

УДК 538.69:331.45

В.В. Коваленко<sup>1</sup>, В.А. Глива<sup>1</sup>, О.М. Тихенко<sup>1</sup>, С.О. Лук'яненко<sup>2</sup><sup>1</sup> Національний авіаційний університет, Київ<sup>2</sup> Національний технічний університет України «КПІ», Київ

## РОЗРАХУНКОВІ МЕТОДИ ВИЗНАЧЕННЯ ЗАХИСНИХ ВЛАСТИВОСТЕЙ ЕЛЕКТРОМАГНІТНИХ ЕКРАНІВ У ДАЛЬНІЙ ЗОНІ ЕЛЕКТРОМАГНІТНОГО ПОЛЯ

Встановлено, що для розробки та впровадження захисних екранів у хвильовій зоні електромагнітного поля спочатку необхідно провести аналітичне прогнозування їх ефективності. Доведено, що коефіцієнти відбиття залежать виключно від електрофізичних характеристик матеріалу екрана і не залежать від геометричних. Для точного розрахунку, необхідно розглядати ще одну компоненту загального коефіцієнта екранування – втрати внаслідок багаторазового відбивання електромагнітної хвилі у товщі екрана. На основі теоретичних досліджень запропоновані розрахункові методи для визначення захисних властивостей таких екранів.

**Ключові слова:** електромагнітний екран, зона індукції, хвильова зона, електромагнітна безпека.

### Вступ

**Постановка проблеми.** З точки зору поширення, різних закономірностей зміни з відстанню електричної і магнітної складових електромагнітного поля існують дві зони електромагнітного поля – ближня і дальня.

Ближньою зоною (зоною індукції) вважається простір, який відповідає відстані до джерела поля

$$r < \frac{\lambda}{2\pi} \quad (\lambda - \text{довжина електромагнітної хвилі}).$$

Дальня зона – це зона, яка відповідає умові

$$r > \frac{\lambda}{2\pi}.$$

Цю зону ще називають хвильовою, через сформованість у ній електромагнітних хвиль. Якщо розглянути електромагнітні поля найбільш розповсюджених у виробничих умовах частот, то довжина хвилі електромагнітного поля промислової частоти 50 Гц складає 6 тис. км, довжина хвилі засобів мобільного зв'язку частот GSM 900 – Wi-Fi – 0,330 – 0,125 м. Це заздалегідь обумовлює різні підходи до захисту від їх впливів. Так, у першому випадку ми знижуємо напруженості електричної та магнітної складових квазістационарного поля, а у другому – знижуємо потік енергії, що впливає на людину. Не випадково, випромінювання ультрависоких і вищих частот нормуються за щільністю потоку енергії (мкВт/см<sup>2</sup>). Відомо, що захист від високочастотних випромінювань технічно простіший, але зі зростанням частоти усе більша частка коефіцієнта екранування припадає на відбиття електромагнітних хвиль, що в умовах наявності внутрішніх джерел випромінювань та різноспрямованих зовнішніх джерел тільки погіршує електромагнітну обстановку у приміщеннях. Особливо це стосується багатопверхових адміністративних та офісних приміщень. Під час

досліджень ми фіксували одночасне функціонування до 12 бездротових комп'ютерних мереж. Формально обмежити їх використання неможливо через те, що використання обладнання, яке працює на частотах 2,1 ГГц, 2,4 ГГц, 5,1 ГГц не має обмежень щодо розміщення, а частоти не підлягають ліцензуванню. Таким чином, розроблення заходів і засобів захисту від випромінювань ультрависоких і вищих частот залишається актуальним. Але їх впровадженню повинне передувати оцінювання ефективності захисту та прогнозування змін електромагнітної обстановки за певних умов. Це можливо реалізувати, використовуючи математичний апарат та програмні засоби.

**Аналіз останніх досліджень і публікацій.** Вирішенню задач екранування електромагнітних полів у виробничих умовах присвячено багато досліджень: як класичних, так і сучасних [1, 2]. Частина з них присвячена розрахунковим методам визначення ефективності електромагнітних екранів, наприклад [1, 3, 4]. Але вони або не мають прикладного значення, як [1, 3], або призначені для розв'язання задач електромагнітної сумісності [4]. Деякі дослідження [5, 6] спрямовані на підвищення електромагнітної безпеки працюючих, але стосуються, в основному, наднизькочастотних електромагнітних полів. Роботи щодо захисту працюючих від впливу електромагнітних полів у дальній зоні (ультрависокі і вищі частоти) спрямовані, в основному, на розроблення екранів високої ефективності без урахування співвідношень відбивальної та поглинальної складових коефіцієнта екранування. Це досить важливо як з точки зору захисту працюючих, так і забезпечення розповсюдження інтенсивності випромінювання, необхідного для функціонування засобів бездротового зв'язку. Це можливо за використання оціночних розрахункових методів на засадах розумної достатності.

**Мета статті** – надання дієвих і простих у використанні розрахункових методів ефективності захисних екранів у хвильових (дальніх) зонах електромагнітних полів.

### Виклад основного матеріалу

Усі розрахунки щодо визначення змін електричної та магнітної складових електромагнітного поля базуються на розв'язанні рівнянь Максвелла. Так, напруженості і потенціали, що характеризують просторовий розподіл магнітного поля, у комплексній формі розраховуються з фундаментального співвідношення:

$$\operatorname{rot} \dot{\mathbf{H}} = (\gamma + j\omega\epsilon_0)\dot{\mathbf{E}} + \mathbf{J},$$

де  $\dot{\mathbf{H}}$  – комплексна амплітуда вектора напруженості магнітного поля;  $\dot{\mathbf{E}}$  – комплексна амплітуда вектора напруженості електричного поля;  $\mathbf{J}$  – комплексна амплітуда вектора густини струму сторонніх джерел;  $\gamma$  – питома електропровідність,  $\epsilon$  – відносна діелектрична проникність;  $\epsilon_0$  – електрична стала ( $8,85 \cdot 10^{-12}$  Ф/м);  $\omega$  – колова частота;  $j$  – комплексна одиниця.

Щоб отримати аналітичні функції розрахунку ефективності екранування необхідно визначити напруженість електромагнітної хвилі, що проходить крізь матеріал.

Відомо, що частки коефіцієнта екранування, які припадають на відбиття та поглинання електромагнітної хвилі матеріалом залежать від співвідношення хвильових опорів простору розповсюдження хвилі  $Z_0$  та хвильового опору матеріалу екрана  $Z$ .

$$\text{При цьому } Z_0 = \sqrt{\frac{\mu_0}{\epsilon_0}}, \text{ а } Z = \sqrt{\frac{j\omega\mu}{\sigma + j\omega\epsilon}}, \text{ де } \sigma -$$

провідність матеріалу екрана.

Здійснивши стандартні перетворення, можна отримати значення коефіцієнтів екранування за рахунок відбиття та поглинання:

$$K_{\text{відб.}} = 20 \lg \left( \frac{Z_0}{4Z} \right), \text{ дБ,}$$

тобто, меншому опору матеріалу відповідають більші коефіцієнти відбиття. Щоб знизити коефіцієнт відбиття, потрібно наблизити значення хвильових опорів. Зазвичай опір вільного простору складає 377 Ом.

З наведеного видно, що коефіцієнти відбиття залежать виключно від електрофізичних характеристик матеріалу екрана і не залежать від геометричних (товщини). Щодо коефіцієнтів поглинання, то цей показник є критичним.

При обиранні товщини екрана слід враховувати еквівалентну глибину проникнення хвилі у тіло екрана. Її стандартне визначення – це відстань від поверхні екрана, на якій поле знизиться у  $e$  разів (2,7), тобто 8,7 дБ. Вона розраховується зі співвідношення:

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

А коефіцієнт поглинання визначається як:

$$K_{\text{погл.}} = 20 \lg e^{\Delta/\delta}, \text{ дБ,}$$

де  $\Delta$  – товщина екрана.

Слід зауважити, що хвильовий опір матеріалу екрана теж закладений у глибину проникнення через його електрофізичні властивості.

Для точного розрахунку необхідно розглядати ще одну компоненту загального коефіцієнта екранування – втрати внаслідок багаторазового відбивання електромагнітної хвилі у товщі екрана. Це обумовлюється наявністю границь розділу «вільний простір – матеріал екрана – вільний простір».

Але з практичної точки зору цей внесок не суттєвий, через недоцільність виготовлення екрана великої товщини. Набагато раціональніше буде вибрати матеріал з прийнятними електрофізичними властивостями та виготовити екран малої товщини.

Винятком є резонансні екрани, зроблені таким чином, щоб тонкий шар поглинального провідного матеріалу розташовувався на відстані чверті падаючої електромагнітної хвилі від провідної підкладки. Такі екрани мають дуже добрі поглинальні властивості, але ефективні у дуже вузькій смузі частот.

Дещо спрощений, але практично значущий підхід використовують для визначення ефективності засобів захисту у цивільній авіації. Коефіцієнти відбиття  $k_{\text{відб.}}$  та проходження  $k_{\text{пр.}}$  електромагнітної хвилі визначають зі співвідношення хвильових опорів двох суміжних середовищ  $Z_1$  та  $Z_2$ :

$$k_{\text{відб.}} = \frac{Z_2 - Z_1}{Z_2 + Z_1},$$

$$k_{\text{пр.}} = \frac{2Z_2}{Z_2 + Z_1}.$$

Якщо середовища за опорами узгоджені, тобто  $Z_1 = Z_2$ , то  $\frac{\mu_2}{\mu_1} = \frac{\epsilon_2}{\epsilon_1}$  і  $k_{\text{відб.}} = 0$ .

Але для більш точних розрахунків при визначенні поглинальних спроможностей екрана потрібно розраховувати тангенс кутів електричних ( $\operatorname{tg}L_1$ ) та магнітних ( $\operatorname{tg}L_2$ ) втрат:

$$\operatorname{tg}L_1 = \frac{\epsilon''}{\epsilon'}, \quad \operatorname{tg}L_2 = \frac{\mu''}{\mu'},$$

де  $\epsilon'$ ,  $\epsilon''$  – дійсна та уявна діелектричні проникності середовища,  $\mu'$ ,  $\mu''$  – дійсна та уявна магнітні проникності середовища. При цьому  $\epsilon''$  та  $\mu''$  характеризують електричні та магнітні втрати у середовищі.

Разом з тим, комплексне хвильове число (стала розповсюдження поля) у даному середовищі  $K$  визначається як:

$$\dot{K}' = \omega \sqrt{(\epsilon' - j\epsilon'')(\mu' - j\mu'')} = K' - jK'',$$

де  $K' = 2\pi/\lambda$  – дійсна складова хвильового числа,  $\lambda$  – довжина електромагнітної хвилі,  $K''$  – коефіцієнт поглинання енергії поля у середовищі.

В даний час багато уваги приділяється метало-полімерним захисним матеріалам. Як експериментально показано у [2], такі екрани мають складні співвідношення відбивальних та поглинальних властивостей. Їх необхідні параметри можна визначити (принаймні для фіксованої концентрації металевих включень у непровідну матрицю), розрахувавши вхідний опір  $Z$ :

$$Z = \frac{Z_1 - jZ_2 \operatorname{tg}(k_1 d)}{Z_2 - jZ_1 \operatorname{tg}(k_2 d)} Z_2,$$

де  $Z_1$  – хвильовий опір металу,  $Z_2$  – хвильовий опір полімеру,  $k$  – хвильові числа,  $d$  – товщина екрана.

Перспективним, на наш погляд, є пошук можливостей враховувати у розрахунках не тільки ваговий вміст металевих включень у непровідний матеріал, а й особливості їх просторового розподілу у тілі екрана. Це надасть змогу поєднати переваги металополімерних та градієнтних екранів для захисту від впливу електромагнітних полів принаймні ультрависоких і вищих частот.

## Висновки

1. Для працюючих у дальній (хвильовій) зоні необхідно розробити і впровадити захисні екрани, але спочатку необхідно провести оціночне аналітичне прогнозування їх ефективності.

2. Особливістю екранування електромагнітних полів у дальній зоні є значний внесок у загальний коефіцієнт екранування відбивальної складової. Це

обумовлює необхідність раціоналізувати їх співвідношення, виходячи з принципу розумної достатності.

3. Методика розрахунку щодо визначення коефіцієнтів відбиття та поглинання повинна бути простою у використанні, але прийнятною за припущеннями і спрощеннями.

4. Перспективним є створення такого методу визначення захисних властивостей, який дозволить одночасно визначати ефективність металополімерного екрана з градієнтами вмісту металевих включень.

## Список літератури

1. Аполлонский С.М. Справочник по расчёту электромагнитных экранов / С.М. Аполлонский. – Л.: Энергоатомиздат, 1998. – 224 с.
2. Панова О.В. Захист працюючих від впливу електромагнітних полів екрануванням: дис. ... канд. техн. наук: 05.26.01 / Панова Олена Василівна. – К., 2014. – 151 с.
3. Резинкина М.М. Использование численных расчетов для выбора средств экранирования от действия магнитного поля / М.М. Резинкина // Журнал технической физики. – 2007. – Вып. 11. – С. 17-24.
4. Демский Д.В. Метод расчета эффективности экранирования для неоднородных электромагнитных экранов: дис. ... канд. техн. наук: 05.12.14 / Демский Дмитрий Викторович. – М., 2014. – 114 с.
5. Назаренко М.В. Розрахункові методи визначення захисних властивостей електромагнітних екранів / М.В. Назаренко, О.М. Гончарова, О.В. Панова // Проблеми охорони праці в Україні. ДУ «ННДІПБОП». – К.: 2012. – Вип. 23. – С. 84-89.
6. Глива В.А. Просторові критерії екранування низькочастотних магнітних полів / В.А. Глива, Л.О. Левченко, Т.М. Перельот // Управління розвитком складних систем. – 2015. – Вип. 22. – С. 128-133.

Надійшла до редколегії 11.04.2016

Рецензент: д-р техн. наук, проф. М.І. Адаменко, Харківський національний університет ім. В.Н. Каразіна, Харків.

## РАСЧЕТНЫЕ МЕТОДЫ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ЗАЩИТНЫХ СВОЙСТВ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ ЭКРАНОВ В ДАЛЬНОЙ ЗОНЕ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОГО ПОЛЯ

В.В. Коваленко, В.А. Глыва, О.Н. Тихенко, С.А. Лукьяненко

Установлено, что для разработки и внедрения защитных экранов в волновой зоне электромагнитного поля, сначала необходимо провести аналитическое прогнозирование их эффективности. Было доказано, что коэффициенты отражения зависят исключительно от электрофизических характеристик материала экрана и не зависят от геометрических. Для точного расчета необходимо рассматривать еще одну компоненту общего коэффициента экранирования – потери вследствие многократного отражения электромагнитной волны в толще экрана. На основе теоретических исследований предложены расчетные методы для определения защитных свойств таких экранов.

**Ключевые слова:** электромагнитный экран, зона индукции, волновая зона, электромагнитная безопасность.

## METHODS FOR CALCULATING THE ELECTROMAGNETIC PROPERTIES OF THE PROTECTIVE SHIELDS IN THE WAVE ZONE OF THE ELECTROMAGNETIC FIELD

V.V. Kovalenko, V.A. Glyva, O.M. Tykhenko, S.O. Lukyanenko

To develop and implement protective screens in the wave zone of the electromagnetic field, first necessary carry out an analytical prediction of their performance, it was found. Coefficients of reflection depend exclusively on the electrical characteristics of the material of the shield and do not depend on the geometry, it has been proved. For exact calculation it is necessary to consider another component of the total shielding coefficient - loss due to multiple reflection of the electromagnetic wave in the thickness of the shield. On the basis of theoretical investigations proposed calculation methods for determining protective properties of these shields.

**Keywords:** electromagnetic shield, the induction zone, wave zone, the electromagnetic safety.