою є прийнятна похибка до вмісту наповнювача у межах 0,3–0,7, що відповідає багатьом прикладним задачам. Перевагою формули є придатність для визначення діелектричної проникності багатоконпонентних систем. Слід враховувати, що усі параметри матеріалів, діелектрична та магнітна проникності, електропровідність є комплексними величинами і мають частотну залежність. Тому застосування

розглянутих співвідношень доцільно застосовувати для оціночного визначення ефективності екранування електромагнітних випромінювань. Для отримання матеріалу потрібної ефективності з малою похибкою проектування необхідні коректні дані щодо амплітудно-частотних характеристик електромагнітних полів та випромінювань, які потребують екранування.

Висновки

1. У результаті проведеного аналізу встановлено, що існуючі співвідношення для визначення електрофізичних параметрів композиційних матеріалів мають певні обмеження. Їх доцільно застосовувати для композиції з наповнювачами мікророзмірів. На конкретних прикладах показано можливість достатньо точного розрахування діелектричної проникності двокомпонентної композиції.

2. Недоліком співвідношень Максвелла-Гарнета та Оделевського є оперування об'ємними вмістами наповнювачів у діелектричних матрицях. Тому у практичній діяльності слід застосовувати перерахунок цього параметру у масовий вміст. Крім того, ці співвідношення мають прийнятну точність для об'ємного вмісту наповнювача до 0,3. Для більших вмістів наповнювачів слід використовувати співвідношення Бругемана. Його перевагою є придатність для визначення електрофізичних параметрів багатоконпонентних композицій.

3. У процесі оцінки електрофізичних характеристик композиційних матеріалів слід враховувати наявність порогу протікання (перколяційного ефекту) у композиціях з електропровідними наповнювачами. За певних концентрацій наповнювачів різко підвищується провідність матеріалів, що автоматично підвищує коефіцієнти відбиття електромагнітних хвиль, яке є небажаним. У цих випадках слід керуватися фундаментальними співвідношеннями електродинаміки суцільних середовищ. Для отримання мінімальних похибок розрахунків необхідно мати дані про амплітудно-частотні характеристики електромагнітних полів та випромінювань, які потребують екранування. Це обумовлене частотною залежністю магнітних та електрофізичних характеристик матеріалів.

Конфлікт інтересів. Автори декларують, що не мають конфлікту інтересів стосовно даного дослідження, в тому числі фінансового, особистісного характеру, авторства чи іншого характеру, що міг би вплинути на дослідження та його результати, представлені в даній статті.

Використання засобів штучного інтелекту. Автори підтверджують, що не використовували технології штучного інтелекту при створенні представленої роботи.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

- Burdeina, N., Levchenko, L., Korduba, I., Shamanskiy, S., Biruk, Y., Klymchuk, A., Nikolaiev, K., & Osadchyi, D. (2024). Applying heterogeneous building materials for the protection of people against electromagnetic radiation. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 5(10 (131)), 45–52. <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2024.313629>
- Biruk, Y., & Klymchuk, A. (2024). Засади проектування неоднорідних електромагнітних екранів. *Системи управління, навігації та зв'язку. Збірник наукових праць*, 3(77), 199–202. <https://doi.org/https://doi.org/10.26906/SUNZ.2024.3.199>
- C. Pu, J. Yang, S. Jin, Y. Zhou, W. Gong. (2025). Engineered Self-Blown Nonisocyanate Polyurethanes with Synchronously Enhanced Electromagnetic Interference Shielding and Dimensional Stability. *Applied Polymer Materials*, 7600-7611, <https://doi.org/10.1021/acsapm.5c012350000>

4. R. Sharma, D. Das, P. K. Dash, A. Acharya, K. Parashar, SKS Parashar. 2025. Electromagnetic interference shielding of Zn-50%-Al alloy-coated polypropylene flexible conducting film. *Intelligent Computing Techniques and Applications*, 4 p.
5. Fang, Fang & Carder, Damian & Rubanov, S. (2014). Investigations of near infrared reflective behaviour of TiO₂ nanopowders synthesized by arc discharge. *Optical Materials*. 36. 1260-1265. <https://doi.org/10.1016/j.optmat.2014.03.010>
6. Jianle Xu, Xiaosi Qi, Chengzhi Luo, Jie Qiao, Ren Xie, Yuan Sun, Wei Zhong, Qiang Fu and Chunxu Pan. Synthesis and enhanced microwave absorption properties: a strongly hydrogenated TiO₂ nanomaterial. *Nanotechnology* 28 425701, 2017, <https://doi.org/10.1088/1361-6528/aa81ba>
7. Касаткіна Н.В., Тихенко О.М., Панова О.В., Бірук Я.І. Підвищення ефективності композиційних електромагнітних екранів регулюванням морфології феромагнітного наповнювача. *Системи управління навігації та зв'язку*. 2020. Вип. № 3(61), С. 115–119. <https://doi.org/10.26906/SUNZ.2020.3.115>.
8. V. Glyva, L. Levchenko, N. Burdeina, T. Tkachenko, G. Twardowski, Y. Biruk, L. Zozulia. (2024). Innovative Means of Normalizing Physical Factors the Environment in the Processes of Reconstruction and Restoration Historical Heritage Objects. *International Journal of Conservation Science*. Vol. 15, Issue 3, pp. 1287-1302, DOI: <https://doi.org/10.36868/IJCS.2024.03.09>
9. Кочетов Г. М., Самченко Д. М., Ластівка О. В. (2023) Методологічні засади розроблення рідких сумішей для екранування електромагнітних полів. *Системи управління, навігації та зв'язку*. Полтава: ПНТУ, 2023. Т 2(72). С. 183-185. doi: <https://doi.org/10.26906/SUNZ.2023.2.183>
10. Самченко Д.М., Тихенко О.М., Зозуля Л.А., Цибульник Н.Н. (2023) Проектування електромагнітних екранів гарантованої ефективності для галузей цивільної безпеки та електромагнітної сумісності. *Системи управління, навігації та зв'язку*. – Полтава: ПНТУ, 2023. Т 3(73) – С. 167-170. – doi: <https://doi.org/10.26906/SUNZ.2023.3.167>
11. Glyva, V., Bakharev, V., Kasatkina, N., Levchenko, O., Levchenko, L., Burdeina, N., Guzii, S., Panova, O., Tykhenko, O., Biruk, Y. Design of liquid composite materials for shielding electromagnetic fields. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 2021, 3(6-111), pp. 25–31. <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2021.231479>
12. G. Krasnianskyi, V. Glyva, N. Burdeina, Y. Biruk, L. Levchenko, O. Tykhenko. 2024. Methodology For Designing Facing Building Materials with Electromagnetic Radiation Shielding Functions. *International journal of conservation science*. Vol. 15, Sp. Is. 1, 53-62. <https://doi.org/10.36868/IJCS.2024.S1.05>

Received (Надійшла) 14.11.2025

Accepted for publication (Прийнята до друку) 28.01.2026

Publication date (Дата публікації) 27.02.2026

ВІДОМОСТІ ПРО АВТОРІВ / ABOUT THE AUTHORS

Ніколаєв Кирило Дмитрович – доктор наук з державного управління, канд. сільськогосп. наук, професор кафедри публічного адміністрування, Міжрегіональна академія управління персоналом, с.н.с. НДІ розвідки, Київ, Україна;

Kyrylo Nikolaiev – Doctor of Science in Public Administration, PhD (Agrarian Sciences), Professor of the Department of Public Administration, Interregional Academy of Personnel Management, Senior Researcher at the Defence Intelligence Research Institute, Kyiv, Ukraine;

e-mail: nikolaevkirill@gmail.com; ORCID Author ID: <https://orcid.org/0000-0003-0404-6113>;

Scopus Author ID <https://www.scopus.com/authid/detail.uri?authorId=42762116000#>.

Білик Артем Сергійович – кандидат технічних наук, доцент, Київський національний університет будівництва та архітектури, Начальник науково-дослідної лабораторії Науково-дослідного інституту воєнної розвідки, м. Київ, Україна;

Artem Bilyk – Candidate of Technical Sciences, PhD, Associate Professor, Kyiv National University of construction and architecture, Head of the Scientific Research Laboratory in the Defence Intelligence Research Institute, Kyiv, Ukraine;

e-mail: artem.bilyk@gmail.com; ORCID Author ID: <https://orcid.org/0000-0002-9219-920X>.

Сапожников Костянтин Миколайович – начальник відділу, Науково-дослідний інститут воєнної розвідки, Київ, Україна;

Kostiانتyn Sapozhnykov – Head of Department, Defence Intelligence Research Institute;

e-mail: sapozhnykov_kos@meta.ua; ORCID Author ID: <https://orcid.org/0000-0003-0259-3690>.

Козлітін Олексій Олександрович – старший викладач кафедри цивільної та промислової безпеки, НУ «Київський авіаційний інститут», Київ, Україна;

Oleksii Kozlitiн – Senior Lecturer, Department of Civil and Industrial Safety, Kyiv Aviation Institute, Kyiv, Ukraine;

e-mail: oleksii.kozlitiн@npp.nau.edu.ua; ORCID Author ID: <https://orcid.org/0009-0001-5129-5369>.

Analysis of the theoretical basis for managing the protective properties of electromagnetic screens

Kyrylo Nikolaiev, Artem Bilyk, Kostiantyn Sapozhnykov, Oleksii Kozlitiн

Abstract. The possibilities of calculating the electrophysical properties of composite materials for shielding electromagnetic radiation are analysed. It is shown that electrophysical properties are the main indicator of shielding efficiency. The main empirical relationships for calculating the dielectric and magnetic permeabilities of compositions based on the matrix and filler indicators are analysed. The role of the depolarisation coefficient of non-spherical filler particles is determined. It is shown that determining indicators based on the volume content of the filler is difficult in practice. Therefore, it is advisable to perform a preliminary conversion of volume parameters to mass parameters. It should be noted that the Maxwell-Garnet and Odelevsky relationships give an acceptable error for the volume content of the filler up to 0.3. For filler volume content greater than 0.3, it is advisable to use the Bruggeman ratio to determine the dielectric permeability of the composition. The advantage of this ratio is its suitability for designing multi-component composite materials. All of the above ratios give correct results for micro-sized fillers. In design, it is necessary to take into account the possible reduction in matrix volume during polymerisation or drying. This is especially true for water-containing materials. In this case, the threshold for electric current flow (percolation effect) is reduced, which affects the shielding coefficient. When the flow threshold is exceeded, the reflection coefficient increases sharply, which in many cases, such as electromagnetic camouflage, is undesirable. To determine the electric current leakage threshold, the fundamental relationships of the electrodynamics of continuous media should be used.

Keywords: electromagnetic radiation, shielding, electrophysical properties, composite material.