

МОДЕЛЬ ПОГЛИНАЛЬНОЇ СИСТЕМИ НА ОСНОВІ МЕТАМАТЕРІАЛУ

Мазур К. С., Діденко Ю. В.

Національний технічний університет України

«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського», Київ, Україна

E-mail: k.mazur-me28@iill.kpi.ua

У статті представлено математичну модель багатошарової мікрохвильової поглинальної системи на основі метаматеріалів, спрямовану на ефективне зниження коефіцієнта відбиття електромагнітних хвиль у діапазоні 2–18 ГГц. Робота актуалізує проблему розробки тонкошарових та недорогих матеріалів із широкосмуговими поглинальними властивостями, що мають значення як у цивільних, так і у військових застосуваннях (захист від електромагнітного впливу, радіолокаційна маскувальна техніка тощо). У дослідженні проаналізовано вплив комплексних діелектричної та магнітної проникностей на коефіцієнт відбиття, а також побудовано залежності S -параметрів для різних типів метаатомів. Проведено порівняння найпоширеніших резонансних структур – кільцевих, спіральних, H -типу та Split-Ring Resonator (SRR) – з погляду їх ефективності в широкому діапазоні частот. Показано, що концентричні кільцеві резонатори забезпечують найбільшу кількість резонансних піків.

Запропоновано конструкцію семикільцевого метаатома, оптимізовану за результатами чисельного моделювання (розмір елементарної комірки – 9×9 мм). Моделювання показало наявність шести піків поглинання в межах від $-8,8$ до $-10,5$ дБ, що засвідчує резонансний характер системи. Для підвищення ефективності поглинання розроблено комбіновану структуру, де поверхня метаматеріалу покрита модельним поглинальним матеріалом. Отримана система демонструє коефіцієнт поглинання понад 10 дБ у широкій смузі 3,3–18 ГГц, а при збільшенні товщини поглинального шару до 2 мм – від 15 до 25 дБ.

Обґрунтовано перспективність застосування багатошарових метаматеріальних структур для створення широкосмугових мікрохвильових поглиначів. Подальші дослідження мають бути спрямовані на експериментальну реалізацію та оптимізацію геометричних параметрів, зменшення товщини покриття і розширення діапазону поглинання нижче 3 ГГц.

Ключові слова: метаматеріал, метаатом, поглинання, відбивання, широкосмуговий поглинальний матеріал, мікрохвилі.

Вступ. Постановка проблеми

Протягом останніх десятиліть розвиток мікрохвильових технологій охопив практично всі галузі електроніки – від радіолокації та зв'язку до сенсорних систем і побутових приладів. Паралельно з ростом кількості таких пристроїв зростає рівень електромагнітного випромінювання в навколишньому середовищі, що створює потребу у його ефективному поглинанні. Мікрохвильові поглинальні матеріали набувають ключового значення для забезпечення електромагнітної сумісності, зниження рівня перешкод, захисту електроніки, а також для реалізації стелс-технологій у військовій сфері [1]. Традиційні матеріали, такі як ферити, полімери з провідними наповнювачами чи магнетодіелектрики, мають низку обмежень – значну масу, високу вартість або вузький робочий діапазон частот [2]. Сучасні вимоги до електронних систем передбачають використання легких, тонких і водночас ефективних поглинальних покриттів, здатних працювати в широкому частотному діапазоні. Це зумовило перехід до нової концепції – метаматеріалів, тобто штучно структурованих середовищ, електромагнітні властивості яких визна-

чаються не лише хімічним складом, а й геометрією елементарних комірок (мета-атомів). Метаматеріали дозволяють керувати діелектричною та магнітною проникністю, створювати від'ємні значення цих параметрів і досягати резонансних ефектів у заданому діапазоні частот [3]. Завдяки цьому вони відкривають нові можливості для розробки широкосмугових мікрохвильових поглиначів. Особливо перспективним є поєднання резонансних властивостей метаатомів з дисипативними характеристиками наноструктурованих матеріалів – зокрема графенових пін або вуглецевих нанотрубок.

Таким чином, створення мікрохвильового поглинального метаматеріалу є міждисциплінарною задачею, що поєднує матеріалознавство, електродинаміку та нанотехнології.

Основна мета дослідження полягає у розробці математичної моделі багатошарової системи, визначенні залежностей коефіцієнта відбиття від електрофізичних параметрів і пошуку оптимальних геометричних рішень для ефективного поглинання електромагнітного випромінювання в діапазоні 2–18 ГГц.

Аналіз останніх досліджень

Сучасний розвиток мікрохвильової техніки супроводжується активним пошуком матеріалів, здатних ефективно поглинати електромагнітне випромінювання в широкому частотному діапазоні. Історично основу таких досліджень становили класичні поглинальні матеріали – ферити, магнетодіелектрики та полімерні композити з провідними домішками. Феритові матеріали характеризуються високим рівнем електромагнітних втрат, однак мають значну густину та обмежений діапазон робочих частот, що суттєво ускладнює їх застосування в легких конструкціях та мобільних системах [4]. Полімерні композити, навпаки, легкі та технологічні, проте зазвичай демонструють невисокий коефіцієнт поглинання, особливо у високочастотній області. Таким чином, жоден із традиційних підходів не забезпечує необхідного поєднання властивостей: високої ефективності, малої маси, ширококутності та економічної доцільності. Наукові дослідження останніх десятиліть спрямовані на пошук нетривіальних матеріалів, зокрема наноструктурованих композитів, які поєднують електропровідність, магнітну реакцію та структурну стабільність. Значного поширення набули вуглецеві нанотрубки (CNT), графенові та МХФЕ-структури, що завдяки великій питомій поверхні та здатності формувати пористі каркаси демонструють високі поглинальні характеристики [5 – 7]. Так, наприклад, композиції на основі Fe–CNT показують коефіцієнт поглинання близько –10 дБ у діапазоні 12–14 ГГц, а вуглецеві стільники (Carbon Honeycomb) досягають подібних результатів у ширшій смузі 2–18 ГГц. Однак ці матеріали залишаються складними у виробництві й потребують ретельного контролю морфології [8 – 9]. Інші перспективні композити, такі як CdS–MWCNTs, забезпечують високе поглинання лише за підвищених температур (50–250 °C), що обмежує їх практичне використання. Розвиток теорії метаматеріалів, започаткований роботою В. Г. Веселаго [10], відкрив новий напрям у створенні штучних структур із керованими електромагнітними властивостями. На відміну від класичних матеріалів, поглинання в метаматеріалах визначається не хімічним складом, а геометрією елементарних комірок – метаатомів [11]. Такі структури здатні формувати від’ємні значення діелектричної або магнітної проникності, що дозволяє створювати резонансні умови для ефективного поглинання енергії. Проте більшість метаматеріалів із високими показниками поглинання функціонують переважно в терагерцовому діапазоні, що зумовлено співмірністю довжини хвилі та розміру метаатома [12]. Тому сучасні дослідження зосереджені на розробці метаматеріалів мікрохвильового діапазону з адаптованою геометрією елементів і поєднанням резонансних та дисипативних механізмів погли-

нання. Особливу увагу приділено комбінованим системам, у яких резонансна структура метаматеріалу покривається поглинальним композитом (наприклад, на основі графенової піни). Такий підхід дозволяє досягти коефіцієнта поглинання понад –10 дБ у діапазоні 2–18 ГГц при товщині шару 2–4 мм. Саме в цьому напрямі сьогодні зосереджено основні зусилля дослідників – у пошуку оптимального поєднання геометрії метаатомів і властивостей композитних матеріалів для створення ефективних, легких та ширококутних мікрохвильових поглинальних покриттів нового покоління.

Мета роботи. Розроблення ширококутної поглинальної системи мікрохвильового діапазону на основі метаматеріалу.

Матеріали та методи досліджень

Як зазначалося вище, розроблення нових типів метаматеріалів є одним із найперспективніших напрямів сучасного матеріалознавства у сфері мікрохвильової техніки. Метаматеріали становлять клас штучно структурованих середовищ, для яких характерна наявність від’ємних значень діелектричної або магнітної проникності у певному частотному діапазоні [10]. Це забезпечує можливість цілеспрямованого керування електромагнітною взаємодією матеріалу з падаючою хвилею, зокрема створення умов для її ефективного поглинання.

Процес розроблення мікрохвильових поглинальних метаматеріалів, як правило, полягає у побудові елементарної комірки – метаатома – та подальшій трансляції цієї комірки у площині з метою формування періодичної структури. Елементарна комірка метаматеріалу зазвичай складається з металевих підкладки, діелектричного шару та металізованого рисунка на поверхні діелектрика. Така структура забезпечує виникнення резонансного відгуку на дію падаючої електромагнітної хвилі, що визначає її ефективні поглинальні властивості.

За умови резонансної взаємодії між падаючою хвилею та метаатомом у матеріалі індукуються локальні електричні та магнітні поля, які сприяють дисипації електромагнітної енергії. Важливою особливістю є вплив ступеня металізації поверхні на ефективність цього процесу. При недостатній металізації структура не формує повноцінного резонансного контуру, що призводить до зниження амплітуди індукованих струмів і, відповідно, ефективності поглинання. Надмірна металізація, своєю чергою, спричиняє зростання коефіцієнта відбиття через підвищене дзеркальне відбивання хвилі [11]. Таким чином, геометричні параметри поверхневої металізації – ширина, форма, відстань між елементами та товщина шару – мають вирішальне значення для досягнення оптимального балансу між резонансною відповіддю та поглинальною здатністю матеріалу.

З огляду на резонансний характер метаматеріалів, доцільним є аналіз основних типів елементарних комірок, які використовуються у сучасних дослідженнях. Найпростішою та однією з базових структур є кільцевий резонатор [13]. Його конструкція передбачає використання діелектричної підкладки із суцільним металевим заземленням з одного боку та металевого кільця, нанесеного на протилежну поверхню. Падаюча електромагнітна хвиля орієнтується перпендикулярно до площини кільця, що забезпечує збудження індукованих струмів уздовж контуру резонатора (рис. 1). За певних геометричних параметрів комірки та відповідної частоти збудження така структура виявляє чітко виражений резонансний відгук, який зумовлює інтенсивне поглинання енергії електромагнітного поля.

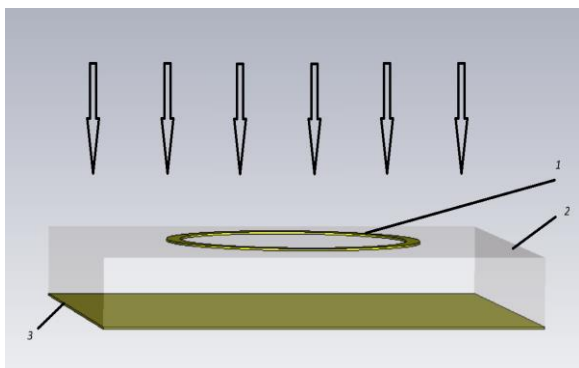


Рис. 1. Схематичне зображення кільцевої елементарної комірки та напрям поширення падаючої електромагнітної хвилі. Стрілками вказано напрям поширення електромагнітної хвилі, 1 – кільцева металізація метаатому, 2 – діелектрична підкладка, 3 – металізація підкладки

Під час дії падаючої електромагнітної хвилі у структурі метаматеріалу виникає індукований струм, який формує локальну електромагнітну реакцію матеріалу. За певної частоти випромінювання, відповідної до резонансної частоти системи, цей індукований струм циркулює по замкненому контуру металізації, виявляючи індуктивну поведінку елементарної комірки. Величина індуктивності при цьому визначається, передусім, зовнішнім та внутрішнім діаметрами кільця, а також товщиною провідного шару.

У випадку збільшення кількості кілець до двох або більше, розташованих концентрично, між ними утворюється діелектричний проміжок, який проявляє ємнісну поведінку. Таким чином, у структурі одночасно реалізуються індуктивні та ємнісні властивості, що формують LC-резонансну систему. Кожне кільце в межах такої структури відповідає власній резонансній частоті, на якій спостерігається максимум поглинання електромагнітної енергії. Ця енергія, у свою чергу, дисипується в матеріалі переважно у вигляді тепла.

Метаматеріал, створений шляхом періодичної трансляції таких концентричних кільцевих елементів у площині, виявляє поглинальні властивості в кількох вузьких частотних діапазонах, що відповідають резонансним частотам окремих кілець. Кількість концентричних кілець безпосередньо визначає кількість піків поглинання електромагнітної енергії. Отже, збільшення кількості кілець є одним із ефективних методів розширення робочої смуги поглинання мікрохвильового метаматеріалу.

Другим типом елементарної комірки метаматеріалу, який отримав широке застосування завдяки підвищеній ефективності поглинання електромагнітного випромінювання, є розщеплений кільцевий резонатор (Split-Ring Resonator, SRR). Дана структура належить до найвідоміших і найефективніших типів метаатомів, що використовуються для формування метаматеріалів із негативною ефективною магнітною проникністю. Концепцію SRR було запропоновано та експериментально реалізовано Джоном Пендрі наприкінці 1990-х років, що стало важливою віхою у становленні фізики метаматеріалів [14 – 15]. Саме SRR-структури поклали початок створенню матеріалів із негативним показником заломлення, які вперше продемонстрували можливість керування напрямком поширення електромагнітної хвилі у середовищі (рис. 2).

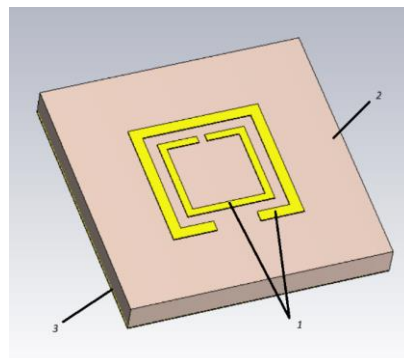


Рис. 2. Схематичне зображення елементарної комірки розщепленого кільцевого резонатора, де 1 – концентрична металізація метаатому SR, 2 – діелектрична підкладка, 3 – металізація підкладки

SRR являє собою елементарний резонансний контур (рис. 3), який реалізує індуктивно-ємнісну (LC) резонансну поведінку при певній частоті збудження. Конструктивно SRR складається з одного або кількох металевих кілець із розривом (щілиною), розташованих концентрично на поверхні діелектричної підкладки. Наявність розриву забезпечує ємнісний зв'язок між краями кільця, тоді як сам провідний контур формує індуктивну складову системи [16]. Таким чином, SRR можна розглядати як паралельне поєднання індуктивного

та ємнісних елементів, що зумовлює виникнення локального LC-резонансу.

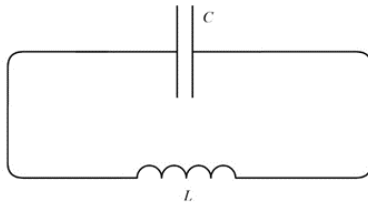


Рис. 3. Еквівалентна схема елементарної комірки розщепленого кільцевого резонатора: C – еквівалентна ємність, L – еквівалентна індуктивність

Коли падаюча електромагнітна хвиля взаємодіє зі структурою SRR, у кільці індукуються циркулюючий струм, який породжує локальне магнітне поле, орієнтоване протилежно до зовнішнього магнітного поля хвилі. У результаті цього явища структура демонструє негативну ефективну магнітну проникність у діапазоні частот поблизу резонансу. Саме ця властивість робить SRR ключовим елементом для створення магніто-реактивних метаматеріалів [17].

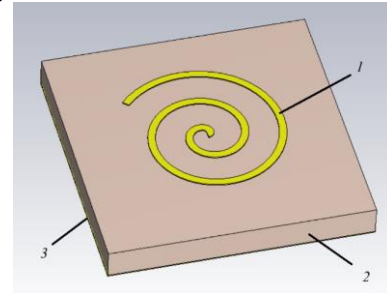
Завдяки тому, що геометричні розміри SRR суттєво менші за довжину хвилі (λ), у межах якої він функціонує, такі структури можна вважати гомогенізованими ефективними середовищами. Це дозволяє описувати їх поведінку у термінах макроскопічних параметрів – ефективних діелектричної та магнітної проникностей. Таким чином, SRR може розглядатися як штучний магнітний диполь, який взаємодіє з падаючою хвилею, забезпечуючи одночасно відбиття, розсіювання та поглинання енергії.

Залежно від геометричних параметрів – кількості кілець, їх діаметра, ширини провідної смуги, відстані між елементами та розміру щілини – можна точно налаштувати резонансну частоту та інтенсивність поглинання. Ця властивість робить SRR одним із найгнучкіших конструктивних елементів для створення багатопарових і широкосмугових мікрохвильових поглинальних метаматеріалів, що поєднують компактність, керуваність та високу ефективність у заданому частотному діапазоні.

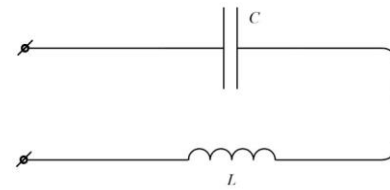
Окрім розглянутих типів елементарних комірок, у структурі метаматеріалів застосовуються також інші різновиди метаатомів, зокрема спіральні та Н-подібні резонатори. Вони характеризуються наявністю еквівалентних індуктивної та ємнісної складових, однак демонструють менш виражений резонансний відгук порівняно з SRR-структурами.

Спіральний резонатор (рис. 4, а) забезпечує збільшену довжину струмового шляху, що сприяє зниженню робочої частоти, проте його поглинальна здатність обмежується високими втратами та

складністю гомогенізації структури [18 – 19]. Відповідна еквівалентна схема (рис. 4, б) описується послідовним LC-контуром із домінуванням індуктивної складової.



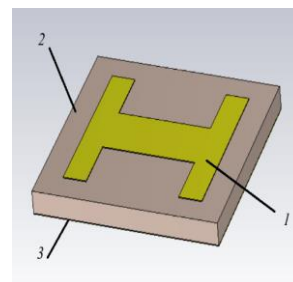
а)



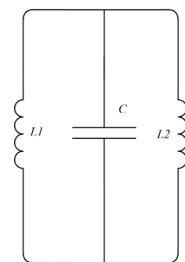
б)

Рис. 4. Схематичне зображення елементарної комірки спірального резонатора (а) та його еквівалентна схема (б): 1 – спіральна металізація метаатому, 2 – діелектрична підкладка, 3 – металізація підкладки, C – еквівалентна ємність, L – еквівалентна індуктивність

Н-резонатор (рис. 5, а) є симетричною структурою, що забезпечує стабільну електричну резонансну відповідь і використовується у випадках, коли необхідно досягти рівномірного розподілу електричного поля в площині метаатому [20]. Його еквівалентна схема (рис. 5, б) включає паралельне поєднання індуктивних і ємнісних елементів.



а)



б)

Рис. 5. Схематичне зображення елементарної комірки Н-резонатора (а) та його еквівалентна схема (б): 1 – Н-металізація метаатому, 2 – діелектрична підкладка, 3 – металізація підкладки, C – еквівалентна ємність, $L1$ та $L2$ – еквівалентні індуктивності

Загалом, зазначені типи комірок характеризуються простотою конструкції, проте поступаються SRR- та кільцевим резонаторам за рівнем поглинання [21].

Аналіз характеристик розглянутих елементарних комірок свідчить, що їх ефективність як поглинальних структур у широкосмуговому мікрохвильовому діапазоні суттєво відрізняється. Н-подібні та спіральні резонатори є унітарними елементами, резонансна поведінка яких не піддається масштабуванню. Збільшення довжини спіралі або розмірів Н-структури лише зміщує резонансну частоту, не розширюючи смугу поглинання. Крім того, моделювання різних варіацій просторового розташування таких елементів показало, що збільшення їх розмірів неминуче призводить до зниження резонансної частоти, що обмежує можливість ефективного використання цих структур для широкосмугових поглиначів.

Результати чисельного моделювання підтверджують, що досягнення широкосмугового ефекту можливе лише у випадку концентричного розташування елементів, характерного для кільцевих та SRR-резонаторів. У структурі SRR концентрація електромагнітного поля відбувається в зоні розриву кільця, що забезпечує виражену магнітну реакцію і високі поглинальні властивості на резонансній частоті. Проте додавання додаткових концентричних SRR-елементів призводить лише до зміщення резонансної частоти, а не до появи декількох незалежних піків поглинання. Це пояснюється тим, що всі розриви кілець ємнісно взаємопов'язані, формуючи єдину еквівалентну ємність, а, отже, – єдиний LC-резонанс.

У кільцевих резонаторах [13], навпаки, кожне кільце та простір між кільцями мають власну індуктивність і ємність, не пов'язані між собою, що зумовлює появу декількох окремих резонансних частот. Саме ця особливість пояснює здатність

концентричних кільцевих структур формувати кілька піків поглинання в межах одного матеріалу. Таким чином, кільцеві резонатори вважаються найбільш придатними для реалізації широкосмугового поглинання електромагнітних хвиль.

Для підтвердження теоретичних висновків було проведено моделювання трикільцевого резонатора (рис. 6).

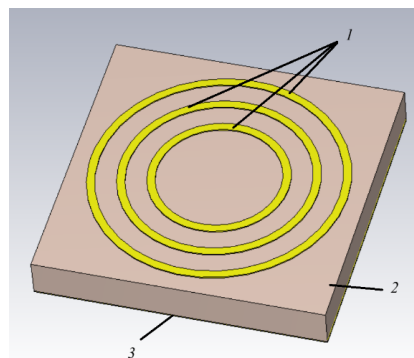


Рис. 6. Схематичне зображення елементарної комірки трикільцевого резонатора: 1 – концентрична потрійна металізація метаатому, 2 – діелектрична підкладка, 3 – металізація підкладки

Отримані частотні залежності S-параметрів (рис. 7) демонструють наявність трьох чітко виражених резонансних піків поглинання, рівень яких перевищує 8 дБ. Це доводить перспективність використання концентричних багатокільцевих структур як основи для створення широкосмугових мікрохвильових метаматеріалів.

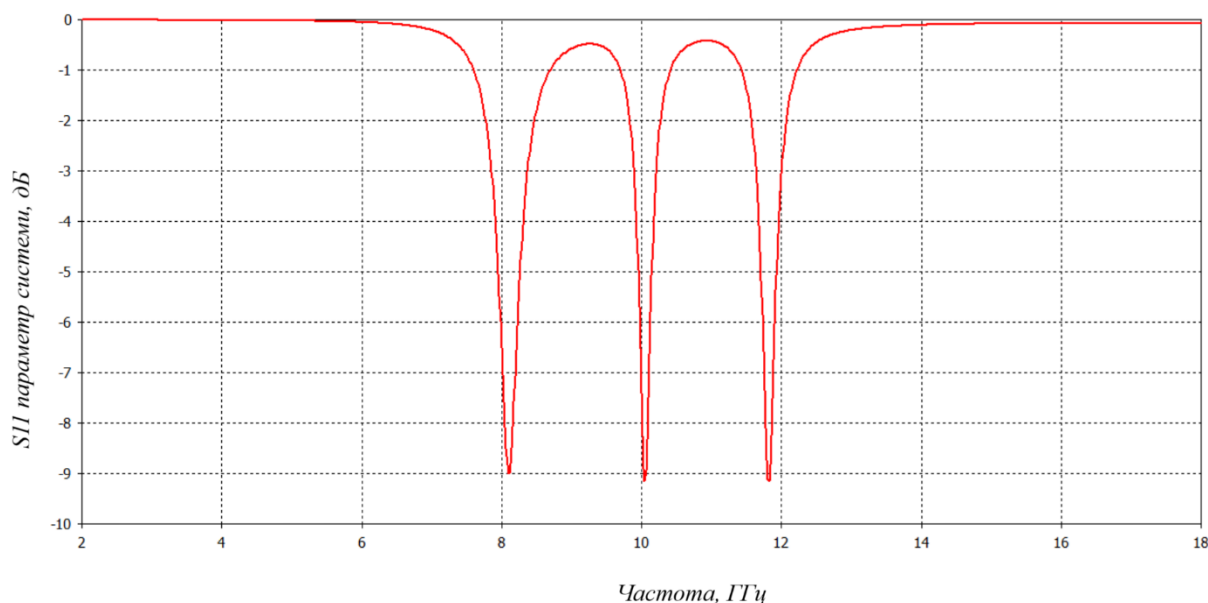


Рис. 7. S11-параметр метаматеріалу з трьохкільцевим резонатором як елементарною коміркою

У процесі масштабування запропонованої структури шляхом чисельного моделювання було визначено геометрію, що забезпечує найбільшу кількість резонансних відгуків. Оптимальним виявився варіант із семикільцевою конфігурацією резонатора (рис. 8), який дозволяє сформувати широкий спектр частот поглинання за рахунок послідовної взаємодії індуктивних і ємнісних елементів у кожному кільці.

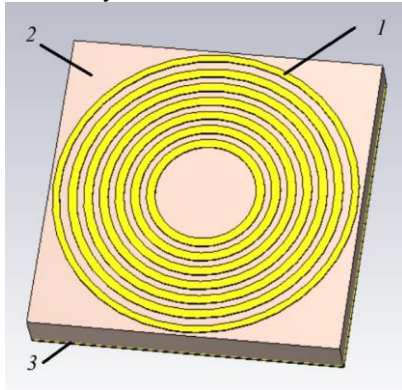


Рис. 8. Схематичне зображення елементарної комірки семикільцевого резонатора: 1 – концентрична семикільцева металізація метаатому, 2 – діелектрична підкладка, 3 – металізація підкладки

Для аналізу впливу геометричних параметрів на частотну характеристику системи було розглянуто метаатом квадратної форми з рівними довжиною та шириною у діапазоні 5–15 мм, що містять різну кількість концентричних кілець. За результатами ітераційного чисельного моделювання встановлено, що найбільш ефективною для широкомуглового мікрохвильового діапазону є елементарна комірка розміром 9×9 мм, у якій досягається

оптимальне співвідношення між розмірами резонатора, кількістю кілець та ефективністю поглинання.

Схематичне зображення розробленої елементарної комірки наведено на рис. 9. Отримані результати демонструють, що така конфігурація забезпечує стабільний резонансний відгук у широкому частотному діапазоні, що підтверджує доцільність використання семикільцевої структури як базового елемента багатошарових мікрохвильових поглинальних метаматеріалів.

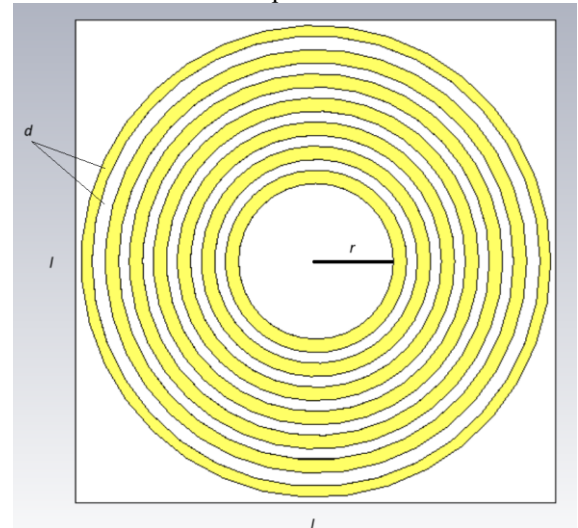


Рис. 9. Геометричні параметри елементарної комірки семикільцевого резонатора: $l=9\text{mm}$, $r=1.5\text{mm}$, $d=0.025\text{mm}$

В результаті моделювання було отримано наступний S11 параметр системи (рис. 10).

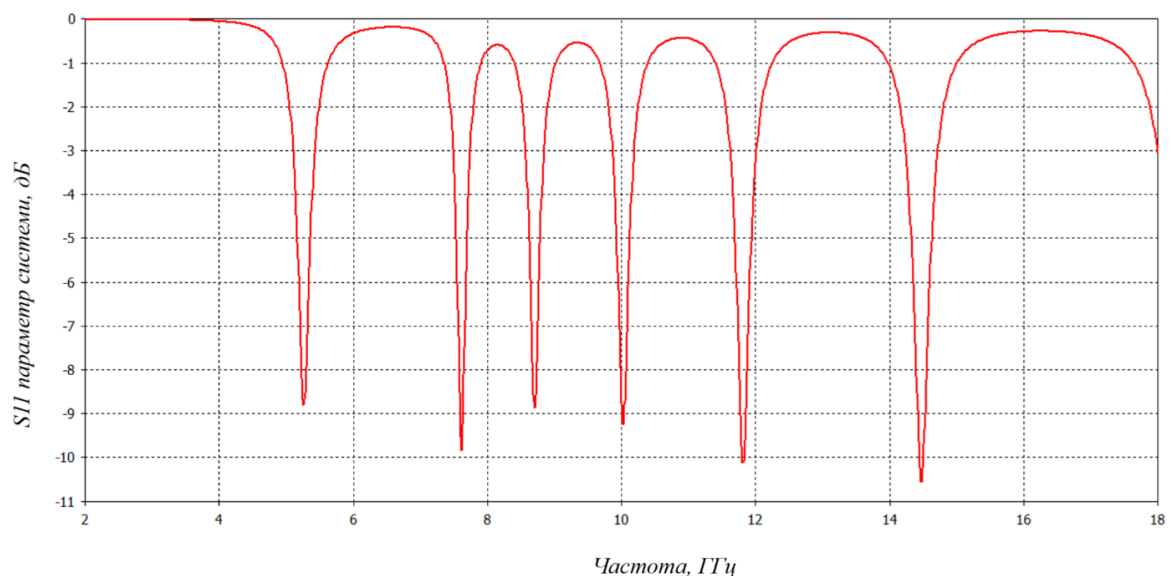


Рис. 10. S11-параметр метаматеріалу з семикільцевим резонатором як елементарною коміркою

Аналіз результатів чисельного моделювання, представлених на рис. 10, показує, що семикільцева структура резонатора формує шість чітко виражених піків поглинання електромагнітної енергії в діапазоні частот від 2 до 18 ГГц. Основні піки поглинання спостерігаються при частотах, близьких до 5.2 ГГц, 7.5 ГГц, 8.6 ГГц, 10 ГГц, 11.8 ГГц та 17.3 ГГц, де коефіцієнт поглинання досягає значень від 8.8 до 10.5 дБ. Попри це, зазначені резонанси мають вузькосмуговий характер, тобто кожен пік відповідає обмеженій частотній області, у межах якої енергія електромагнітного поля ефективно дисипується у матеріалі.

Поза межами резонансних частот поглинання різко зменшується – коефіцієнт відбиття наближається до нульових значень, що свідчить про недостатню ефективність структури у широкому частотному діапазоні. Отже, незважаючи на наявність кількох резонансних максимумів, отриманий метаматеріал не забезпечує необхідного рівня

широкосмугового поглинання. Разом із тим, до переваг даної структури належать простота виготовлення, технологічна доступність та відтворюваність геометрії елементарної комірки. Це робить семикільцевий резонатор доцільною базою для подальшої оптимізації шляхом модифікації поверхневих шарів або додавання додаткових поглинальних компонентів.

З метою розширення робочої смуги поглинання у даній роботі запропоновано використати комбіновану систему, у якій метаматеріальна структура покривається поглинальним матеріалом із широкосмуговими властивостями. Як базовий поглинальний компонент було застосовано матеріал, раніше досліджений авторами, який характеризується високою дисипативною здатністю у діапазоні 2–18 ГГц. Його частотні залежності коефіцієнта відбиття (S-параметри) наведено на рис. 11 [22 – 23].

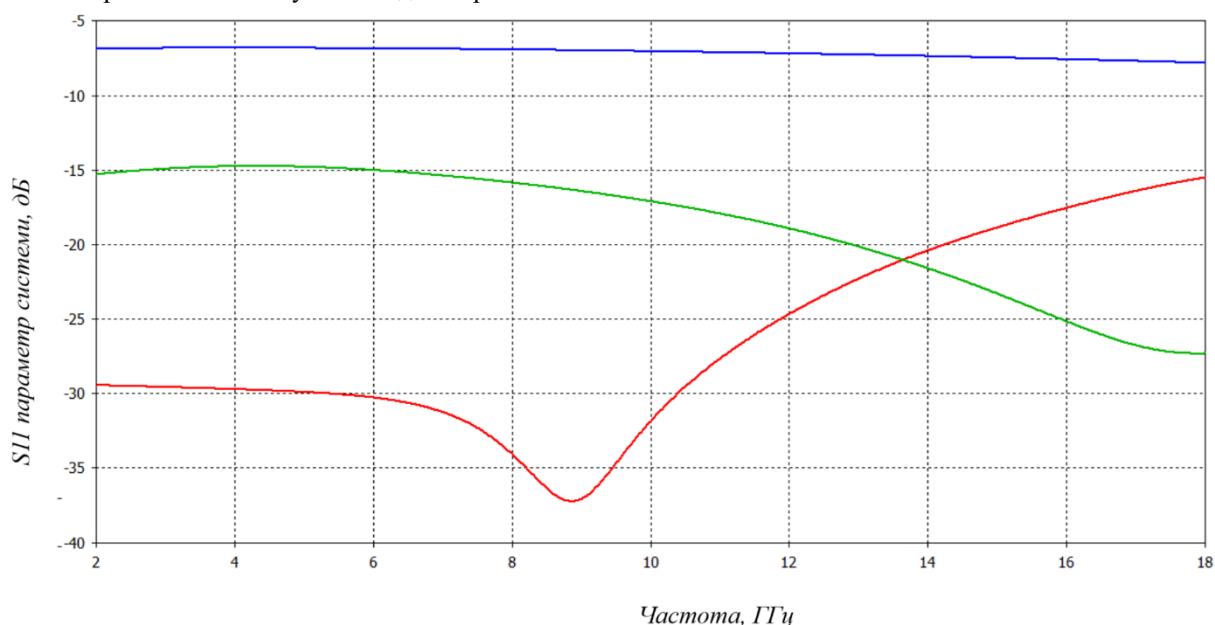


Рис. 11. S11-параметри системи, що складається з тонкого модельного поглинального матеріалу та металізацією з одного боку. Моделювання відбувалося за умов, що електромагнітна хвиля падає на поверхню модельного матеріалу. Синім коліром зазначено S11 параметр системи за товщини матеріалу 1 мм, зеленим – 2 мм, червоним – 3 мм

Обговорення результатів дослідження

Подальше вдосконалення запропонованої системи полягає у поєднанні резонансних властивостей метаматеріалу з дисипативними характеристиками поглинального шару, що забезпечує можливість створення широкосмугового матеріалу з підвищеним рівнем енергетичних втрат у широкому частотному діапазоні. Було проведено аналіз різних комбінацій застосування базового метаматеріалу та модельного поглинального матеріалу з метою визначення оптимальної конфігурації для широкосмугового поглинання електромагнітного випромінювання. Результати чисельного моделювання показали, що найефективніший поглиналь-

ний ефект досягається у системі, де поверхня метаматеріалу покривається шаром дисипативного матеріалу з високими втратами.

Така структура поєднує резонансні властивості метаатомів (що забезпечують локальне збудження електромагнітних полів у діапазоні резонансних частот) із дисипативними властивостями поглинального шару, у якому енергія хвилі перетворюється в теплову. У результаті спостерігається суттєве зменшення коефіцієнта відбиття в широкому частотному діапазоні, що свідчить про зростання ефективності поглинання.

Проведене моделювання підтвердило, що така багатошарова система “поглинальний шар –

метаматеріал – провідна підкладка” демонструє значно ширший спектр частот із рівнем поглинання понад 10 дБ порівняно з вихідним метаматеріалом без покриття.

Тривимірна візуалізація спроектованої комбінованої структури, що ілюструє просторову організацію шарів та геометрію елементарної комірки, наведена на рис. 12.

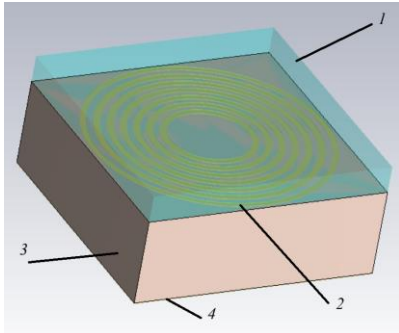


Рис. 12. Схематичне зображення спроектованої елементарної комірки поглинального метаматеріалу: 1 – модельний шар матеріалу, 2 – багатокільцева металізація, 3 – діелектрична підкладка, 4 – металізація підкладки

Отримані результати підтверджують доцільність поєднання резонансних і дисипативних механізмів як ключового підходу до формування ефективних широкосмугових мікрохвильових поглинальних метаматеріалів.

Отримана поглинальна система, структурна модель якої зображена на рис. 12, була промодельована для визначення частотних характеристик та оцінки ефективності її роботи в мікрохвильовому діапазоні.

Розрахунок проводився на основі параметрів розсіювання (S-параметрів), зокрема коефіцієнта відбиття S_{11} , який безпосередньо відображає рівень поглинання електромагнітної хвилі.

На рис. 13 представлено результати чисельного моделювання для двох варіантів товщини поглинального шару. Зіставлення отриманих кривих свідчить, що збільшення товщини шару призводить до помітного зростання рівня поглинання у всьому частотному діапазоні.

Як результат: для структури з товщиною 1 мм поглинання перевищує -10 дБ у діапазоні 3,3–18 ГГц, що підтверджує її широкосмуговий характер.

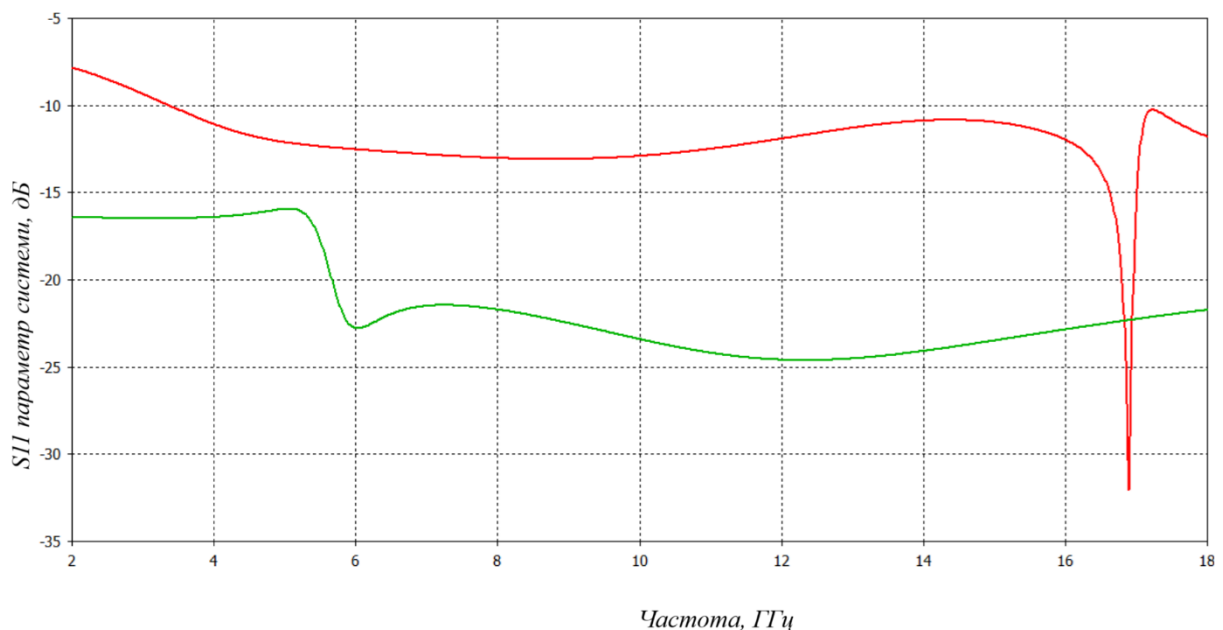


Рис. 13. S_{11} -параметри метаматеріалу із спроектованою елементарною коміркою. Червоним кольором зазначено S_{11} параметр системи за товщини поверхневого поглинального матеріалу 1 мм, зеленим – 2 мм

При збільшенні товщини до 2 мм спостерігається суттєве покращення ефективності: коефіцієнт поглинання зростає до -15 ... -25 дБ, що свідчить про високий рівень дисипації енергії електромагнітного поля в матеріалі.

Таким чином, результати моделювання підтверджують ефективність комбінованої системи, у якій поєднано резонансні властивості метаматеріалу з дисипативними характеристиками погли-

нального шару. Отримані залежності демонструють, що розроблена структура забезпечує стабільне широкосмугове поглинання мікрохвиль у частотному діапазоні 3,3–18 ГГц, що відповідає вимогам до сучасних матеріалів для мікрохвильових поглинальних покриттів нового покоління.

Висновки

У проведеному дослідженні запропоновано інноваційну модель ширококутowego мікрохвильового поглинального покриття на основі метаматеріалу. На основі чисельного моделювання проаналізовано поглинальні характеристики базової структури метаматеріалу, визначено її основні недоліки – резонансний характер поглинання та обмеженість дії в кількох вузьких частотних діапазонах. Рівень поглинання у цих діапазонах становив 8...10 дБ, що є недостатнім для класифікації такого матеріалу як ширококутowego поглинач.

Досліджено різні варіанти поєднання модельного поглинального матеріалу з базовим метаматеріалом. Встановлено, що зміна окремих елементів метаматеріалу (заміна діелектрика або металізації) призводить до суттєвого зниження поглинальних властивостей системи. Найкращі результати досягнуто у випадку, коли поглинальний матеріал використовується як поверхневе покриття метаматеріальної структури, що забезпечує сумісну дію резонансних і дисипативних механізмів поглинання.

Отримана багатошарова система продемонструвала ефективне поглинання електромагнітного випромінювання в діапазоні 3.3–18 ГГц із коефіцієнтом поглинання понад 10 дБ, що свідчить про досягнення ширококутowego ефекту.

Перспективними напрямками подальших досліджень є розроблення технології виготовлення таких поглинальних систем, оптимізація геометричних параметрів для зменшення загальної товщини (до 2 мм замість поточних 4 мм), а також розширення ефективного частотного діапазону до нижньої межі 2 ГГц. Реалізація цих завдань сприятиме створенню нового покоління мікрохвильових метаматеріальних покриттів для застосування у системах електромагнітного захисту, радіомаскування та мікрохвильової техніки високої точності.

Література

- [1] P. Sahoo, L. Saini, A. Dixit, "Microwave-absorbing materials for stealth application: a holistic overview", *Oxford Open Materials Science*, vol. 3, no. 1, itac012, 2023. DOI: 10.1093/oxfmat/itac012
- [2] A. Houbi, A. A. Zharmenov, A. Yomen, et al. "Microwave absorbing properties of ferrites and their composites: A review", *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*, vol. 529, pp. 167839, 2021. DOI: 10.1016/j.jmmm.2021.167839
- [3] Y. Didenko, A. Orlov, D. Tatarchuk, Y. Poplavko, "Metamaterials for Microwave Absorption and Reflection Control", in *IEEE 42nd International Conference on Electronics and Nanotechnology (ELNANO)*, Kyiv, 2024, pp. 1–6. DOI: 10.1109/ELNANO63394.2024.10756849
- [4] Y. Sani, et al., "Enhanced electromagnetic microwave absorbing performance based on ferrites and carbon-based composites," *Results in Materials*, vol. 20, p. 101142, 2023. DOI: 10.1016/j.rinma.2023.101142
- [5] F. Zhang et al., "Recent progress on carbon-based microwave absorption materials for multifunctional applications: A review", *Composites Part B: Engineering*, vol. 283, p. 111646, 2024. DOI: 10.1016/j.compositesb.2024.111646
- [6] R. Peymanfar et al., "Recent advances in microwave-absorbing materials," *Frontiers in Materials*, vol. 10, 2023, pp. 1133287. DOI: 10.3389/fmats.2023.1133287
- [7] K. J. Hughes et al., "Review of Carbon Nanotube Research and Development: Materials and Emerging Applications," *ACS Appl. Nano Mater.*, vol. 7, no. 16, pp. 18695–18713, 2024. DOI: 10.1021/acsanm.4c02721
- [8] Won-Ho Choi, Chun-Gon Kim, "Broadband microwave-absorbing honeycomb structure with novel design concept," *Composites Part B: Engineering*, vol. 83, pp. 14–20, 2015. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2015.08.027>
- [9] X. Huang et al., "Microwave Absorption Properties of Multi-Walled Carbon Nanotubes /Carbonyl Iron Particles/Polyurethane Foams," *Materials*, vol. 15, is. 16, p. 5690, 2022. DOI: 10.3390/ma15165690
- [10] V. G. Veselago, "The electrodynamics of substances with simultaneously negative values of ϵ and μ ," *Sov. Phys. Usp.*, vol. 10, no. 4, pp. 509–514, 1968. DOI: 10.1070/PU1968v010n04ABEH003699
- [11] A. El Assal et al., "Toward an Ultra-Wideband Hybrid Metamaterial Based Microwave Absorber," *Micromachines*, vol. 11, no. 10, p. 930, 2020. DOI: 10.3390/mi11100930
- [12] J. Ren et al., "Multifunctions of microwave-absorbing materials and their potential cross-disciplinary applications: A mini-review," *Adv. Compos. Hybrid Mater.*, vol. 8, 2025. DOI: 10.1007/s42114-025-01258-5
- [13] O. Ayop, M. K. A. Rahim, N. Murad, and N. A. Samsuri, "Dual Band Polarization Insensitive and Wide Angle Circular Ring Metamaterial Absorber," in *Proc. 8th European Conf. Antennas and Propagation (EuCAP 2014)*, 2014. DOI: 10.1109/EuCAP.2014.6901921
- [14] J. B. Pendry, A. J. Holden, D. J. Robbins, and W. J. Stewart, "Magnetism from conductors and enhanced nonlinear phenomena," *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, vol. 47, no. 11, pp. 2075–2084, 1999. DOI: 10.1109/22.798002
- [15] D. R. Smith, W. J. Padilla, D. C. Vier, S. C. Nemat-Nasser, and S. Schultz, "Composite medium with simultaneously negative permeability and permittivity," *Physical Review Letters*, vol. 84, no. 18, pp. 4184–4187, 2000. DOI: 10.1103/PhysRevLett.84.4184

- [16] F. Bilotti et. al., “An SRR based microwave absorber,” *Microwave and Optical Technology Letters*, vol. 48, is. 11, pp. 2171–2175, 2006. DOI: 10.1002/mop.21891
- [17] C. Watts et. al., “Metamaterial Electromagnetic Wave Absorbers,” *Advanced Materials*, vol. 24, is. 23, pp. 98-120, 2012. DOI: 10.1002/adma.201200674
- [18] J. D. Baena et. al., “Artificial magnetic metamaterial design by using spiral resonators,” *Phys. Rev. B*, vol. 69, no.1, p. 014402, 2004. DOI: 10.1103/PhysRevB.69.014402
- [19] Y. Xiong et. al., “Combinatorial split-ring and spiral metaresonator for efficient magnon-photon coupling,” *Phys. Rev. Applied*, vol. 21, no. 3, p. 034034, 2024. DOI: 10.1103/PhysRevApplied.21.034034
- [20] T. Lu et. al., “Dual-Band Perfect Metamaterial Absorber Based on an Asymmetric H-Shaped Structure for Terahertz Waves,” *Materials*, vol. 11, no. 11, 2193, 2018. DOI: 10.3390/ma11112193
- [21] C. Chen et al., “Tunable Toroidal Response in a Reconfigurable Terahertz Metamaterial,” *Advanced Optical Materials*, vol. 9, is. 22, p. 2101215, 2021. DOI: 10.1002/adom.202101215
- [22] К. С. Мазур, “Математична модель мікрохвильового поглинального матеріалу”, *Перспективні технології та прилади*, Том 1, № 26 (2025), с. 79-87. DOI 10.36910/10.36910/6775-2313-5352-2025-26-10
- [23] К. С. Мазур, Ю. В. Діденко, Д. Д. Татарчук, «Мікрохвильовий поглинальний метаматеріал», на Конф. молодих вчених з фізики напівпровідників «Лашкарівські читання – 2025», Київ, 2025, с. 101 – 102. [Електронний ресурс]. Доступно: <https://drive.google.com/file/d/1R5O7OOSul3zTcNTqA3K0RsEhMOBSmwnV/view>

UDC 621.382

K. S. Mazur, Yu.V. Didenko*National Technical University of Ukraine “Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute”, Kyiv, Ukraine***MODEL OF AN ABSORBING SYSTEM BASED ON A METAMATERIAL**

The article presents a mathematical model of a multilayer microwave absorbing system based on metamaterials, aimed at effectively reducing the reflection coefficient of electromagnetic waves in the 2–18 GHz frequency range. The study highlights the relevance of developing thin and low-cost materials with broadband absorbing properties that are significant for both civilian and military applications (protection against electromagnetic interference, radar camouflage technology, etc.). The influence of complex dielectric and magnetic permeabilities on the reflection coefficient was analyzed, and the dependencies of S-parameters were constructed for different types of meta-atoms. A comparison of the most common resonant structures – ring, spiral, H-type, and Split-Ring Resonator (SRR) – was carried out in terms of their efficiency over a wide frequency range. It was shown that concentric ring resonators provide the largest number of resonance peaks. A design of a seven-ring meta-atom optimized through numerical simulation (unit cell size – 9×9 mm) was proposed.

Modeling results revealed six absorption peaks in the range of 8.8–10.5 dB, confirming the resonant nature of the system. To enhance the absorption efficiency, a combined structure was developed in which the surface of the metamaterial is coated with a model absorbing material. The resulting system demonstrates an absorption coefficient exceeding 10 dB within a wide band of 3.3–18 GHz, and when the thickness of the absorbing layer is increased to 2 mm – from 15 to 25 dB.

The feasibility of using multilayer metamaterial structures to create broadband microwave absorbers has been substantiated. Future research should focus on the experimental implementation and optimization of geometric parameters, reduction of coating thickness, and extension of the absorption range below 3 GHz.

Keywords: metamaterial, meta-atom, absorption, reflection, broadband absorbing material, microwaves.

*Надійшла до редакції
21 жовтня 2025 року*

*Рецензовано
24 листопада 2025 року*



© 2025 Copyright for this paper by its authors.
Use permitted under Creative Commons License Attribution 4.0 International (CC BY 4.0).