

О.С. Чубукін

Харківський національний університет Повітряних Сил ім. І. Кожедуба, Харків

## ОТРИМАННЯ БАГАТОШАРОВОГО РАДІОПОГЛИНАЮЧОГО ПОКРИТТЯ НА ОСНОВІ ФЕРИТИВ З ВИКОРИСТАННЯМ ГЕНЕТИЧНОГО АЛГОРИТМУ ОПТИМІЗАЦІЇ ЕФЕКТИВНОЇ ПОВЕРХНІ РОЗСІЮВАННЯ ЕЛЕКТРОМАГНІТНИХ ХВИЛЬ В ДІАПАЗОНІ ЧАСТОТ 8–12 ГГц

У роботі проаналізована можливість використання еволюційних методів розрахунку з генетичним алгоритмом оптимізації для розробки і створення радіопоглинаючих покриттів на основі феритів, що збільшують радіопоглинальну здатність та зменшують ефективну площу розсіювання (ЕПР) в діапазоні частот 8–12 ГГц. Для цього було підібрано ряд феритних матеріалів, у яких експериментально визначалися частотні залежності величин діелектричної  $\varepsilon(f)$  та магнітної проникності  $\mu(f)$ , що є показниками їх радіопоглинаючих властивостей. Отримані залежності  $\varepsilon(f)$  та  $\mu(f)$  зводились до бази даних і використовувались далі у якості вихідних для генетичного алгоритму пошуку феритних матеріалів, що забезпечували б максимальну радіопоглинальну здатність і мінімальну ефективну поверхню розсіювання (ЕПР) в діапазоні частот 8–12 ГГц. Потім, за допомогою того ж генетичного алгоритму оптимізації, відбиралися варіанти послідовностей нанесення шарів з цих феритних матеріалів і проводилась оптимізація їх товщин. За отриманими даними було змодельовано ряд чотиришарових покриттів на пластинах з алюмінієвого сплаву Д16, який використовується у виробництві планерів військових винищувачів. Для перевірки достовірності отриманих результатів один з варіантів покриття був реалізований на практиці. В ході реалізації спочатку виготовлялись складові на основі латексного компаунда PUNTACOL C, змішаного з феритними матеріалами, що пройшли відбір генетичним алгоритмом, потім вони пошарово наносилися на поверхню пластин алюмінієвого сплаву Д16. Після нанесення покриттів проводились вимірювання радіопоглинальної здатності та величини ЕПР. Вимірювання радіопоглинальної здатності проводилося методом віднімання відбитих енергій в безлунової камері спеціально виготовленим приладом. Вимірювання ЕПР проводилося за допомогою моностаціонарних радіовимірювань в діапазоні частот 8–12 ГГц в тій же безлунової камері. Результати вимірювань показали, що нанесення обраного виду покриття значно підвищує радіопоглинальну здатність відбивальних поверхонь і знижує ЕПР в діапазоні частот 8–12 ГГц.

**Ключові слова:** ефективна поверхня розсіювання, генетичний алгоритм пошуку, цільова функція придатності, еволюційні методи розрахунку.

### Вступ

**Постановка проблеми.** Радіопоглинаючі матеріали (РПМ) використовуються в промислових, комерційних і військових цілях. Наприклад, однією з найбільш важливих задач для військових літаків, ракет, винищувачів-невидимок, малопомітних літальних апаратів та інших військових об'єктів є зниження їх радіолокаційної помітності.

З цією метою використовують РПМ, які збільшують радіопоглинальну здатність і знижують ефективну поверхню розсіювання об'єкта [1].

Існує декілька видів таких РПМ. До них відносяться немагнітні (градієнтні, інтерференційні, комбіновані) і магнітні (феритові) матеріали [2].

Більшість з цих РПМ використовуються у виді радіопоглинаючих покриттів (РПП), які наносяться на поверхні, що відображають випромінювання радарів [3].

Так, наприклад, градієнтні РПП мають багатошарову структуру з плавною або ступінчастою зміною комплексної діелектричної і магнітної проникностей за товщиною матеріалу. Це призводить до збільшення радіопоглинальної здатності поверхні за рахунок електричних і магнітних втрат, що збільшуються від шару до шару [2]. Виготовляються градієнтні РПП з твердих діелектриків (фенольного пластику, зміцненого кварцовим скловолокном), або діелектриків з високою діелектричною проникністю (епоксидної смоли з  $\varepsilon = 5$ ) та порошку-поглинача (графітового пилу).

Інтерференційні РПП підвищують радіопоглинальну здатність і знижують ефективну поверхню розсіювання за рахунок часткової нейтралізації відбитого від поверхні РПП випромінювання, частина якого пройшла крізь РПП. Значною нейтралізація випромінювання стає тоді, коли товщина РП, стає рівною одній чверті довжини хвилі випромінюван-

ня. У цьому випадку відбиті поверхнею з РПП хвилі знаходяться в протифазі і енергія падаючого високочастотного випромінювання відбивається від зовнішньої та внутрішньої поверхонь РПМ з утворенням інтерференційної картини нейтралізації вихідної хвилі. В результаті відбувається придушення падаючого випромінювання [4]

Як правило, інтерференційні РПП складаються з багатошарових структур, що включають і діелектрики (пластмаса, каучук та ін.), та електропровідні матеріали.

Комбіновані РПП поєднують в собі градієнтні та інтерференційні РПП. В порівнянні з градієнтними та інтерференційними РПП, комбіновані РПП поєднують високий ступінь послаблення енергії радіохвиль з широким діапазоном частот, в якому відбувається це послаблення.

Як показали дослідження, найбільш високою поглинаючою здатністю володіють магнітні матеріали, до складу яких входять ферити. Вони відносяться до класу нерезонансних магнітних радіопоглинаючих матеріалів [5].

Нерезонансні та магнітні РПМ – це матеріали, що складаються з частинок феритів, що рівномірно розподілені або в епоксидному пластику, або в органічному покритті.

Перевагою нерезонансних магнітних РПМ є їх здатність розсіювати енергію високочастотного випромінювання на великій площі.

Для радіомаскування літальних апаратів (ЛА) використовують нерезонансні РПМ у вигляді тонкошарових покриттів, що поглинають більшу частину енергії падаючого випромінювання (хвиль) ще до досягнення ним металеві підкладки (матеріалу планера літального апарату) і подальшого відбивання від неї.

В умовах впливу високочастотного випромінювання РЛС на покриття, в останньому виникають молекулярні коливання, в результаті чого змінне магнітне поле зовнішнього випромінювання накладається на змінні магнітні поля молекул, що коливаються і перетворює енергію радіолокаційного випромінювання в тепло, яке передається конструкції ЛА і розсіюється при польоті.

Основними перевагами нерезонансних магнітних РПМ є те, що вони є широкосмуговими поглиначами електромагнітного випромінювання [6].

Так, в роботі [7] показано, що нерезонансні РПМ, основа яких складається з високомолекулярних полімерних сполук, а наповнювачем є частинки феритів або феромагнітних матеріалів, особливо ефективно поглинають електромагнітне випромінювання в діапазоні частот 2-18 ГГц. На цих частотах працюють радары наведення ракет, радары керування озброєнням, морські радары. Крім того, як впливає з [4; 8], основною вимогою для широкосмугової

радіолокаційної невидимості малопомітних літальних апаратів і безпілотних авіаційних систем є мінімально можлива ефективна поверхня розсіювання в діапазоні частот 8–12 ГГц [8].

Тому, в якості РПМ, які ефективно збільшують радіопоглинальну здатність відбивальних поверхонь і знижують ефективну поверхню розсіювання об'єктів у діапазоні частот РЛС військового призначення (8–12 ГГц), доцільно використовувати покриття з нерезонансних магнітних РПМ на основі феритів.

**Аналіз останніх досліджень і публікацій.** Радіопоглинальна здатність нерезонансних магнітних РПМ що вміщують ферити залежить від магнітних втрат, які визначаються величиною уявної складової магнітної проникності матеріалу. Чим вона більше, тим більше будуть і втрати. Ферити мають високі значення уявної частини магнітної проникності. Тому вони придатні для використання в якості складових компонентів РПМ [9].

Дослідження спектрів величин уявної частини магнітної проникності та їх зв'язок з явищами поглинання електромагнітного випромінювання в феритових поглиначих показали, що існує одна або дві частоти випромінювання, на яких радіопоглинальна здатність таких поглиначів є дуже великою, а величина уявної частини магнітної проникності феритового поглинача визначається залежністю повного хвильового опору від частоти [10].

Також було встановлено, що значне згасання радіохвиль може відбуватися при нанесенні безлічі феритових шарів на металеву підкладку [10–11]. У той же час, таке згасання може бути отримано тільки на певних частотах. Щоб отримати загасання в усьому діапазоні необхідних частот, феритові шари повинні бути оптимізовані по товщині на цьому інтервалі частот.

З вищесказаного випливає, що для отримання ефективного широкосмугового РПП, необхідно розробити не тільки методику підбору найбільш придатних феритних матеріалів, але й методику створення РПП, яка вже на етапі проектування РПП забезпечувала б оптимізацію товщини кожного з шарів покриття на предмет мінімізації відбивної здатності РПП.

З метою практичної реалізації створення широкосмугового РПП було розглянуто ряд методик його проектування, де проводиться пошарова оптимізація товщини покриттів [12–14].

Однією з них є методика оптимального управління [12]. У цій методиці поглинаючі покриття представляють у вигляді шарів з різних матеріалів, які вибираються із заздалегідь визначеного набору таким чином, що поглинаючі властивості покриття максимізуються в певному частотному діапазоні. Основним недоліком цієї методики є збіжність цільової функції тільки до локального мінімуму, тобто

мінімум відбивної здатності визначається для кожного шару покриття окремо. Тому, використовуючи цю методику, не можна виключати можливість того, що в кінцевому підсумку можуть існувати умови, при яких радіопоглинання може бути більш істотним.

Інша методика, яка заснована на комбінаторній оптимізації імітаційного відпалу, забезпечує знаходження умов, за яких поєднання вибраних матеріалів і товщини їх шарів буде забезпечувати значне підвищення радіопоглинальної здатності всього покриття в цілому, але також не буде гарантувати знаходження глобального мінімуму відбивної здатності [13].

Більш досконалою методикою проектування є методика, заснована на еволюційних методах розрахунку з генетичним алгоритмом оптимізації [8; 14]. Генетичний алгоритм має ряд переваг перед вищепописаними методиками.

Відмітна властивість генетичного алгоритму оптимізації полягає в тому, що, використовуючи цільову функцію придатності, він встановлює верхню межу загальної товщини покриття, а також визначає оптимальну кількість шарів, що містяться в покритті. Це значно спрощує розробку поглиначів у вигляді листів (пластин). Виконання такого алгоритму, як правило, призводить до формування ряду високоефективних варіантів структури покриття, а не до єдиного рішення, як в інших методах.

Конкретна структура покриття може бути обрана з набору рішень на основі критеріїв, які не були включені в цільову функцію, таких, наприклад, як простота виготовлення або виробничі витрати [15].

**Мета статті.** Використовуючи методику еволюційних методів розрахунку з генетичним алгоритмом оптимізації на основі феритних матеріалів, що широко використовуються в промисловості, отримати покриття, які підвищують радіопоглинаючу здатність і знижують ефективну площу розсіювання (ЕПР).

## Виклад основного матеріалу

Розглянемо детальніше розробку та отримання багатошарового РПП з феритних радіопоглинаючих матеріалів.

Після вивчення різних типів феритів та їх властивостей були підібрані такі ферити, які за своїм магнітними та діелектричними властивостям дозволили б створити ефективні нерезонансні магнітні РПП. До таких феритів відносяться Fe-Zn ферити системи  $(\text{Fe}_{1-x}\text{Zn}_x)\text{Fe}_2\text{O}_4$ , Fe-Co ферити системи  $(\text{Fe}_{1-x}\text{Co}_x)\text{Fe}_2\text{O}_4$ , а також Zn-Mn ферити системи  $(\text{Zn}_{1-x}\text{Mn}_x)\text{Fe}_2\text{O}_4$  та Ni-Zn ферити складу  $\text{Ni}_{0,32}\text{Zn}_{0,68}\text{Fe}_2\text{O}_4$ . [16–17]. Дані ферити були виготовлені за технологіями, викладеними в [16–17]. При цьому концентрація компонентів  $x$  в інтерметалідній частині синтезова-

них Fe-Zn, Fe-Co, Zn-Mn феритів змінювалась з кроком 0,2.

Потім у всіх феритів, незалежно від стехіометричного співвідношення компонент, вимірювали величини дійсної та уявної частини діелектричної і магнітної проникності на частоті 8 ГГц, за значеннями яких, потім, за допомогою коригувальних ступенів ті ж величини розраховувалися для більш високих частот (8–12 ГГц). Значення цих діелектричних і магнітних проникностей феритів наведені в табл. 1.

Дані цієї таблиці стали основою для розробки, оптимізації та подальшого отримання багатошарової структури радіопоглинаючого покриття. Оптимізація багатошарової структури РПП проводилася з використанням генетичного алгоритму (GA). Для реалізації генетичного алгоритму використовувалася утиліта GA tool, що є складовою частиною пакету прикладних програм MATLAB 8.2.

Основною умовою її використання була наявність бази даних властивостей матеріалів, з яких підбиралися найбільш зручні. У нашому випадку це база даних діелектричних і магнітних властивостей матеріалів з їх частотними залежностями (табл. 1).

Генетичні алгоритми оптимізації, що використовуються в даній роботі – це ітераційні процедури, які починаються з випадково обраної сукупності потенційних рішень, і поступово розвиваються в бік більш сприятливих рішень за рахунок використання генетичних операторів. Повторні застосування генетичних операторів до сукупності потенційних рішень призводять до процесу оптимізації, який нагадує природну еволюцію. Ітераційним пошуком управляють три універсальних оператори: оператори відбору, схрещування та мутації.

Імовірнісний характер цих операторів значно розширює можливості алгоритму пошуку глобального, а не локального максимуму функції придатності. Блок-схема методу генетичної оптимізації для багатошарових РПП показана в [14].

Розглянемо оптимізацію структури багатошарового покриття.

На рис.1 представлено багатошарове покриття, що наноситься на основу, в якості якої виступає провідна пластина зі сплаву Д-16.

Товщина кожного шару повинна знаходитись в інтервалі від 0,01 до 0,5 см, оскільки з одного боку створювати шари товщиною менше 0,1 см досить складно, а з іншого покриття товщиною більше 0,5 см не придатні з точки зору практики (можуть з'являтися тріщини). Тому метою оптимізації був підбір покриття, що складається з певної кількості шарів  $N_i$ , та володіє низькою відбивною здатністю в заданому діапазоні частот електромагнітних хвиль 8–12 ГГц.

База даних за величинами діелектричної та магнітної проникності використовуваних в даній роботі феритних матеріалів

Феритний матеріал	Дійсні значення $\mu_r$ (8ГГц)	Уявні значення $\mu_i$ (8ГГц)	Дійсні значення $\varepsilon_r$ (8ГГц)	Уявні значення $\varepsilon_i$ (8ГГц)
	Показник степеня $\alpha$	Показник степеня $\beta$	Показник степеня $\alpha$	Показник степеня $\beta$
$(\text{Fe}_{0,2}\text{Zn}_{0,8})\text{Fe}_2\text{O}_4$	1,94	0,15	8,04	0,46
	0,3221	0,003	0,0469	0,037
$(\text{Fe}_{0,4}\text{Zn}_{0,6})\text{Fe}_2\text{O}_4$	0,16	2,51	7,53	0,41
	0,0082	0,037	0,0246	0,0497
$(\text{Fe}_{0,6}\text{Zn}_{0,8})\text{Fe}_2\text{O}_4$	1,83	1,26	3,45	3,24
	0,021	0,002	0,0145	0,0455
$(\text{Fe}_{0,8}\text{Zn}_{0,2})\text{Fe}_2\text{O}_4$	0,12	0,16	4,68	1,84
	0,0812	0,029	0,0245	0,0310
$(\text{Fe}_{0,2}\text{Co}_{0,8})\text{Fe}_2\text{O}_4$	1,73	1,79	7,56	2,56
	0,0218	0,04	0,0358	0,0561
$(\text{Fe}_{0,4}\text{Co}_{0,6})\text{Fe}_2\text{O}_4$	1,14	1,3	6,48	3,453
	0,032	0,0234	0,0221	0,6638
$(\text{Fe}_{0,6}\text{Co}_{0,8})\text{Fe}_2\text{O}_4$	1,83	1,011	2,67	1,053
	0,027	0,0396	0,02174	0,0227
$(\text{Fe}_{0,8}\text{Co}_{0,2})\text{Fe}_2\text{O}_4$	1,53	1,81	6,43	0,334
	0,0341	0,029	0,0565	0,002
$(\text{Zn}_{0,2}\text{Mn}_{0,8})\text{Fe}_2\text{O}_4$	2,05	0,212	4,84	3,98
	0,022	0,003	0,0301	0,0510
$(\text{Zn}_{0,4}\text{Mn}_{0,6})\text{Fe}_2\text{O}_4$	1,49	1,15	3,44	1,84
	0,009	0,212	0,0545	0,008
$(\text{Zn}_{0,6}\text{Mn}_{0,4})\text{Fe}_2\text{O}_4$	1,92	2,015	7,08	0,36
	0,0222	0,020	0,0361	0,0037
$(\text{Zn}_{0,8}\text{Mn}_{0,2})\text{Fe}_2\text{O}_4$	0,745	1,26	6,48	0,333
	0,009	0,346	0,3060	0,022
$\text{Ni}_{0,32}\text{Zn}_{0,68}\text{Fe}_2\text{O}_4$	1	0	19,45	0,791
	1,92	1,15	0,316	0,037
Примітка: $\mu = \mu_r - j\mu_i$ $\varepsilon = \varepsilon_r - j\varepsilon_i$	$\mu_r(f) = \frac{\mu_r(8ГГц)}{f^\alpha}$	$\mu_i(f) = \frac{\mu_i(8ГГц)}{f^\beta}$	$\varepsilon_r(f) = \frac{\varepsilon_r(8ГГц)}{f^\alpha}$	$\varepsilon_i(f) = \frac{\varepsilon_i(8ГГц)}{f^\beta}$

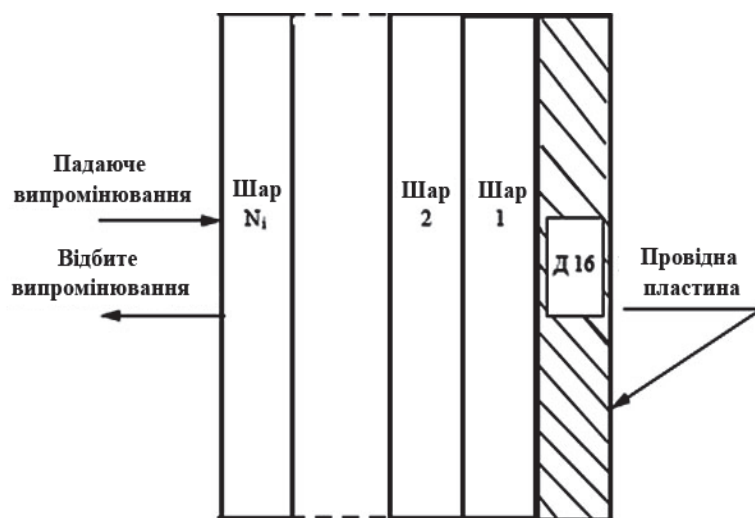


Рис. 1. Структура багатошарового РПП

При створенні оптимального з точки зору відбивної здатності покриття, послідовність феритних шарів та їх товщини підбираються таким чином, щоб коефіцієнти відбиття багат шарової структури для електричної складової (TE) і магнітної складової (TM) електромагнітного випромінювання були мінімальними. Коефіцієнти відбиття  $\rho^{TE}$  і  $\rho^{TM}$  для багат шарової структури розраховуються з використанням рекурсивних процедур:

$$\rho_i^{TE} = \frac{\mu_{i-1}k_i - \mu_i k_{i-1}}{\mu_{i-1}k_i + \mu_i k_{i-1}} \text{ якщо } i > 1,$$

$$\text{або } \rho_i^{TE} = -1, \text{ якщо } i = 1$$

$$\rho_i^{TM} = \frac{\varepsilon_{i-1}k_i - \varepsilon_i k_{i-1}}{\varepsilon_{i-1}k_i + \varepsilon_i k_{i-1}}, \text{ якщо } i > 1,$$

$$\text{або } \rho_i^{TM} = -1, \text{ якщо } i = 1,$$

де  $i$  – номер шару покриття;

$\rho_i^{TE}$  – коефіцієнт відбиття електричної складової електромагнітної хвилі  $i$ -того шару покриття;

$\rho_i^{TM}$  – коефіцієнт відбиття магнітної складової електромагнітної хвилі  $i$ -того шару покриття;

$\mu_i$  – магнітна проникність  $i$ -того шару;

$\mu_{i-1}$  – магнітна проникність  $i-1$  шару;

$\varepsilon_i$  – електрична проникність  $i$ -того шару;

$\varepsilon_{i-1}$  – електрична проникність  $i-1$ -го шару;

$k_i$  – величина хвильового вектора вздовж напрямку  $z$  (перпендикулярного кожному  $i$ -му шару).

Значення  $\varepsilon_i$  та  $\mu_i$  для кожного шару  $N_i$  ( $i = 1, \dots, N_m$ ) вибиралися з бази даних, наведених в табл. 1.

Використання генетичного алгоритму оптимізації проводилося з метою створення чотиришарової структури з плоскою провідною підкладкою. Структура покриття оптимізувалася за допомогою утиліти GA tool за умови, що коефіцієнти відбиття, для кожної з послідовностей шарів чотиришарової структури з різних феритних матеріалів будуть дорівнювати нулю. Параметри, що використовуються для моделювання за допомогою GA tool, наведені в табл. 2, а отримані результати в табл. 3.

Згодом, з чотирьох можливих варіантів покриття на практиці був реалізований тільки перший.

Розглянемо виготовлення експериментальних зразків покриття. Спочатку методом Елмора виготовлялися зразки феритових порошків вищевказаного складу [16].

Таблиця 2

Параметри, що використовуються для моделювання за допомогою GA tool

Fitness function	@objun
Number of variables	10
Population type	Triple vector
Population size	20
Initial range	[0000; 25 25 25 25; 0,4 0,4 0,4]

Закінчення табл. 2

Scaling function	Rank
Selection function	Roulette
Elite count	4
Crossover fraction	0.8
Generations	100
Time limit	inf
Fitness limit	0
Stall generations	50
Stall time limit	20

Таблиця 3

Результати оптимізації генетичним алгоритмом різних варіантів багат шарових РПП

№ слоя	Варіанти оптимізаційних рішень Варіанти покриття	Товщина покриття, мм
<b>Покриття №1</b>		
1	(Fe <sub>0,2</sub> Co <sub>0,8</sub> )Fe <sub>2</sub> O <sub>4</sub>	0,732
2	Ni <sub>0,32</sub> Zn <sub>0,68</sub> Fe <sub>2</sub> O <sub>4</sub>	1,811
3	(Zn <sub>0,6</sub> Mn <sub>0,4</sub> )Fe <sub>2</sub> O <sub>4</sub>	1,258
4	(Fe <sub>0,8</sub> Zn <sub>0,2</sub> )Fe <sub>2</sub> O <sub>4</sub>	1,534
<b>Покриття №2</b>		
1	(Fe <sub>0,2</sub> Co <sub>0,8</sub> )Fe <sub>2</sub> O <sub>4</sub>	1,432
2	(Fe <sub>0,6</sub> Co <sub>0,8</sub> )Fe <sub>2</sub> O <sub>4</sub>	0,728
3	(Zn <sub>0,8</sub> Mn <sub>0,2</sub> )Fe <sub>2</sub> O <sub>4</sub>	1,592
4	(Fe <sub>0,6</sub> Zn <sub>0,8</sub> )Fe <sub>2</sub> O <sub>4</sub>	1,684
<b>Покриття №3</b>		
1	Ni <sub>0,32</sub> Zn <sub>0,68</sub> Fe <sub>2</sub> O <sub>4</sub>	0,59
2	(Zn <sub>0,4</sub> Mn <sub>0,6</sub> )Fe <sub>2</sub> O <sub>4</sub>	1,723
3	(Zn <sub>0,8</sub> Mn <sub>0,2</sub> )Fe <sub>2</sub> O <sub>4</sub>	0,684
4	Zn <sub>0,2</sub> Mn <sub>0,8</sub> )Fe <sub>2</sub> O <sub>4</sub>	1,358
<b>Покриття №4</b>		
1	(Fe <sub>0,4</sub> Co <sub>0,6</sub> )Fe <sub>2</sub> O <sub>4</sub>	0,362
2	(Fe <sub>0,6</sub> Zn <sub>0,8</sub> )Fe <sub>2</sub> O <sub>4</sub>	0,184
3	(Zn <sub>0,2</sub> Mn <sub>0,8</sub> )Fe <sub>2</sub> O <sub>4</sub>	0,667
4	Ni <sub>0,32</sub> Zn <sub>0,68</sub> Fe <sub>2</sub> O <sub>4</sub>	1,056

Далі брали 60% по масі феритових порошків і змішували з 40% латексного компаунда PUNTACOL C на основі натурального каучуку, який попередньо нагрівали до 35°C для зниження в'язкості. Отримані таким чином компоненти були складовими лакофарбового покриття, формуючого шари РПП. Після чого кожен з отриманих компонентів наносили на поверхню пластин протягом 1–3с. Товщина кожного шару покриття контролювалася за допомогою мікрометричної вимірювальної системи.

Розглянемо вимірювання радіопоглинаючої здатності багат шарового феритовмісного РПП.

Вимірювання радіопоглинаючої здатності РПП проводилося методом віднімання відбитих енергій (ВВЕ). Для цього використовувався спеціально розроблений прилад, що складається з джерела (генератора) мікрохвильового випромінювання частотою 8–

12 ГГц, до якого через непровідну мембрану кріпили хвилевід з пірамідальною рупорною антеною, до раструбу якої, в свою чергу, кріпили додатковий хвилевід збільшеного перерізу. У вільний кінець цього додаткового хвилеводу по черзі вставляли пластини із сплаву Д-16, як з нанесеними на них багат шаровими феритовмісним покриттями, так і

без них, і вимірювали енергію (потужність) відбитого від них випромінювання. Після чого ступінь поглиненого випромінювання визначали як різницю енергій відбитого випромінювання від непокритих пластин і пластин з багат шаровими феритовмісними покриттями. Принципова схема установки для вимірювання поглиненої енергії наведена на рис. 2

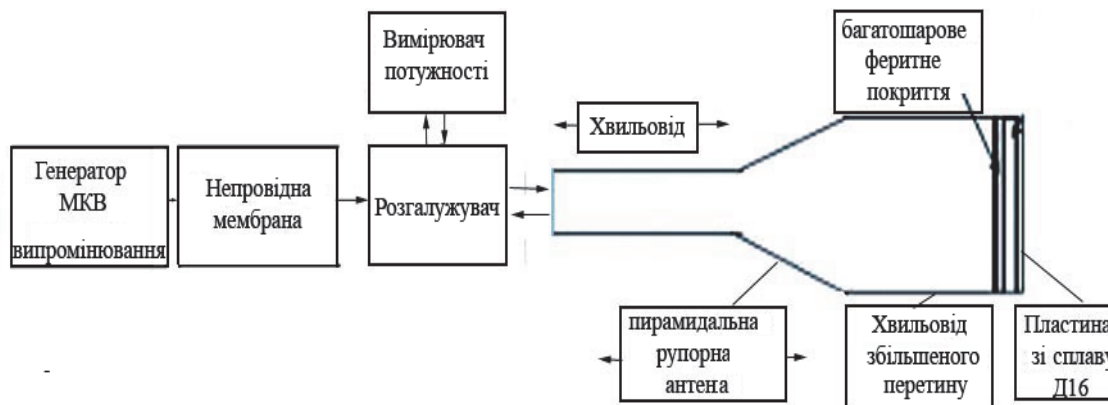


Рис. 2. Схема установки з вимірювання поглиненої енергії багат шаровим феритовмісним РПП

Розглянемо методику вимірювання ефективної поверхні розсіювання (ЕПР).

Технічно ефективну поверхню розсіювання (ЕПР) можна визначити як площу поверхні уявного ідеального відбивача електромагнітних хвиль, який буде відображати на приймаючу антену РЛС таку ж кількість енергії, як і реальна ціль [9]. Якщо розглядати ЕПР плоскої пластини, то її величина залежить від кута падіння  $\alpha$  електромагнітного випромінювання на поверхню пластини і може бути описана виразом [18]:

$$\sigma(\alpha) = \frac{4\pi S^2}{\lambda^2} \left[ \frac{\sin(ka \sin \alpha)}{ka \sin \alpha} \right]^2 \cos^2 \alpha .$$

Де  $\sigma$  – ефективна поверхня розсіювання (ЕПР) ( $m^2$ );

$\lambda$  – довжина хвилі випромінювання, (м);

$S$  – площа пластини ( $m^2$ );

$\alpha$  – кут між нормаллю до поверхні пластини і напрямком розповсюдження випромінювання;

$k$  – хвильовий вектор ( $2\pi/\lambda$ );

$a$  – розмір сторін пластини.

Теоретичне значення ЕПР ідеального прямокутного відбивача в залежності від частоти падаючого випромінювання, згідно [18], може бути враховано як:

$$\sigma_{Д16} = \frac{4\pi S^2}{\lambda^2} .$$

Величина ЕПР плоскої пластини з поглинаючим покриттям визначається згідно [18] виразом:

$$\sigma_{ногл}(\alpha) = \frac{P_r(ногл)}{P_r(Д16)} \sigma_{Д16} ,$$

де  $\sigma_{ногл}$  – величина ЕПР пластинки зі сплаву Д1, покритою багат шаровим феритовмісним РПП в  $m^2$ ;

$\sigma_{Д16}$  – ЕПР пластинки зі сплаву Д-16 без покриття в  $m^2$ ;

$P_r(ногл)$  – енергія, відбита від пластинки, покритої багат шаровим РПП;

$P_r(Д16)$  – енергія, відображена від пластинки з чистого Д-16.

Розглянемо експериментальну установку для вимірювання ефективної поверхні розсіювання (ЕПР).

Визначення ЕПР проводилося при моностатичних радіовимірюваннях відбитого від плоскої пластини випромінювання в інтервалі частот 8–12 ГГц на різних кутах його падіння.

При вимірюванні ЕПР використовувалася пластина зі сплаву Д-16, у якої одна сторона залишалася непокритою і використовувалася в якості еталона, а інша покрита РПП. Ця пластина фіксується на поворотній опорі, розташованій перед приймально-передавальною рупорною антеною та по черзі опромінюється з непокритого та покритого РПП боку.

Це дозволяє оцінювати ступінь відбиття еталонної та покритої поверхонь пластини при повороті її на кути від 0 до 360°.

На рис. 3 показана спрощена схема приладу, що використовується при вимірюванні ЕПР.



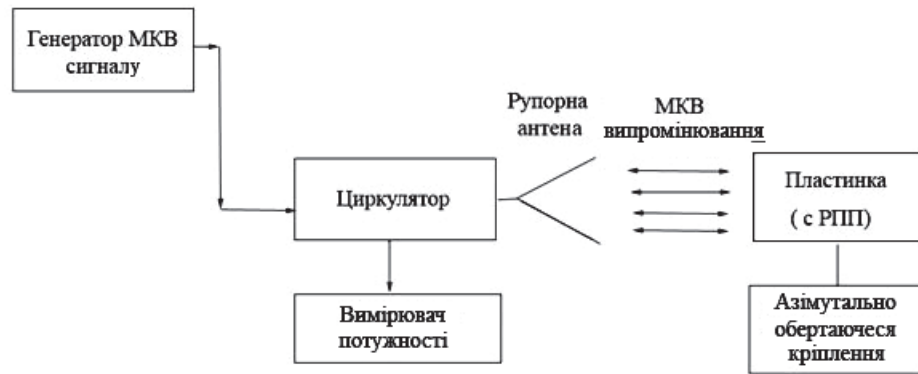


Рис. 3. Схема установки для вимірювання ЕПР

При цьому немає необхідності проводити два окремих вимірювання, тому що діаграму вимірювання ЕПР багатошарового РПП визначають на кутах повороту кріплення від  $0$  до  $180^\circ$ , а діаграму вимірювання ЕПР контрольної поверхні (непокритої пластинки) на кутах повороту від  $180^\circ$  до  $360^\circ$ . Таким чином, це самокалібруючі вимірювання [18].

Експерименти з вимірювання ЕПР проводилися всередині бездунової камери, а схема установки для вимірювань ЕПР наведена на рис. 3.

Для практичної реалізації створення багатошарового РПП був обраний перший з чотирьох можливих результатів рішень задачі оптимізації, що ви-

значає послідовність нанесення кожного шару феритного матеріалу і його товщину (табл. 3).

Вимірювання радіопоглинальної здібності для цього варіанту покриття показало, що після нанесення першого шару середня величина згасання випромінювання у всьому інтервалі частот склала близько  $0,6$  дБ, а максимальне згасання склало  $1,1$  дБ на частоті  $9,5$  ГГц, (рис. 4(а)).

Після нанесення другого шару покриття рівень згасання збільшився, середня величина згасання збільшилась до  $3$  дБ на частотах  $9,5$  ГГц ( $12,6$  дБ) і  $11,5$  ГГц ( $16,8$  дБ) (рис. 4 (б)).

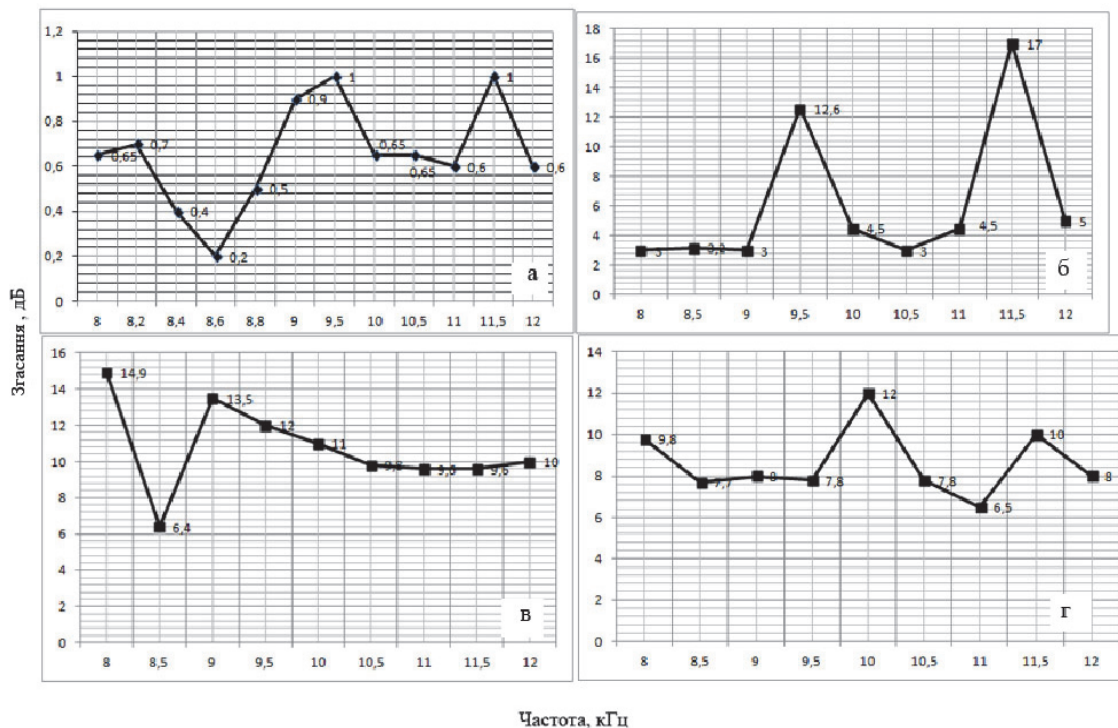


Рис. 4. Графіки згасання мікрохвильового електромагнітного випромінювання від частоти:

- а – після нанесення першого шару  $(\text{Fe}_{0,2} \text{Co}_{0,8})\text{Fe}_2\text{O}_4$ ;
- б – після нанесення другого шару  $\text{Ni}_{0,32} \text{Zn}_{0,68}\text{Fe}_2\text{O}_4$ ;
- в – після нанесення третього шару  $(\text{Zn}_{0,6} \text{Mn}_{0,4})\text{Fe}_2\text{O}_4$ ;
- г – після нанесення четвертого шару  $(\text{Fe}_{0,8} \text{Zn}_{0,2})\text{Fe}_2\text{O}_4$

Поява піків загасання пов'язана з резонансними ефектами поглинання електромагнітного випромінювання в феритах на цих частотах [5–6]. Після нанесення третього шару покриття, рівень загасання став практично однорідним у всьому діапазоні частот. При цьому середнє значення загасання склало 9,5 дБ, а максимальне загасання склало 14,6 дБ на частоті 8 ГГц, як показано на рис. 4(в).

Нанесення четвертого шару незначно збільшило середній рівень загасання, але стабілізувало його величину в досліджуваному інтервалі частот. Середній рівень загасання в цьому випадку склав близько 10 дБ при максимальному загасанні 12 дБ на частоті 10 ГГц (рис. 4(г)). Як видно з графіка залежності загасання енергії падаючого випромінювання від частоти (рис. 4(г)), величини рівня загасання у випадках тришарового і чотиришарового покриттів приблизно однакові, що свідчить про досягнення процесом загасання насичення. Досягнення процесом загасання насичення говорить про те, що товщина покриття є оптимальною, а при подальшому збільшенні товщини покриття рівень загасання буде знижуватися [9].

**Визначення ефективної поверхні розсіювання.** Розрахунки ЕПР проводилися для пластин зі сплаву Д16 площею  $0,1\text{ м}^2$  в інтервалі частот 8–12 ГГц. Величини енергій, отриманих від пластинок зі сплаву Д-16 без покриття і з покриттям, структура якого відповідає першому варіанту вирішення задачі оптимізації (табл. 1) вимірювалися в безлунової камері. При цьому розрахунок значення ЕПР проводився при повороті пластин в азимутальному напрямку з кроком  $10^\circ$ . Отримані результати свідчать про значне зниження ЕПР при нанесенні на металеву пластинку покриття з феритовмісного матеріалу. При цьому в ході експериментів було встановлено, що

ЕПР непокритої пластинки з алюмінієвого сплаву Д-16 збільшувалася в міру збільшення частоти випромінювання. Це пов'язано з тим, що величина ЕПР обернено пропорційна довжині хвилі падаючого випромінювання і прямо пропорційна його частоті. Було встановлено, що ЕПР непокритої пластинки зі сплаву Д-16 становить  $84,6\text{ м}^2$  при 8 ГГц і  $195,68\text{ м}^2$  при 12 ГГц. Динаміку зниження величини ЕПР можна спостерігати за даними, наведеними в табл. 4, табл. 5 і 6 після нанесення другого, третього і четвертого шарів відповідно. Величина ЕПР пластинки з двошаровим покриттям становить  $70,4\text{ м}^2$  при 8 ГГц, що на 14,2% менше, ніж у такої ж пластинки без покриття. У міру збільшення частоти випромінювання ЕПР пластинки буде збільшуватися. Величина ЕПР в такому випадку становитиме  $147,8\text{ м}^2$  при частоті 12 ГГц, що на 18,95% менше, ніж у такої ж пластинки без покриття. На частоті 10 ГГц ЕПР пластинки з двошаровим покриттям знижується на  $42,6\text{ м}^2$ , що складає 34,5%.

Після нанесення третього шару покриття величина ЕПР знижується на 27,8% на частоті 8 ГГц і на 11,8% на частоті 12 ГГц відповідно.

При нанесенні чотиришарового покриття мінімальне значення ЕПР спостерігається на частоті 8 ГГц. На цій частоті воно становить  $54,8\text{ м}^2$ , що на  $29,38\text{ м}^2$  менше ніж ЕПР непокритої пластинки. У процентному співвідношенні це становить 33,6%. З табл. 4 і табл. 5 видно, що ЕПР для двошарового і тришарового покриття збільшується зі збільшенням частоти. При порівнянні даних, наведених в табл. 4–6, стане видно, що максимальне зниження ЕПР на частоті 8 ГГц відбувається при нанесенні чотиришарового покриття, в той час як на частотах 10–12 ГГц найбільше зниження ЕПР спостерігається вже при двошаровому покритті.

Таблиця 4

Залежність зміни ЕПР від частоти після нанесення двошарового покриття

Частота, $f$ , кГц	ЕПР на непокритому Д16, $\text{м}^2$	ЕПР на покритому Д16, $\text{м}^2$	Зменшення ЕПР $\text{м}^2$	%, зниження ЕПР
8	84,6	70,4	14,3	14,2
9	106,57	85,7	20,87	17
10	126,4	83,8	42,6	34,5
11	158,3	123,7	34,6	20,36
12	195,68	147,8	47,88	18,95

Таблиця 5

Залежність зміни ЕПР від частоти після нанесення тришарового покриття

Частота, $f$ , кГц	ЕПР на непокритому Д16, $\text{м}^2$	ЕПР на покритому Д16, $\text{м}^2$	Зменшення ЕПР $\text{м}^2$	%, зниження ЕПР
8	84,6	58,27	26,33	27,8
9	106,57	83,12	20,87	22,6
10	126,4	93,8	42,6	21,8
11	158,3	114,7	34,6	10,6
12	195,68	126,8	47,88	11,8



Таблиця 6

Залежність зміни ЕПР від частоти після нанесення чотиришарового покриття

Частота, $f$ кГц	ЕПР на непокритому Д16, м <sup>2</sup>	ЕПР на покритому Д16, м <sup>2</sup>	Зменшення ЕПР м <sup>2</sup>	%, зниження ЕПР
8	84,6	54,8	29,38	33,6
9	106,57	85,4	21,17	19,8
10	126,4	103,7	22,6	18,7
11	158,3	121,6	36,7	16,7
12	195,68	169,3	26,88	9,3

## Висновки

В результаті дослідження було отримано чотиришарове радіопоглинальне покриття, параметри якого були оптимізовані за допомогою генетичного алгоритму оптимізації. А саме: було визначено придатні для використання феритні матеріали, їх поєднання, та оптимізована послідовність нанесення шарів з цих матеріалів і товщина кожного з них. Для практичної реалізації таких РПП були приготовлені компоненти у вигляді лакофарбових матеріалів, основа яких на 40% складалася з латексного клею PUNTACOL C, а наповнювачем служили феритні матеріали, склад яких наведено в табл. 1. Практична реалізація багатошарових РПП описаного вище складу і оптимізованих за допомогою генетичного алгоритму оптимізації дає досить обнадійливі результати. Оптимізовані генетичним алгоритмом шари феритних матеріалів та їх товщини були реалізовані в покритті та протестовані на поглинаючу здат-

ність методом віднімання відображених енергій на частотах 8–12 ГГц. В результаті цих тестів було встановлено, що загасання збільшується при збільшенні кількості шарів, і при 4-шаровому покритті загасання стабілізується. Потім ті ж шари наносили на пластинку з алюмінієвого сплаву Д-16 розміром (304,8×304,8 мм<sup>2</sup>) і вимірювали ЕПР в інтервалі частот 8–12 ГГц як для непокритих пластин, так і пластин з покриттям.

Результати показали, що ЕПР знижується на 10-35% при нанесенні феритового покриття. Найкращі результати по ЕПР були отримані на частоті 10 ГГц в разі двошарового покриття і на частоті 8 ГГц.

З вищенаведених результатів можна зробити висновок, треба оптимізувати товщину шару РПП для кожної конкретної частоти, щоб було легко створити багатошарову систему, що відповідає вимогам рівномірного широкосмугового поглинання.

## Список літератури

1. Menshova S.B. Tendencies in creating modern radio absorbing materials and coatings / S.B. Menshova // Надежность и качество сложных систем. – 2016. – № 4(16). – С. 51-59. <https://doi.org/10.21685/2307-4205-2016-4-8>.
2. Перспективи створення радіопоглинаючих матеріалів в Україні / Г.В. Лісачук, Р.В. Кривобок, Я.М. Пітак, І.В. Шуба, Ю.О. Юдін, Л.П. Тижненко, В.В. Петров, А.В. Шовкопляс, А.В. Захаров // Міжнародна наукова конференція MicroCAD: Секція № 11. – Рішення поліваріантних задач у хімічній технології. – НТУ “ХПИ”, 2013.
3. Антипов С.А. Обзор радиопоглощающих структур на основе электромагнитных искусственных поверхностей / С.А. Антипов, А.Ф. Латыпова, Ю.Г. Пастернак // Вестник Воронежского государственного технического университета. – 2014. – № 5.1.(16) – С. 9-15.
4. Radar absorbing materials and coatings [Electronic resource]. – Available at: [http://www.ru.wikipedia.org/wiki/Radar\\_absorbing\\_materials\\_and\\_coatings](http://www.ru.wikipedia.org/wiki/Radar_absorbing_materials_and_coatings) (accessed 4 April 2019).
5. Kolev S. Nanosized Ferrite Materials for Absorption of and Protection from MW Radiation [Electronic resource] / S. Kolev, T. Koutzarova // Advanced Nanotechnologies for Detection and Defence against CBRN Agents. – 2018. – P. 273-284. Available at: [https://doi.org/10.1007/978-94-024-1298-7\\_26](https://doi.org/10.1007/978-94-024-1298-7_26).
6. Saville P. Review of Radar Absorbing Materials. Defense Research and Development Canada [Electronic resource] / P. Saville // Technical Memorandum DRDC Atlantic TM 2005-003. – 2005. – 63 p. Available at: <https://apps.dtic.mil/dtic/tr/fulltext/u2/a436262.pdf>.
7. Латыпова А.Ф. Анализ перспективных радиопоглощающих материалов / А.Ф. Латыпова, Ю.Е. Калинин // Вестник Воронежского государственного технического университета. – 2012. – № 6. – С. 70-76.
8. Synthesis of radar absorbing materials for stealth aircraft by using nanomaterials and evolutionary computation [Electronic resource] / D. Micheli, R. Pastore, A. Vricella, R. Morles, M. Marchetti // 29-th Congress of the International Council Aeronautic Sciences. September 7-12, 2014. Available at: <https://doi.org/10.13140/2.1.3660.1920>.
9. Shin J.Y. The Microwave Absorbing Phenomena of Ferrite Microwave Absorbers [Electronic resource] / J.Y. Shin, J.H. Oh // IEEE Transactions on Magnetics. – 1993. – No. 6(29), P. 3437-3439. Available at: <https://doi.org/10.1109/20.281188>.
10. Costa F. Analysis and Design of Ultra Thin Electromagnetic Absorbers Comprising Resistively Loaded High Impedance Surfaces / F. Costa, A. Monorchio, G. Manara // IEEE Transactions on Antennas and Propagation. – 2010. – No. 5(58). – P. 1551-1558.

11. Meshram M. Development and Characterization of Ferrite Based Microwave absorbers. Ph. D. Thesis. Electronics and computer Engineering Department, Indian institute of Technology, Roorkee, India, 2004.
12. Pesque J. Optimization of multilayered anti-reflection coating using an optimal control method [Electronic resource] / J. Pesque, D. Bouche, R. Mittra // IEEE Trans Microwave Technology (USA). – 1992. – No. 40, P. 1789-1796.
13. Kirkpatrick S. Optimization by simulated annealing / S. Kirkpatrick, C.D. Gelatt, M.P. Vecchi // Science USA. – 1983. – № 4598(220), pp. 671-680.
14. Piao D. Broadband electromagnetic absorber designs using genetic algorithm [Electronic resource] / D. Piao, Y. Li, G. Lu // IEEE Automation Congress. – 2008. Available at: <https://ieeexplore.ieee.org/document/4699152>.
15. Design of lightweight, broad-band microwave absorbers using genetic algorithms [Electronic resource] / E. Michielssen, J.M. Sajer, S. Ranjithan, R. Mittra // IEEE Trans. Microwave Theory and Techniques. – 1993. – № 41, P. 1024-1031.
16. Синтез і властивості наноструктур, поглинаючих надвисокочастотне електромагнітне та нейтронне випромінювання / П.П. Горбик, С.М. Махно, І.В. Дубровін, М.В. Абрамов, В.М. Міщенко, Р.В. Мазуренко, А.Л. Петрановська, С.В. Пилипчук, С.Л. Прокопенко // Наносистеми, наноматеріали, нанотехнології. – 2017. – № 1(15). – С. 47-82.
17. Григорьев А.Д. Электродинамика / А.Д. Григорьев, В.Б. Янкевич. – СПб.: ПБГЭТУ “ЛЭТИ”, 2007. – 80 с.
18. Efficient procedures for the optimization of frequency selective surfaces / F. Arya, M. Matthew, H. Christian, V. Rudiger // IEEE Transactions on Antennas and Propagation. – 2009. – № 5(56). – P. 1340-1349.

## References

1. Menshova, S.B. (2016), Tendencies in creating modern radio absorbing materials and coatings, *Reliability and Quality of Complex Systems*, No. 4(16), pp. 51-59. <https://doi.org/10.21685/2307-4205-2016-4-8>.
2. Lisachuk, G.V., Lisachuk, G.V., Krivobok, R.V., Pitak, Ya.M., Shuba, I.V., Yudin, Yu.O., Tizhnenko, L.P., Petrov, V.V., Shovkoplyas, A.V. and Zaharov, A.V. (2013), “Perspektyvy stvorenniya radiopoglyayuchykh materialiv v Ukraini” [Prospects for creation of radar absorbing materials in Ukraine], *International scientific conference MicroCAD : Section №11 - Solution of polyvariant problems in chemical technology*, NTU “KPI”, Kharkiv, p. 257.
3. Antipov, S.A., Latypova, A.F., and Pasternak, Yu.G. (2014), “Obzor radiopogloshchayushchih struktur na osnove elektromagnitnyh iskusstvennyh poverhnostej” [Review of radar absorbing structures based on artificial electromagnetic surfaces], *Bulletin of Voronezh state technical University*, No. 5.1(16), pp. 9-15.
4. *Radar absorbing materials and coatings*, available at: [https://ru.wikipedia.org/wiki/Radar absorbing materials and coatings](https://ru.wikipedia.org/wiki/Radar_absorbing_materials_and_coatings), (accessed 4 April 2019).
5. Kolev, S. and Koutzarova, T. (2018), Nanosized Ferrite Materials for Absorption of and Protection from MW Radiation, *Advanced Nanotechnologies for Detection and Defense against CBRN Agents*. pp. 273-284, available at: [https://doi.org/10.1007/978-94-024-1298-7\\_26](https://doi.org/10.1007/978-94-024-1298-7_26).
6. Saville, P. (2005), Review of Radar Absorbing Materials, Defense Research and Development Canada, *Technical Memorandum DRDC Atlantic TM 2005-003*, 63 p., available at: <https://apps.dtic.mil/dtic/tr/fulltext/u2/a436262.pdf>.
7. Latypova, A.F. and Kalinin, Yu.E. (2012), “Analiz perspektivnykh radiopogloshchayushchih materialov” [Analysis of promising radio absorbing materials], *Bulletin of the Voronezh State Technical University*, No. 6, pp. 70-76.
8. Micheli, D., Pastore, R., Vricella, A., Morles, R.B. and Marchetti, M. (2014), Synthesis of radar absorbing materials for stealth aircraft by using nanomaterials and evolutionary computation, *29-th Congress of the International Council Aeronautic Sciences*, pp. 1-10, available at: <https://doi.org/10.13140/2.1.3660.1920>.
9. Shin, J.Y. and Oh, J.H. (1993), The Microwave Absorbing Phenomena of Ferrite Microwave Absorbers, *IEEE Transactions on Magnetics*, No. 6(29), pp. 3437-3439, available at: <https://doi.org/10.1109/20.281188>.
10. Costa, F., Monorcio, A. and Manara, G. (2010), Analysis and Design of Ultra Thin Electromagnetic Absorbers Comprising Resistively Loaded High Impedance Surfaces, *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, No. 5(58), pp. 1551-1558.
11. Meshram, M. (2004), *Development and Characterization of Ferrite Based Microwave absorbers*, Ph. D. Thesis, Indian Institute of Technology, Roorkee, India.
12. Pesque, J., Bouche, D. and Mittra, R. (1992), Optimization of multilayered anti-reflection coating using an optimal control method, *IEEE Transactions Microwave Theory and Technology (USA)*, No. 40, pp. 1789-1796.
13. Kirkpatrick, S., Gelatt, C.D. and Vecchi, M.P. (1983), Optimization by simulated annealing, *Science*, No. 4598(220), pp. 671-680.
14. Piao, D., Li, Y. and Lu, G. (2009), Broadband electromagnetic absorber designs using genetic algorithm, *IEEE Automation Congress, WAC 2009*, available at: <https://ieeexplore.ieee.org/document/4699152>.
15. Michielssen, E., Sajer, J.M., Ranjithan, S., and Mittra, R. (1993), Design of lightweight, broad-band microwave absorbers using genetic algorithms, *IEEE Transaction. Microwave Theory and Techniques*, Vol. 41, pp. 1024-1031.
16. Gorbik, P.P., Mahno, S.M., Dubrovin, I.V., Abramov, M.V., Mishchenko, V.M., Mazurenko, R.V., Petranov'ska, A.L., Pilipchuk, E.V. and Prokopenko, S.L. (2017), “Syntez i vlastyivosti nanostruktur, pohlynaiuchykh nadvysokochastotne elektromagnitne ta neitronne vyprominennia” [Synthesis and properties of nanostructures absorbing microwave electromagnetic and neutron radiation], *Nanosystems, Nanomaterials, Nanotechnology*, No. 1(15), pp. 47-82.
17. Grigor'ev, A.D. and Yankevich, V.B. (2007), “Electrodinamica” [Electrodynamics], “LETI”, St. Petersburg, 80 p.
18. Arya, F., Matthew, M., Christian, H. and Rudiger, V. (2009), Efficient procedures for the optimization of frequency selective surfaces, *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, No. 5(56), pp. 1340-1349.

Надійшла до редколегії 24.04.2019

Схвалена до друку 18.06.2019

**Відомості про автора:****Чубукін Олександр Сергійович**

кандидат технічних наук доцент  
Харківського національного  
університету Повітряних Сил ім. І. Кожедуба,  
Харків, Україна  
<https://orcid.org/0000-0002-2410-4563>

**Information about the author:****Oleksandr Chubukin**

Candidate of Technical Sciences Senior Lecturer  
of Ivan Kozedub Kharkiv National  
Air Force University,  
Kharkiv, Ukraine  
<https://orcid.org/0000-0002-2410-4563>

**ПОЛУЧЕНИЕ МНОГОСЛОЙНОГО РАДИОПОГЛОЩАЮЩЕГО ПОКРЫТИЯ НА ОСНОВЕ ФЕРРИТОВ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ГЕНЕТИЧЕСКОГО АЛГОРИТМА ОПТИМИЗАЦИИ ЭФФЕКТИВНОЙ ПОВЕРХНОСТИ РАССЕЙЯНИЯ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ ВОЛН В ИНТЕРВАЛЕ ЧАСТОТ 8-12 ГГц**

А.С. Чубукін

В работе была проанализирована возможность использования эволюционных методов расчета с генетическим алгоритмом оптимизации для разработки и создания радиопоглощающих покрытий на основе ферритов, способных увеличивать радиопоглощающую способность отражающих поверхностей и снижать эффективную площадь рассеяния в интервале частот 8–12 ГГц. Для этого был подобран ряд ферритных материалов, у которых экспериментально определялись частотные зависимости показателей диэлектрической и магнитной проницаемостей  $\epsilon(f)$  и  $\mu(f)$ , от которых зависят радиопоглощающие свойства покрытий. Полученные данные зависимостей  $\epsilon(f)$  и  $\mu(f)$  были сведены в базу данных и использовались потом в качестве исходных для генетического алгоритма поиска наиболее подходящих ферритных материалов, способных обеспечивать максимальную радиопоглощающую способность и минимизацию эффективной поверхности рассеяния (ЭПР) в интервале частот 8–12 ГГц. С той же целью, и при помощи того же генетического алгоритма оптимизации установлен ряд возможных последовательностей нанесения слоев из отобранных ферритных материалов и проведена оптимизация их толщин. По полученным в результате оптимизации данным был смоделирован ряд четырехслойных покрытий на пластинах из алюминиевого сплава Д-16, используемого в производстве планеров военных истребителей, которые в теории должны существенно повышать радиопоглощающую способность и снижать ЭПР. Для проверки истинности полученных результатов оптимизации и моделирования был выбран один из вариантов покрытия, который был реализован на практике. В ходе реализации были подготовлены специальные составы на основе латексного компаунда PUNTACOL C, смешанного с ферритными материалами, прошедшими отбор генетическим алгоритмом, и послойно нанесены на поверхность пластин алюминиевого сплава Д-16. После нанесения покрытий были проведены измерения радиопоглощающей способности и величины ЭПР. Измерение радиопоглощающей способности проводилось методом вычитания отраженных энергий, в безэховой камере специально изготовленным прибором. Измерение ЭПР проводилось при помощи моностатических радиоизмерений в интервале частот 8–12 ГГц в той же безэховой камере. В результате измерения было установлено, что нанесение выбранного вида покрытия значительно повышает радиопоглощающую способность отражающих поверхностей и снижает ЭПР в интервале частот 8–12 ГГц.

**Ключевые слова:** эффективная поверхность рассеивания, генетический алгоритм поиска, целевая функция пригодности, эволюционные методы расчета.

**OBTAINING A MULTILAYER FERRITE-BASED RADIO ABSORBING COATING USING A GENETIC ALGORITHM FOR OPTIMIZING THE EFFECTIVE SCATTERING SURFACE OF ELECTROMAGNETIC WAVES IN THE FREQUENCY RANGE 8-12 GHZ**

O. Chubukin

The possibility of using the evolutionary methods of computation based on genetic optimization algorithm for the development and creation of ferrite radar absorbing coating, increasing the radio absorption of reflecting surfaces and reducing radar cross-section (RCS) within 8-12 GHz range was analyzed. For this purpose selected a number of ferrite materials which frequency dependencies of the dielectric and magnetic permeabilities were determined experimentally. The obtained data of dependencies  $\epsilon(f)$  and  $\mu(f)$  were compiled into a database, which served as the basis for a genetic algorithm for finding the most suitable ferrite materials capable of providing maximum radio absorbing capacity and minimizing the radar cross-section in the frequency range of 8-12GHz. For the same purpose, and with the help of the same genetic optimization algorithm, a number of possible sequences of layers from the selected ferrite materials were established and their thickness was optimized. For the same purpose, and with the help of the same genetic optimization algorithm, a number of possible sequences of layers from the selected ferrite materials were established and their thickness was optimized. For the resulting optimization data were modeled a number of four-layer coatings on the plates of aluminum alloy D16, which is used in the manufacture of gliders military fighter jets, and that in theory should significantly improve radar-absorbing capacity and reduce the RCS. To verify the validity of the obtained results of optimization and modeling, one type of coatings out of possible has been chosen and implemented in practice. During the implementation, the special compositions based on the latex compound PUNTACOL C mixed with ferrite materials were prepared, and then layer-by-layer applied on surface of D16 aluminum alloy plates. After deposition of coatings, measurements of the radio absorbing ability and the magnitude of the RCS were made. Measurements of radar absorbing ability were conducted by subtracting the reflected energy by specially manufactured device in an anechoic chamber. The RCS measurements were carried out using monostatic radio measurements in the frequency range 8-12GHz in the same anechoic chamber. As a result of measurements it was found that the application of the selected coating significantly increases the radar absorbing ability of reflecting surfaces and reduces the RCS in the frequency range 8-12 GHz.

**Keywords:** radar cross-section, genetic optimization algorithm, fitness function, evolutionary methods of computation.