

Наноструктуры и нанотехнологии в электронике

УДК 621.391.825+628.5

О.В. Мачулянський, канд. техн. наук, М.В. Родіонова, канд. техн. наук,
В.В. Пілінський, канд. техн. наук, В.Б. Швайченко, канд. техн. наук

Застосування наноподібних структур для розв'язку задач забезпечення електромагнітної сумісності

Екранування електричних, магнітних та електромагнітних полів в діапазоні частот: від одиниць, десятків кілогерц, до декількох десятків гігагерц. Описано вимоги до електромагнітного екранування наноструктурних композитних матеріалів. Визначені методи екранування на основі відбивальних або поглинальних нанокомпозитних структур для застосування у протизавадових фільтрах.

Screening of electric, magnetic and electromagnetic fields in the frequency range: units, tens of kilohertz to few, tens of gigahertz are considered. The requirements to the nanostructure composite materials for electromagnetic screening are described. Methods of screening on the basis of reflecting or absorbing broadband nanocomposite structures for radiointerference filters are identified.

Ключові слова: електромагнітна сумісність, наноструктурні екрануючі матеріали, протизавадові фільтри.

Вступ

Інтенсивний розвиток інформаційних технологій, розширення номенклатури, зростання чутливості телекомунікаційної та іншої інформаційної апаратури, яку можна класифікувати як рецептори електромагнітних завад (ЕМЗ), і в той же час зростання енергонасиченості радіоелектронного і електротехнічного обладнання, яке можна класифікувати як джерела ЕМЗ, засвідчують про подальшу актуальність проблеми забезпечення електромагнітної сумісності (ЕМС) [1].

Аналіз ЕМЗ, створюваних енергетичними перетворювачами, силові каскади яких працюють в ключовому режимі, в кондуктивних колах і в навколишньому середовищі показує, що створені рівні завад перевищують допустимі значення. Тому найбільш поширені та ефективні засоби притлумлення завад, в кондуктивних колах — протизавадові фільтри (ПЗФ), а в навколишньому середовищі — електромагнітні екрани, вимагають подальшого вдосконалення [2].

Застосування ПЗФ ускладнено обмеженням ємності, так званих, несиметричних конден-

саторів C_y , за вимогами техніки безпеки. Для зростання ефективності протизавадових фільтрів за обмеженого значення ємності C_y — необхідно застосувати спеціальну конструкцію дроселів із використанням матеріалів магнітопроводу з великим значенням магнітної проникності в широкому діапазоні частот до сотен мегагерц.

Важливим є також необхідність підвищення ефективності екранування. Широко застосовні матеріали з високою провідністю та феромагнітні матеріали мають обмеження стосовно частотного спектру і абсолютного значення магнітної проникності.

На основі літературних даних і практичних результатів [1,2] можна вважати, що властивості традиційних матеріалів, застосованих для екранування і фільтрації майже вичерпані. Настає ера широкого впровадження матеріалів на основі нанотехнологій у всіх галузях науки й техніки і в галузі створення ресурсів забезпечення електромагнітної сумісності радіоелектронного обладнання.

Дослідження в сфері застосування матеріалів на основі нанокомпозитних структур для застосування у протизавадових фільтрах є метою даної роботи.

1. Нанокомпозитні матеріали для забезпечення ЕМС

Феритові матеріали забезпечують притлумлення проміння лише на низьких частотах. На частотах вище 1 ГГц ефективність нікельцинкового ферита є порівняно низькою [3].

Застосування гранульованих магнітних поглинальних структур надає можливість синтезувати ефективні матеріали завтовшки менш 30 мм в діапазоні від 300 МГц. Створення поверхневої структури забезпечує суттєве зростання поглинання в цих самих матеріалах.

Зазвичай, композитні матеріали формують на органічній основі та металевих часток на поверхні або всередині основи. Найбільш часто застосовують з органічних композитів поліакрилонитрил з іонами магнітних матеріалів та металів з високою провідністю.

Екранувальні волоконні композити виробляють з органічної матриці та металевих часток, сформованих на поверхні або всередині волокон методом електролітичного осадження. Матеріал поліакрилонітрил є одним з основних типів матеріалів, застосованих для змінення та створення композитної структури.

Полімерне перетворення поліакрилонітрила застосовують для підсилення хемосорбційних властивостей. Кластери магнітних та з високою провідністю металів, впроваджених всередину волокон мають субмікронні розміри. Штучні нанометрові частки нікеля, кобальта та їх сплавів формують з металевих іонів методом з'єднання з волокном й наступним електролізом у розчинах гідросульфата натрія або фосфіта натрія. За результатами вимірювань застосування таких технологій призводить до збільшення модуля коефіцієнта екранування до 70 дБ та зменшення коефіцієнта відбиття до 25 дБ у діапазоні частот 1-118 ГГц.

Таким чином, на основі композитних матеріалів можна формувати нанокристалічні структури, які включають нанокластери магнітних та з високою провідністю металів. Розмір та концентрація цих кластерів і визначає електрофізичні властивості композитного матеріалу.

2. Протизавадові фільтри із застосуванням новітніх матеріалів

Основними засобами забезпечення ЕМС в кондуктивних колах - інформаційних та електроживлення є ПЗФ. Більш складним є завдання розроблення та застосування протизавадових фільтрів для застосування в мережі енергозабезпечення, тобто мережеві протизавадові фільтри (МПЗФ). Ці фільтри виконують два завдання: забезпечують дозволені нормативними документами рівні симетричних та несиметричних завад в електричній мережі та як допоміжна (неголовна) функція – не пропускають завади (якщо вони є) з мережі до функціонального вузла (пристрою, системи). Ці фільтри забезпечують згасання 40 – 60 дБ в смузі частот від 150 кГц (за додатковою вимогою – 10 кГц) до 30 МГц (за додатковою вимогою – до одиниць гігагерц).

В сучасних умовах інтенсивного розвитку інформаційних технологій на мережеві протизавадові фільтри накладають ще одну важливу функцію – унеможливлення доступу до інформації [4]. Їх називатимемо «мережеві протизавадові захисні фільтри» (МПЗФ).

Дроселі фільтрів виконують за особливою конструкцією – із суто симетричним виконанням двох обмоток – до кожного мережевого провідника та узгодженим підключенням.

Внаслідок необхідності забезпечення зокрема для МПЗФ суттєвого згасання до частот сотні мегагерц ефективність дроселів може бути досягнуто лише завдяки великому значенню магнітної проникності в цій смузі частот.

В процесі розрахунку або вибору дроселя слід враховувати залежність магнітної проникності осердя від частоти. Останнім часом застосовують осердя *аморфних та нанокристалічних* сплавів, які забезпечують високе значення магнітної проникності μ в широкій смузі частот. Дроселі згладжувальних фільтрів мають осердя із електротехнічної сталі із високим значенням магнітної проникності, але їх робоча частота обмежена 50...400 Гц, внаслідок стрімкого зростання втрат в осерді із зростанням частоти. Тому застосовують інші матеріали: ферити, пермалої, із матеріалів з нанокристалічною структурою.

Особливої уваги заслуговує осердя дроселя із матеріалу з нанокристалічною структурою на основі сплаву, наприклад: $Fe_{13,5}Nb_3Si_{13,5}B_9$. Із застосуванням цих матеріалів можливо виготовлення компактних дроселів із великим значенням відповідної магнітної проникності (десятки тисяч) в смугах частот до десятків сотень кілогерц, десятків мегагерц. Ще один важливий аспект застосування наноструктурних композитів у протизавадових фільтрах – як наповнювача корпусу фільтра для заміни металевого корпусу.

Процеси взаємодії електромагнітних полів на границі розподілу двох середовищ обумовлено різними значеннями параметрів середовищ – діелектричної, магнітної проникностей та питомої провідності (ϵ, μ, σ), які визначають співвідношення векторів напруженості електричного та магнітного полів E/H , тобто хвильовим імпедансом.

Із збільшенням відмінності хвильових імпедансів середовищ, збільшується значення коефіцієнта відбиття. Застосування матеріалів з високою провідністю для екранів, що мають низькі значення хвильового опору в порівнянні з навколишнім простором, свідчить, що ці екрани мають кращі властивості відбиття.

Для створення широкопasmових поглинальних структур, основним завданням є узгодження хвильового імпедансу поглинальної структури з навколишнім простором, за якого інтегральний ефект відбиття мінімальний. Тому для ефективного поглинання надвисокочастотного (НВЧ) випромінювання слід переважно використовувати матеріали, що мають високі значення уявних частин діелектричної та/або магнітної проникності. У цьому сенсі найбільш ефективно поглинання мають метали. Разом з тим за використанням, як радіопоглинальних структур, металів необхідне

узгодження низьких значень хвильового опору металу із хвильовим опором вільного простору.

Існує ряд способів зменшення відбиття електромагнітних хвиль від поверхонь.

Найбільш поширений спосіб зменшення відбиття засновано на резонансному принципі [4]. Конструкція такого поглинача - це структура, що складена з шару поглинального матеріалу, перед яким розташовують погоджувальний чвертьхвильовий шар з непоглинального матеріалу. Відзначимо, що такий поглинач ефективно працює лише на фіксованій частоті за нормального падіння хвилі на поверхню, тому застосування цього способу на практиці малоефективно й практично неможливо.

Широкі можливості для досягнення мінімальної різниці хвильових опорів на межі розділу «широкосмугова поглинальна структура (ШПС) – повітря» надає застосування наноструктурних матеріалів. Вибором потрібного співвідношення між μ та ϵ можна отримати хвильовий опір поглинача, що дорівнює опору вільного простору.

На цьому принципі засновано, наприклад, формування багатшарових феритових поглиначів. Їх застосовують, як правило, в діапазоні частот від 30 МГц до 1 ГГц [5]. Ці матеріали мають помітний резонанс, але вони недостатньо ефективно поглинають в широкому діапазоні частот.

Для феритових матеріалів, що існують в даний час, узгодження імпедансу з вільним простором забезпечують у порівняно вузькій смузі частот. Використання багатшарової структури з різних матеріалів та з різною морфологією шарів дозволяє розширити частотний діапазон і оптимізувати покриття за товщиною. Тоді шар фериту розташовують на високопровідній поверхні, що збільшує ефект поглинання. Аналогічні ШПС можна реалізувати на основі НСК (наноструктурний компонент), зокрема, застосуванням системи ферит-полімер з включеними (для отримання високої діелектричної проникності) металевими частками різної форми [6].

Значний інтерес є до ШПС градієнтного типу. В їх структурі хвильовий опір поступово зменшується за товщиною від значення хвильового опору і питомої провідності вільного простору на поверхні ШПС до значень, відповідних високопровідному металу. Така поступова зміна може бути досягнута варіюванням властивостей багатокомпонентного матеріалу і геометричної форми наповнювача. Такі ШПС характеризують широкою смугою частот за малих значень коефіцієнта відбиття і невеликій товщині, проте вони є найбільш складними для практичної реалізації. Електродинамічний розрахунок цих ШПС на основі НСК засновано на використанні

теорій ефективного середовища. Основи методики розрахунку таких металодіелектричних структур наведено в роботах [7]. Зазначимо, що НСК з властивостями, що поступово змінюються за товщиною структури, окрім виконання функції узгодження поверхневого імпедансу, мають поверхневі струми малої сили, які могли б створювати паразитні випромінювання на сполучних елементах конструкції екрану.

Для ШПС на основі НСК одним з важливих є питання щодо мікроструктур матеріалу (розміру, форми і об'ємної концентрації наночасток).

Наноструктурний компонентний матеріал повинен задовольняти одночасно таким умовам:

- значення хвильового імпедансу матеріалу екрану (Z_e) та навколишнього середовища (Z_w) повинні відповідати співвідношенням: для широкосмугових поглинальних структур $Z_e = Z_w$, для відбивальних екранів $Z_e \ll Z_w$;

- нанодисперсна структура, сформована у сполучній матриці, повинна мати високу електропровідність, що забезпечує низьке значення питомого опору НСК;

- композиційна структура повинна містити наночастини феромагнітної компоненти для забезпечення високих значень магнітної проникності;

- додаткове послаблення електромагнітного поля у сполучній матриці забезпечується формуванням розсіювальних та резонансних структур, а також вибором матеріалу матриці;

- хімічної та електрофізичної стабільності характеристик, що визначають властивості компонент композиту та сполучної матриці (взаємна хімічна стійкість, нерозчинність та суттєва різниця у поверхневих енергіях компонент та матриці).

Для забезпечення ЕМС електронних пристроїв доцільно використовувати широкосмугові поглинальні структури на основі НСК. Таким чином у процесі розробки НСК підбором спеціальних середовищ та оптимізацією розподілу їх електродинамічних та електрофізичних характеристик за фазовим простором матеріалу можна досягти необхідних значень ефективності екранування для забезпечення ЕМС електронних пристроїв.

3. Моделювання одношарових нанодисперсних структур

Для моделювання електромагнітного екрану з неоднорідною нанодисперсною структурою використовують уявлення щодо ефективного середовища, на якому базуються теорія ефективного середовища [8,9]. Згідно цього підходу для розгляду електромагнітної реакції реального композитного дисперсного середовища на вплив зовнішнього ЕМП його моделюють деяким однорідним ефек-

тивним середовищем з такими параметрами: ефективною діелектричною проникністю ϵ^{ef} ; ефективною магнітною проникністю μ^{ef} ; ефективною провідністю σ^{ef} . Зазначимо, що для нанодисперсних композитних систем правомірність використання наближення ефективного середовища в досліджуваному діапазоні частот формально виправдано такими обставинами: малими порівняно з довжиною хвилі ЕМП розмірами наночастинок та хаотичним розподілом їх в матеріалі матриці. Існують різні модифікації теорії ефективного середовища, в яких враховують ті або інші властивості реальних композитів (форма частинок, розподіл частинок в матриці тощо).

Завдання моделювання екранувальних властивостей одношарового неоднорідного екрану зводять до визначення залежності ефективності екранування від ефективних електрофізичних параметрів середовища.

Аналіз ефективності екранування одношаровими нанодисперсними структурами проведено для діапазону частот від 10 кГц до 10 ГГц зі зміною ефективних електрофізичних параметрів μ_r^{ef} , σ_r^{ef} , в широкому інтервалі значень $1 - 10^5$ і відстані від джерела поля до екрану $r = 0.1$ м. Як показали експериментальні дослідження [7, 10], практично змінювати електрофізичні параметри нанокompозитних структур у вказаному інтервалі значень можна варіюванням об'ємної концентра-

ції, розміром нанодисперсних включень та діелектричної або магнітної проникності матриці.

Результати чисельного моделювання представлено на рис. 1 – рис. 2.

З рис.1 та рис.2 випливає, що втрати на поглинання ЕМП суттєво зростають в діапазоні частот вище 10^6 Гц за зростання товщини шару, збільшенні значень ефективної відносної питомої провідності та ефективної відносної магнітної проникності середовища. У [10] експериментально показано, що застосування в багато шар композитних системах нановключення матеріалу з низьким питомим об'ємним опором призводить до збільшення провідності композитного середовища та на основі нанодисперсної системи «Ag – полімер» експериментально досягнуто значення питомого опору $8,1 \cdot 10^{-6}$ Ом·м. Ступінь зміни провідності можна суттєво варіювати, змінюючи об'ємної частки наночастинок металу в матриці композиту [5].

Відзначимо, що за розмірами наночастинок менше 10 нм, спостерігається зміння їх електромагнітних властивостей в порівнянні з макроскопічними об'ємами [11]. Модель однорідного ефективного середовища не враховує таких розмірних залежностей електромагнітних властивостей наночастинок, що є її обмеженням для опису ефективності екранування ЕМЗ нанодисперсних систем з розмірами часток менше ніж 10 нм.

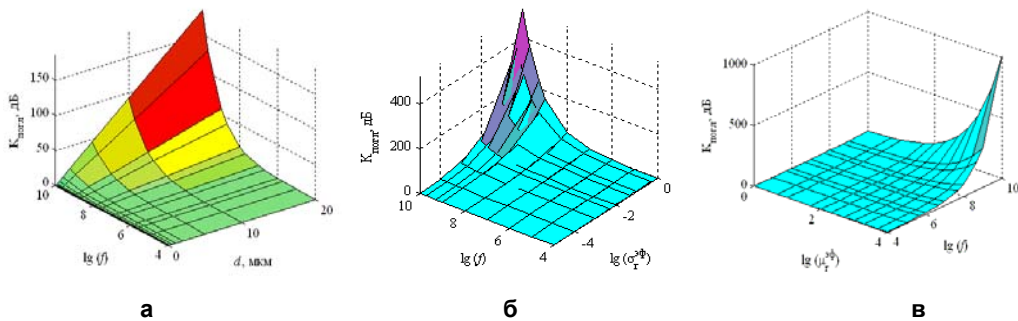


Рис. 1. Залежність ефективності екранування внаслідок поглинання електромагнітного поля від частоти: а) за різних значень товщини шару; б) та ефективної відносної питомої провідності; в) та ефективної відносної магнітної проникності

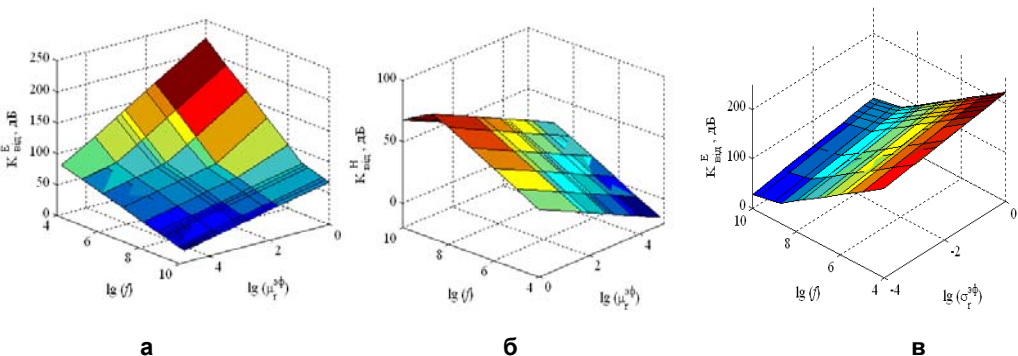


Рис.2. Залежність ефективності екранування внаслідок відбиття від частоти та ефективної відносної: а) магнітної проникності шару для електричної складової ЕМП; б) магнітної проникності шару для магнітної складової ЕМП; в) питомої провідності шару для електричної складової ЕМП

Таким чином, з результатів моделювання на основі теорії ефективного середовища впливає, що залежності ефективності екранування від електрофізичних параметрів мають екстремуми. Для досягнення максимуму ефективності екранування необхідно провести багатопараметричну оптимізацію за електрофізичними параметрами з урахуванням структури.

4. Результати експериментальних досліджень

Об'єкт випробування складено з запропонованих зразків з градієнтним розподілом наночасток в композитній структурі. Зазначене з'єднання дозволяє звести до мінімуму небажаний вплив одного блоку на інший і як наслідок збільшити заводозахисність системи та практично унеможливити потрапляння складових кондуктивних завод до блоку керування.

Результати вимірювань вношуваного загасання (ефективність) запропонованих зразків з градієнтним розподілом наночасток в композитній структурі наведено на рисунку 3.

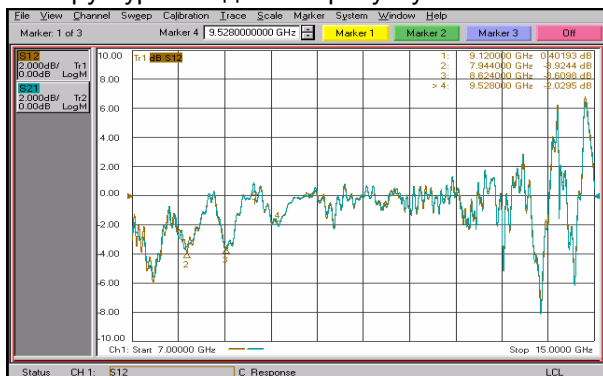


Рис. 3. Характеристика вношуваного згасання в смузї від 7 ГГц до 15 ГГц зразків з градієнтним розподілом наночасток в композитній структурі

Висновки

1. На підставі аналізу фізичних механізмів втрат під час екранування електромагнітного поля у діапазоні частот від одиниць, десятків кілогерц до одиниць, десятків гігагерц дозволяє сформулювати основні вимоги до електромагнітних екранів на основі наноструктурних композиційних матеріалів для забезпечення максимальної ефективності розв'язку забезпечення EMC електронних засобів.

2. Встановлено, що в процесі розробки НСК підбором спеціальних середовищ та оптимізацією розподілу їх електродинамічних та електрофізичних характеристик у фазовому просторі матеріалу можна досягти необхідних значень ефективності екранування для забезпечення EMC елек-

тронних пристроїв. Синтезовано зразки наноконструктивних структур для застосування в електромагнітних екранах та наповнювачах ПЗФ.

Література

1. *Henry W. Ott* Electromagnetic Compatibility Engineering Wiley&Sons, 2009 – 843 p.
2. Подавление электромагнитных помех в цепях электропитания/ Г.С. Векслер, В.С. Недочетов, В.В.Пилинский и др. –К.: Тэхника, 1990.– 167 с.
3. Organic Materials Filled with Ferrite Powder for Electromagnetic compatibility, J.-L.Forveille, L.Olmedo, J.Raby / J.Phys IV France 7, 1997
4. *Кечиев Л.Н.*, Степанов П.В. ЭМС и информационная безопасность в системах телекоммуникаций – М.: Издательский Дом «Технологии», 2005. – 320 с.
5. *Wallace J.L.* Broadband Magnetic Microwave Absorbers: Fundamental limitations// IEEE Trans. Magn.- 1993.- 29, N6, Pt 3.- P.4209-4214.
6. *Bohren Craig F.*, Luebbers Raymond, Langdon H. Scott Microwave-absorbing chiral composites: chirality essential or accidental// Appl.Opt.J.- 1992.-31,N30.- P.6403-6407.
7. *Мачулянский А.В.*, Попов В.А., Борисов А.В., Яганов П.А. Применение наноструктурных материалов для улучшения теплоотвода в устройствах силовой электроники // Технічна електродинаміка.- Тематичний випуск “Силова електроніка та енергоефективність”, Ч. 3. – 2006. – С. 27 – 29.
8. *Петров Ю.И.* Физика малых частиц. – М.: Наука, 1986. – 359 с.
9. *Мачулянский А.В.*, Пилинский В.В., Мачулянский В.А., Теличкина О.В., Krzysztofik W. Численное моделирование эффективности экранирования электромагнитного поля однослойными нанодисперсными структурами// Технічна електродинаміка. Тем. вип. “Силова електроніка та енергоефективність”, Ч. 2. – 2010. – С. 293 – 296.
10. *O. Telychkina*, V. Boehme, M. Heimann, J. E. Morris, and K.-J. Wolter. Study of Nanosilver Filled Conductive Adhesives and Pastes for Electronics Packaging. // Vaterials of the 32nd International Spring Seminar on Electronics Technology (ISSE 2009), Brno, Czech Republic, May 13th - 17th, 2009, , P.332-333.
11. *Мачулянский А.В.* Размерные зависимости динамической поляризуемости ультрадисперсных частиц никеля и хрома// Электроника и связь. – 2001. – №10. – С. 78–80.