

Н. В. Касаткіна¹, Л. О. Левченко², О. М. Тихенко³

¹ Національний університет харчових технологій, Київ, Україна

² Національний технічний університет України «КПІ імені Ігоря Сікорського», Київ, Україна

³ Національний авіаційний університет, Київ, Україна

ПРОЕКТУВАННЯ ЕЛЕКТРОМАГНІТНИХ ЕКРАНІВ КОМПОЗИЦІЙНОЇ СТРУКТУРИ ДЛЯ ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ СТАБІЛЬНОСТІ ФУНКЦІОНУВАННЯ ОБ'ЄКТІВ КРИТИЧНОЇ ІНФРАСТРУКТУРИ

Анотація. Розроблено засади проектування магнітних та електромагнітних екранів для забезпечення електромагнітної сумісності електричного та електронного обладнання особливо важливих об'єктів. Показано, що для підвищення стабільності роботи обладнання, яке забезпечує важливі функції (керування повітряним рухом, робота електрогенеруючих підприємств тощо) доцільно екранувати технічні засоби та окремі їх компоненти. На прикладі розроблення циліндричної захисної конструкції наведено основні засади проектування. Доведено, що для проектування захисної конструкції необхідно мати дані щодо реальної електромагнітної обстановки. Це дає можливість визначити мінімально необхідний коефіцієнт екранування, виходячи з нормативів щодо стійкості електронного обладнання до електромагнітних впливів. На основі коефіцієнта екранування, виходячи з відомих функцій були отримані значення електрофізичних параметрів екрануючого матеріалу. Ці параметри отримані зміною концентрації та товщини екрануючої конструкції. Цей етап є обов'язковим через відсутність даних щодо електрофізичних та магнітних властивостей композиційних матеріалів у довідковій літературі. Для спрощення та прискорення проектних робіт доцільно отримати апроксимації щодо зміни характеристик матеріалу зі зміною захисних властивостей. Наведено розрахунок з використанням пакету Comsol ефективної магнітної проникності металополімерного матеріалу у залежності від його складу (співвідношення вмісту екрануючої субстанції та полімеру). Цей параметр обумовлює коефіцієнт екранування, отриманий експериментально. Показано, що для екранування великих площ (окремих приміщень) потрібно враховувати необхідність забезпечення сигналу частот бездротового зв'язку не менше, ніж 0,18–0,20 мкВт/см².

Ключові слова: електромагнітна сумісність, електромагнітний екран, електрофізичні властивості, коефіцієнт екранування.

Вступ

Переважає більшість металевих та композиційних матеріалів для екранування електричних, магнітних та електромагнітних полів використовуються для захисту людей у виробничих умовах від електромагнітних впливів. Але у багатьох випадках потребують захисту й технічні засоби.

Відомо, що під впливом зовнішніх електромагнітних полів має місце нештатна робота електронного обладнання, яке забезпечує стабільність функціонування особливо важливих об'єктів та систем – керування технологічними циклами підприємств, систем контролю доступу, бортового та стаціонарного обладнання навігації та керування повітряним рухом тощо. Це є проблемами електромагнітної сумісності електронного та електричного обладнання. Їх вирішення штатними засобами підприємств не завжди можливе.

Це пояснюється використанням на підприємствах України великої кількості імпортного комп'ютерного та мережевого обладнання, електронних компонентів, які проектувалися виходячи з інших вимог щодо електромагнітного оточення, нормативів з електромагнітної сумісності та якості електроенергії. Прийняття з 01.01.2016 року (наказ Мінекономрозвитку від 29.12.2014 р. № 1483) методом підтвердження як обов'язкових кількох десятків міжнародних (загальноєвропейських) нормативів з електромагнітної сумісності не вирішує проблеми. Це пояснюється неможливістю виконання їх вимог внаслідок експлуатації великої кількості придатного до використання електричного обладнання, застарі-

лих систем електроживлення, модернізація яких вимагає багато часу та коштів. Тому доцільно дослідити можливість забезпечення електромагнітної сумісності електронного обладнання, принаймні на об'єктах критичної інфраструктури з використанням інноваційних матеріалів з керованими коефіцієнтами екранування електромагнітних полів широкого частотного діапазону.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Більшість досліджень та розробок з електромагнітної сумісності стосуються підвищення якості електроенергії (придушення гармонік та забезпечення синусоїдальності електроструму), що знижує втрати електроенергії у системах її передавання та споживання [1, 2]. Певним чином це також сприяє стабільності електронного обладнання через генерацію електрострумами гармонік промислової частоти відповідних магнітних полів [3]. Завадостійкість інформаційних кабельних мереж забезпечується спеціальним екрануванням окремих дротів кабелів, що забезпечує компенсацію завадо несучих магнітних полів кожного дроту у кабелі [4]. Екранування магнітного електромагнітного поля металевими матеріалами може унеможливити витікання поля за межі електричного пристрою та знижує рівні завадонесучих полів навколо нього [5]. Але у цьому випадку концентрація поля у замкненому об'ємі може створювати завади самому пристрою [6]. Крім того, як показано у [7], у достатньо сильних магнітних полях намагнічування феромагнітного екрана не поліпшує, а погіршує електромагнітну обстановку, якщо він розташований поблизу джерела поля. Дослідження [8, 9] стосуються блокування локальних

електромагнітних полів мобільних телефонів і не вирішують проблем за наявності багатьох технічних засобів у приміщенні та необхідності застосовувати безпроводні мережі передачі інформації.

У таких умовах необхідно застосовувати екрануючі матеріали і конструкції, які певним чином дозволять оптимізувати співвідношення коефіцієнтів екранування магнітних та електромагнітних полів різних джерел [10]. Таким вимогам відповідають композиційні металополімерні матеріали, які можуть бути спроектовані з необхідними коефіцієнтами екранування та відбиття. Останній параметр особливо важливий для забезпечення електромагнітної сумісності й знімає обмеження на відстань захисної конструкції від джерела поля [11].

Постановка завдання. Мета роботи – дослідження умов застосування та ефективності композиційних електромагнітних екранів для захисту найважливіших ланок об'єктів критичної інфраструктури від електромагнітних впливів.

Виклад основного матеріалу

Класичним визначенням електромагнітної сумісності технічних засобів є: спроможність технічного засобу функціонувати із заданою якістю у заданій електромагнітній обстановці та не створювати електромагнітних завад іншим технічним засобам.

Досвід обстежень електромагнітної обстановки у приміщеннях та на територіях стратегічних підприємств – авіадиспетчерських та апаратних аеродромів цивільної авіації, головних щитів керування електростанцій, підприємств теплопостачання, відкритих розподільчих пристроїв трансформаторних підстанцій тощо, свідчить, що розроблення загального підходу й розроблення універсальних заходів і засобів забезпечення належного рівня електромагнітної сумісності технічних засобів недоцільне й неможливе. Значною мірою це обумовлене тим, що у багатьох випадках потрібне забезпечення й електромагнітної безпеки персоналу. Відомо, що за хронічного електромагнітного впливу операторами можливе прийняття хибного рішення, що впливає на рівень загальної безпеки об'єкта.

У залежності від конкретних виробничих умов потребують вирішення три групи задач, що стосуються стабільності функціонування найбільш критичних обладнання й виробничих ланок підприємств:

- захист чутливого електронного обладнання від зовнішніх електромагнітних впливів різних частот і амплітуд;
- зниження рівнів електромагнітних полів, генерованих електричним та електронним обладнанням, що перебуває у експлуатації;
- одночасний захист техногенних засобів і персоналу від впливу електромагнітних полів внутрішніх та зовнішніх джерел.

Для забезпечення стабільності роботи електронного обладнання, особливо за умови його щільного розташування у виробничих приміщеннях (керування повітряним рухом, головних щитів керування електростанцій, бортового обладнання елек-

ричного транспорту тощо) найбільш ефективним засобом є екранування окремих одиниць обладнання або окремих його блоків.

Для розроблення засобів екранування потрібні вихідні дані щодо електромагнітної обстановки у приміщенні – частотні характеристики електромагнітного поля.

Важливими є власні випромінювальні властивості обладнання – електрогерметизація пристрою може погіршувати його працездатність через вплив на нього власного відбитого поля. У загальному випадку, для високочастотних випромінювань, це може бути вирішено підбиранням розмірів екрана, виходячи з довжини електромагнітної хвилі превалюючої частоти. Але у більшості випадків розміри захисної конструкції бажано мінімізувати. Тому для захисту обладнання доцільно застосовувати композиційні матеріали з малими коефіцієнтами відбиття електромагнітних хвиль (великими коефіцієнтами поглинання) [12].

Це дозволяє нормалізувати тільки зовнішній вплив на обладнання. Найбільшою складністю для проектування таких конструкцій є необхідність підбору товщини та складу матеріалу для конкретної електромагнітної обстановки. Це потребує виконання великої кількості експериментальних робіт (підбору необхідних параметрів).

Такі роботи потребують багато часу та матеріальних витрат. Тому доцільно попередньо розрахувати необхідні параметри, виходячи з потрібного коефіцієнта екранування.

На першому етапі, враховуючи вимоги до електромагнітної сумісності конкретного обладнання, на основі натурних вимірювань частотно-амплітудних характеристик електромагнітного фону, визначається потрібний коефіцієнт екранування. На основі відповідних математичних функцій визначають необхідні параметри екрануючого матеріалу. Це є обов'язковим через відсутність довідкових даних щодо магнітних та електрофізичних властивостей композитів (ефективна магнітна проникність, діелектрична проникність, питома провідність).

Наприклад, для циліндричного екрана у низькочастотній області спектра коефіцієнт екранування магнітного поля, спрямовано перпендикулярно до циліндра, визначається як:

$$K_e = 1 + 0,5i\omega\delta\mu\Delta r,$$

де ω - частота поля, σ – питома провідність матеріалу, μ – товщина матеріалу, r – внутрішній радіус екрануючої поверхні.

Або:

$$K_e = 1 + \left(\frac{r}{\delta}\right)^4 \left(\frac{\Delta}{r}\right)^2,$$

де $\delta = \sqrt{\frac{2}{\omega\mu\sigma}}$.

Значення δ для металополімерних матеріалів можливо виміряти методом подвійного мосту або отримати з літературних джерел [12]. Цей параметр для композиту може бути екстрапольований для різних концентрацій екрануючої провідної субстан-

ції. Для визначення ефективної магнітної проникності доцільно застосувати експериментальні значення для матеріалів кількох параметрів та відоме співвідношення для циліндричної екрануючої поверхні:

$$K_e = \frac{\mu(b^2 - a^2)}{4b^2},$$

де a і b – внутрішній та зовнішній радіуси циліндричного екрана.

Визначення залежності коефіцієнта екранування K_s від ефективної проникності композиційного металополімерного матеріалу можливе, наприклад, з використанням пакету Comsol (рис. 1). Такий підхід дозволяє знизити рівні магнітного поля до нормативних значень.

Наприклад, засоби обчислювальної техніки повинні витримувати вплив магнітного поля промислової частоти напруженістю 1 А/м.

Застосування наведеного підходу дозволило спроектувати та застосувати магнітний екран, який знижує зовнішнє магнітне поле (рис. 2, а) до прийняттого рівня (рис. 2, б).

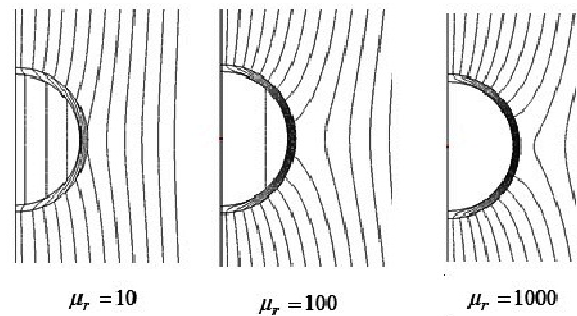
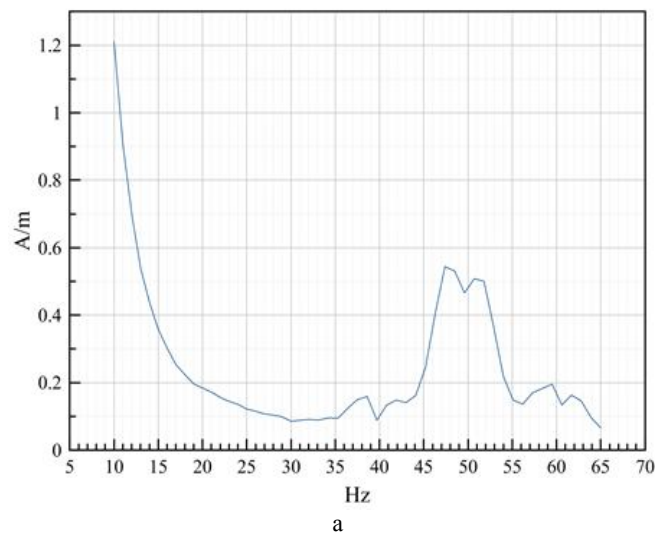
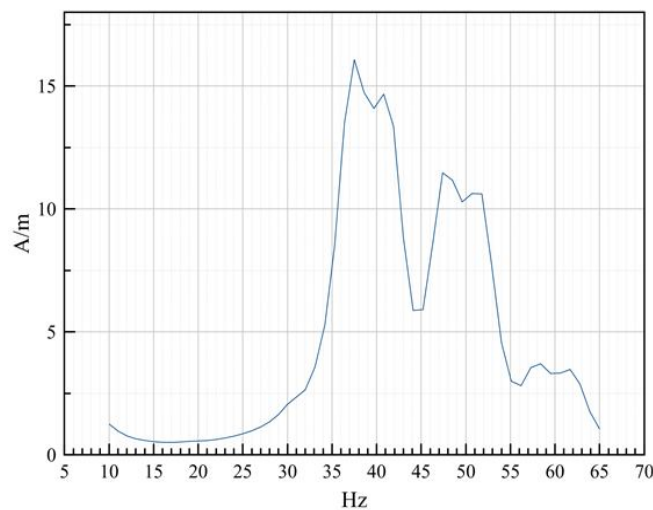


Рис 1. Апроксимація залежності коефіцієнта екранування композиційного металополімерного екрана від ефективної магнітної проникності



а



б

Рис. 2. Екранування магнітного поля композиційним металополімерним екраном: а – спектр вихідного поля; б – спектр екранованого поля

За необхідності одночасного підвищення електромагнітної безпеки персоналу доцільно застосувати магнітні та електромагнітні екрани великих

площ для облицювання поверхонь стін і будівель. У цьому випадку коефіцієнти екранування електромагнітного поля ультрависокої частоти необхідно ви-

користувати такі, щоб значення полів частотами 1,8–2,6 ГГц не були нижчими за 0,18–0,20 мкВт/см², що є мінімальним для забезпечення стабільного функціонування засобів бездротового зв'язку.

Висновки

1. Магнітні та електромагнітні екрани доцільно застосовувати для забезпечення електромагнітної сумісності електричного та електронного обладнання. На об'єктах критичної інфраструктури (аеродроми цивільної авіації, електростанції, залізничний транспорт) необхідним є екранування найбільш важливих для виробничих циклів електронних пристроїв.

2. Проектування екрануючих матеріалів здійснюється розрахунковими методами з використанням результатів натурних вимірювань електромагнітних полів у виробничих приміщеннях. Це дозволяє ви-

значити значення мінімально необхідних для забезпечення стабільності роботи електронного обладнання коефіцієнтів екранування.

3. Для прискорення та спрощення процесу проектування екрануючих поверхонь доцільно отримати апроксимації електрофізичних властивостей композиційних матеріалів різних складів та товщини. Це можливо зробити за результатами кількох прямих вимірювань коефіцієнтів екранування екранів стандартної форми та відповідних математичних співвідношень.

4. Для проектування екрануючих конструкцій великих площ слід оцінювати потреби функціонування засобів бездротового зв'язку.

Слід враховувати, що стабільність його роботи забезпечується рівнями випромінювань не нижчих за 0,18–0,20 мкВт/см².

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Саєнко Ю. Л., Бараненко Т. К., Бараненко Е. В. Методы компенсации реактивной мощности в сетях с нелинейными нагрузками. *Вісник Приазовського державного технічного університету*. 2013. Вип. 26. С. 204–210.
2. Саєнко Ю. Л., Бараненко Т. К., Бараненко Е. В. Зниження рівнів гармонічних спотворень в електричних мережах з джерелами інтергармонік. *Електрифікація транспорту*. 2012. №3. С. 78–83.
3. Перельот Т.М. Гармоніки електричних струмів промислової частоти та їх вплив на електромагнітну обстановку у приміщеннях. *Гігієна населених місць*. 2014. Вип. 64. С. 192–197.
4. Bezprozvannyh G. V., Pushar O. A. Increasing Noise Immunity of Cables for Fire Protection System. *Electrical insulation and Cable Engineering*. 2020. № 4. Р. 54–58.
5. Хорхе В. Магнитная защита для беспроводных систем. *Электронные компоненты*. 2017. № 10. С. 73–76.
6. Розов В. Ю., Ассуиров Д. А. Автоматическое управление внешним магнитным полем технических объектов. *Технічна електродинаміка*. 2011. №1. С. 11–18.
7. Bhattacharjee S. Protective Measures to Minimize the Electromagnetic Radiation. *Electronic and Electric Engineering*. 2014. Vol. 4. P. 375–380.
8. Kasar V., Pawar A. A Novel Approach to Electromagnetic Interference Shielding for Cell Phones. *International Journal of Science and Research*. 2014. Vol. 3. P. 1869–1872.
9. Singh J. Computer Generated Energy Effects on Users and Shielding Interference. *International Journal of Innovative Research in Computer and Communication Engineering*. 2015. Vol. 3. P. 10022–10027.
10. Касаткіна Н.В., Левченко Л.О., Панова О.В., Тихенко О.М., Ченчевой В.В. Оптимізація параметрів екранування електромагнітних полів різномірних джерел у виробничих будівлях. *Вісті Донецького гірничого інституту*, 2020. Вип. № 1(46). С. 181–188.
11. Glyva V., Kasatkina N., Nazarenko V., Burdeina N., Karaieva N., Levchenko L., Panova O., Tykhenko O., Khalmuradov B., Khodakovskyy O. Development and research of protective properties of composite materials for screening electromagnetic fields of a wide frequency range. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. 2020. Iss. 2/12 (104). PP. 40–47.
12. Glyva V., Podkopaev S., Levchenko L., Karaieva N., Nikolaiev K., Tykhenko O., Khodakovskyy O., Khalmuradov B. Design and study of protective properties of electromagnetic screens based on iron ore dust. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. 2018. Iss. 1/5 (91). PP. 10–17.

Received (Надійшла) 14.10.2020

Accepted for publication (Прийнята до друку) 04.11.2020

The design of electromagnetic screens of composite structure to ensure the stability of the critical infrastructure

N. Kasatkina, L. Levchenko, O. Tykhenko

Abstract. The principles of designing magnetic and electromagnetic screens for electromagnetic compatibility of electrical and electronic equipment at critical objects were developed. It is shown that to improve the stability of the equipment that provides important functions (air traffic control, power generation companies operation, etc.) some hardware and their components should be screened. The basic principles of design are given on the example of designing cylindrical protective design. It is proved that the actual electromagnetic situation must be studied for the efficient design of a protective structure. This makes it possible to determine the minimum required shielding factor, based on the standards for the resistance of electronic equipment to electromagnetic influences. Based on the shielding coefficient for known functions, the values of electrophysical parameters of the shielding material were obtained. These parameters were determined by changing the concentration and thickness of the shielding structure. This step is mandatory due to the lack of data on the electrophysical and magnetic properties of composite materials in the reference literature. To simplify and speed up the design work, it is advisable to obtain approximations for the changes in protective properties depending on material characteristics. The calculation of the effective magnetic permeability of metal-polymer material depending on its composition (the ratio of the content of the shielding substance and the polymer) using the Comsol package are given. This parameter determines the shielding factor obtained experimentally. The screening of large areas (separate rooms) must take into account the need to ensure wireless connection signal frequency of at least 0,18-0,20 mW/cm².

Keywords: electromagnetic compatibility, electromagnetic screen, electrical properties, shielding coefficient.