

Л. О. Левченко, О. В. Ходаковський, В. П. Колумбет

Національний технічний університет України

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

МЕТОДОЛОГІЧНІ ПІДХОДИ ДО АВТОМАТИЗАЦІЇ ПРОЕКТУВАННЯ ЕЛЕКТРОМАГНІТНИХ ЕКРАНІВ

Анотація. Досліджено можливості автоматизації процесів проектування матеріалів та конструкцій для екранування електричних, магнітних та електромагнітних полів широкого частотного діапазону. Показано, що необхідність автоматизації процесів проектування обумовлена залежністю захисних властивостей (коефіцієнтів екранування) матеріалів від кількох параметрів – магнітної та діелектричної проникностей, електропровідності, товщини матеріалу. Для композиційних матеріалів необхідно враховувати об'ємний вміст і дисперсність екрануючого наповнювача у діелектричній матриці. Вихідними даними є необхідні коефіцієнти екранування (з урахуванням коефіцієнтів відбиття електромагнітних хвиль у діапазоні ультрависоких частот). Спираючись на фундаментальні співвідношення електродинаміки суцільних середовищ, надано співвідношення для послідовного визначення коефіцієнтів заломлення та екстинкції матеріалів, що надає можливість розрахувати значення дійсної та уявної складових комплексної діелектричної проникності. На основі цих значень визначається питома електрична провідність матеріалів. Це, у свою чергу, дозволяє визначити еквівалентну глибину проникнення височастотного електромагнітного поля у матеріал. Показано, що для розрахування відносних магнітної та діелектричної проникностей з прийнятними похибками доцільно використовувати співвідношення Лорентца та Максвелла-Гарнетта. Для цього достатньо мати відомості про діелектричні та магнітні проникності компонентів (які є довідковими величинами) та об'ємний вміст екрануючої субстанції у діелектричній матриці. Це надає можливість однозначно визначити захисні властивості композиції у широкому частотному діапазоні. Враховуючи залежність ефективності матеріалів від багатьох факторів, автоматизація процесів проектування дозволить оптимізувати співвідношення критичних параметрів з урахуванням магнітних властивостей і вартості кінцевого продукту.

Ключові слова: електромагнітне поле, електромагнітний екран, екранування, коефіцієнт екранування, композиційний матеріал, автоматизація.

Вступ

Електромагнітна обстановка у сучасних виробничих, офісних та навчальних приміщеннях характеризується складною динамікою у просторі і часі. При цьому за певними частотними та амплітудними значеннями спостерігається перевищення або наближення до гранично допустимих рівнів. Ефективним засобом зниження рівнів полів, що впливають на людей, є застосування екрануючих поверхонь. Але використання магнітних, електромагнітних екранів не завжди виправдане через можливі збої у виробничих процесах і погіршення якості бездротового зв'язку. Крім того, значні коефіцієнти екранування низькочастотних електричних і магнітних полів аналогічним чином знижують природне магнітне поле, що заборонено чинними національними та міжнародними нормативами. Таким чином, застосування екранування повинне реалізуватися на основі ретельних проектних робіт з визначення необхідного і достатнього рівня екранування полів визначених частот і амплітуд. Найбільш раціональним є автоматизація проектних робіт, що дозволить оптимізувати захисні властивості екрануючих матеріалів. Реалізація автоматизованого проектування гальмується через невизначеність або неоднозначність математичного апарату щодо розрахунку коефіцієнтів екранування. Певним чином це обумовлене неповністю або відсутністю вихідних даних для розрахунків. Особливо це стосується інноваційних композиційних матеріалів, для яких дані щодо головних параметрів – магнітних та електрофізичних властивостей відсутні у довідковій літературі. Експериментальне визначення цих величин для матеріалів різних скла-

дів дуже витратне. Тому доцільним є визначення та систематизація розрахункових методів обчислення необхідних величин для різних типів захисних матеріалів та надання засад алгоритмізації процесів проектування матеріалів для екранування електромагнітних полів широкого частотного діапазону.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Загальним недоліком досліджень з проектування захисних екранів є відсутність систематизації, яка б дозволила уніфікувати розрахунковий апарат. Більшість робіт стосується або якогось одного впливу [1], або одного класу матеріалів [2]. У багатьох випадках розрахункові методи абстрактні і не мають прикладного значення [3]. Частково вони призначені для вдосконалення конструкцій електротехнічного обладнання і не можуть бути застосовані для захисту людей [4, 5]. У роботі [6] показано, що захисні властивості композиційних матеріалів залежать навіть від форми частинок, що забезпечують екранування. Тому, найбільше значення має визначення магнітних властивостей композицій [7]. Частково необхідні вихідні дані експериментально-аналітично визначені у [8], але вони мають окремий характер для використання чітко визначених компонентів. У [9] надано загальні підходи до розрахування (прогнозування) захисних властивостей матеріалів. Але для композицій не надано вихідних даних, які дають можливість отримати кількісні значення прикладного характеру. Не здійснено також чіткого розділення провідних, напівпровідних і непровідних матеріалів, що може привести до значних похибок у розрахунках.

Таким чином, необхідно надати повний ланцюг розрахунків, починаючи з обчислення фізичних характеристик, які завершуються отриманням спів-

відношення захисних властивостей та усіх параметрів захисного матеріалу.

Мета роботи – надання розрахункового апарату, придатного для алгоритмізації процесів проектування електромагнітних екранів включно з обчисленням магнітних та електрофізичних властивостей композицій з урахуванням специфіки екранування полів наднизьких та ультрависоких частот.

Виклад основного матеріалу

Для проектування захисного або електромагнітного екрану головним показником є коефіцієнт екранування поля, який забезпечується за тих чи інших складу, товщини і конструкції матеріалу. При цьому, принаймні для високочастотних полів, необхідно враховувати внесок коефіцієнта відбиття у загальний коефіцієнт екранування. Виходячи з фундаментальних співвідношень згасання електромагнітного поля у товщі матеріалу [10], коефіцієнти екранування поля за потужністю K_e та коефіцієнт відбиття електромагнітних хвиль від поверхні матеріалу K_b визначається співвідношеннями:

$$K_e = \frac{(n+1) + \chi^2}{4n} \exp\left[\frac{2\chi\omega d}{c}\right], \quad (1)$$

$$K_b = \frac{(n-1)^2 + \chi^2}{(n+1)^2 + \chi^2}, \quad (2)$$

де n – коефіцієнт заломлення матеріалу, χ – коефіцієнт поглинання матеріалу, ω – колова частота електромагнітної хвилі, d – товщина захисного матеріалу, c – швидкість розповсюдження хвилі.

Потрібні коефіцієнти екранування (у тому числі допустимі коефіцієнти відбиття) визначаються за результатами натурних вимірювань, що надає можливість з'ясувати необхідні ступені зниження поля.

Таким чином, знаючи значення K_e та K_b з рівнянь (1) і (2) можна визначити значення n та χ , які повинен мати захисний матеріал. Для матеріалів з відносною магнітною проникністю, близькою до 1:

$$n^2 - \chi^2 = \varepsilon'; \quad 2n\chi^2 = \varepsilon'',$$

де ε' та ε'' – дійсна та уявна складові комплексної діелектричної проникності матеріалу, звідки:

$$n = \sqrt{\left(\varepsilon' + \sqrt{\varepsilon'^2 + \varepsilon''^2}\right)/2}; \quad \chi = \sqrt{\left(-\varepsilon' + \sqrt{\varepsilon'^2 + \varepsilon''^2}\right)/2},$$

що надає можливість визначити потрібне співвідношення ε' та ε'' матеріалу за визначеною частоті електромагнітного поля, яке потребує екранування.

За умови $\omega \rightarrow 0$ (наднизькі частоти)

$$\varepsilon(\omega) = i \cdot 4\pi\sigma/\omega,$$

де σ – питома провідність матеріалу.

Уявна частина ε є великою порівняно з дійсною, якою можна знехтувати.

$$\varepsilon'' = 4\pi\sigma/\omega; \quad n = \chi = \sqrt{2\pi\sigma/\omega},$$

що надає можливість попереднього оцінювання електропровідності захисного матеріалу.

Цей показник необхідний для визначення δ :

$$\delta = \sqrt{1/(\omega\mu\sigma)},$$

δ показує глибину, де поле знижується у $e=2,7$ разів.

Для розрахунку необхідно також значення абсолютної магнітної проникності матеріалу μ_a .

Для усіх стандартних металевих матеріалів вона відома. Але для композиційних матеріалів (наприклад, магнітодіелектриків) довідкові дані відсутні. З прийнятною точністю відносною магнітну проникність можна визначити, виходячи з об'ємного вмісту магнітних частинок у діелектричній матриці. Якщо вважати частинки наповнювача круглими і рівномірно розподіленими у діелектрику, то можна скористатися співвідношенням Лорентца:

$$\mu = 1 + v_m(\mu_m - 1) / (1 + (1 - v_m)(\mu_m - 1)/3),$$

де v_m – об'ємна доля магнітного наповнювача у діелектричній матриці, μ_m – відносна магнітна проникність феромагнітного наповнювача.

Для визначення коефіцієнта відбиття магнітодіелектрика необхідне значення відносної діелектричної проникності. Її значення можна визначити, скориставшись формулою Максвелла-Гарнетта:

$$\frac{\varepsilon - \varepsilon_d}{\varepsilon + 2\varepsilon_d} = v_m \frac{\varepsilon_m - \varepsilon_d}{\varepsilon_m + 2\varepsilon_d},$$

де ε – відносна діелектрична проникність композиції, ε_d – відносна діелектрична проникність діелектричної матриці, ε_m – відносна діелектрична проникність наповнювача, v_m – об'ємна доля магнітного наповнювача у композиції.

Слід враховувати, що співвідношення справедливе для $v_m < 1/3$. Досвід показує, що ця пропорція у реальних умовах виконується майже завжди. Наприклад, додавання дрібнодисперсного магнетиту у полімер у кількості 60% (за вагою) відповідає об'ємному вмісту 28%.

Маючи кількісні значення μ та ε можна розрахувати хвильовий опір композиції:

$$Z_\mu = \sqrt{\mu_\alpha/\varepsilon_\alpha},$$

де $\mu_\alpha = \mu_0\mu$; $\varepsilon_\alpha = \varepsilon_0\varepsilon$, $\mu_0 = 1,26 \cdot 10^{-6}$ Гн/м, $\varepsilon_0 = 86 \cdot 10^{-12}$ Ф/м.

Відповідно, коефіцієнт відбиття:

$$K_b = (Z_1 - Z_2)/(Z_1 + Z_2),$$

де Z_1 – хвильовий опір захисного матеріалу, Z_2 – опір середовища розповсюдження електромагнітних хвиль (для повітря $Z_2=377$ Ом). Наведені дані надають можливість з прийнятною похибкою попередньо оцінити необхідні склад, магнітні та електрофізичні параметри, необхідну товщину захисного матеріалу. У реальних умовах доцільно зафіксувати, наприклад, товщину й оцінювати достатню концентрацію екрануючої субстанції у вихідному матеріалі. Створення прикладного програмного забезпечення, яке автоматизує процес проектування матеріалу, дозволить оптимізувати усі параметри екрануючої конструкції з урахуванням потрібної гнучкості матеріалу, міцнісних характеристик тощо.

Алгоритм включає послідовність дій, викладених у статті, але при цьому задаються певні граничні умови, наприклад, товщина матеріалу. На наступних етапах визначається яким повинен бути склад композиту для забезпечення потрібних ступенів захисту. Алгоритм має зворотні зв'язки через необхідність внесення коректив у взаємопов'язані електрофізичні, магнітні та геометричні характеристики. При цьому не обов'язково розв'язувати задачу оптимізації. При реалізації програмного забезпечення достатньо використувати метод перебору вхідних даних.

Висновки

1. Автоматизація проектування електромагнітних екранів можлива за умови визначення однозначного алгоритму розрахунків потрібних значень і параметрів. Вихідною інформацією є фактичні амплітудно-частотні характеристики магнітного, електричного та електромагнітного поля, яке потребує екрану-

вання. Ці дані визначають потрібні ступені захисту, тобто коефіцієнти екранування поля (у тому числі й коефіцієнти відбиття електромагнітних хвиль).

2. Для забезпечення необхідних коефіцієнтів поглинання та відбиття розраховуються послідовно коефіцієнти заломлення та екстинкції матеріалу, діелектричні проникності з урахуванням частоти екранованого поля.

3. Особливістю композиційних екрануючих матеріалів є відсутність довідкових даних щодо магнітних та електрофізичних властивостей. Їх визначення (оціночне) можливе застосуванням співвідношень Лорентца та Максвелла-Гарнетта. З урахуванням об'ємної частки дрібнодисперсної екрануючої субстанції у діелектричній матриці.

4. Залежність коефіцієнтів екранування від кількох параметрів робить доцільним автоматизацію процесів проектування захисних матеріалів, що дозволяє оптимізувати склад композиції та її товщину.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Mei Li, ShaoQiu Xiao, Yan-Ying Bai, Bing-Zhong Wang. An Ultrathin and Broadband Radar Absorber Using Resistive FSS. *IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters*. 2012. № 11. P. 748–751.
2. Демский Д. В. Метод расчета эффективности экранирования для неоднородных электромагнитных экранов: дис. ... канд. техн. наук: 05.12.14. Москва, 2014. 114 с.
3. Назаренко М. В., Гончарова О. М., Панова О. В. Розрахункові методи визначення захисних властивостей електромагнітних екранів. *Проблеми охорони праці в Україні*. 2012. Вип. 23. С. 84–89.
4. Заблодский Н. Н., Филатов М. А., Грицюк В. Ю. Численное моделирование электромагнитных полей в полифункциональных электромеханических преобразователях с полым перфорированным ротором. *Електротехніка і електромеханіка*. 2012. № 1. С. 25–27
5. Скобликов Ю. А. Результаты моделирования процесса проникновения электрического поля внутрь структурно-неоднородного электромагнитного экрана. *Електротехніка і електромеханіка*. 2011. № 4 С. 66–71.
6. Касаткіна Н. В., Тихенко О. М., Панова О. В., Бірук Я. І. Підвищення ефективності композиційних електромагнітних екранів регулюванням морфології феромагнітного наповнювача. *Системи управління, навігації та зв'язку*. 2020. Т. 3 (61). С. 115–118.
7. Radionov A.V., Podoltsev A.D., Radionova A.A. Express-method for determining the quality of a magnetic fluid for operation in the working gap of a magnetic fluid seal. *IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering*. Volume 233 (2017) 012038.
8. V. Glyva, N. Kasatkina, V. Nazarenko, N. Burdeina, N. Karaieva, L. Levchenko, O. Panova, O. Tykhenko, O. Khodakovskyy. Development and study of protective properties of the composite materials for shielding the electromagnetic fields of a wide frequency range. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. 2020. Vol. 2. No. 12 (104). PP. 40 – 47.
9. Касаткіна Н. В., Тихенко О. М., Фурсенко О.М. Розрахункові методи проектування електромагнітних екранів із заданими захисними властивостями. *Системи управління, навігації та зв'язку*. 2020. Т. 2 (60). С. 118–121.
10. Ландау Л. Д., Лифшиц Е. М. Теоретическая Физика Т. VIII. Электродинамика сплошных сред. – физ. - мат. лит, 2001. 656 с.

Received (Надійшла) 29.01.2021

Accepted for publication (Прийнята до друку) 21.04.2021

Methodological approaches to automation of electromagnetic screens

Larysa Levchenko, Oleksiy Khodakovskyy, Vadym Kolumbet

Abstract. The possibilities of automation of processes of designing materials and structures for shielding electrical, magnetic and electromagnetic fields of a wide frequency range are investigated. It is shown that the need for automation of design processes is due to the dependence of protective properties (coefficients of shielding) materials from several parameters – magnetic and dielectric permeabilities, electrical conductivity of the thickness of the material. For composite materials it is necessary to take into account the volumetric content and dispersion of the screening filler in the dielectric matrix. The initial data are the necessary shielding coefficients (taking into account the reflection coefficients of electromagnetic waves in the range of ultra-high frequencies). Based on the fundamental ratio of electrodynamics of continuous media, the ratio for successive determination of refractive indexes and extinction of materials, which provides the ability to calculate the values of the actual and imaginary components of complex dielectric permeability. On the basis of these values, the specific electrical conductivity of materials is determined. This, in turn, allows you to determine the equivalent depth of penetration of a high-frequency electromagnetic field into the material. It is shown that for calculating relative magnetic and dielectric permeabilities with acceptable errors, it is advisable to use the ratio of Lorentz and Maxwell-Garnet. To do this, it is enough to have information about the dielectric and magnetic permeability of the components (which are reference values) and the bulk content of the screening substance in the dielectric matrix. This allows you to uniquely identify the protective properties of the composition in a wide frequency range. Taking into account the dependence of the effectiveness of materials from many factors, automation of design processes will optimize the ratio of critical parameters taking into account the magnetic properties and cost of the final product.

Keywords: electromagnetic field, electromagnetic screen, shielding, shielding coefficient, composite material, automation.