

## ФІЗИЧНІ ОСНОВИ ЕКРАНУВАННЯ З ПОГЛЯДУ ПИТАНЬ ЕЛЕКТРОМАГНІТНОЇ СУМІСНОСТІ

А.В. Гнатов, Д.С. Шимук, А.О. Шевченко  
(Харківський університет Повітряних Сил ім. І. Кожедуба)

*Стаття присвячена опису основних фізичних основ екранування при впливі різноманітних електромагнітних хвиль. Подані і розкриті основні методи вирішення задач електромагнітного екранування в залежності від конкретних обставин та властивостей електромагнітного поля завод.*

*екранування, електромагнітне поле, електромагнітні хвилі*

**Постановка проблеми.** На цей час вже існує чимало теоретичного матеріалу по проблемі електромагнітної сумісності (ЕМС), але ще багато питань залишаються не розкритими [1]. Це стосується і методів захисту від електромагнітних полів завод. Найбільш поширеним методом є екранування. Але екран необхідно розраховувати в залежності від конкретних обставин та властивостей електромагнітного поля (ЕМП) заводи. Це пов'язано з тим, що на різних частотах ЕМП заводи властивості екранування кардинально протилежні, не кажучи про те, що екран (при відповідних умовах) може стати коливальним контуром, а отже й джерелом небезпечних електромагнітних завод (резонанс). Тому, важливо зрозуміти, які фізичні процеси відбуваються при екрануванні електромагнітних завод.

**Аналіз останніх досліджень і публікацій.** Останнім часом по проблемі екранування зібрано чимало матеріалу, але ж він досить різноокий та охоплює велику кількість технічних галузей, а деякі питання екранування взагалі не розглядаються, або їм приділяють мало уваги, що робить роботу необ'єктивною [2].

Останнім часом все більше викликає цікавість проблема ЕМС [3], а не менш актуальним аспектом цієї проблеми є розробка та впровадження методів захисту від ЕМП завод [4, 5].

**Мета статі.** Ця стаття присвячена представленню та опису фізичних основ екранування та переліку основних методів рішення задачі екранування.

**Фізичні основи екранування.** Розглянемо на прикладі плоского провідного екрана загальні принципи екранування [2]. При цьому поки будуть опущені з розгляду ефекти зв'язані, з геометричною формою екрана. На рис 1. представлений нескінченно довгий плоский металевий

екран товщиною  $d$ , що перебуває в повітрі, на який з однієї сторони падає плоска електромагнітна хвиля. У процесі свого падіння на межу розподілу двох середовищ із різними електрофізичними характеристиками (повітря – метал і метал – повітря) хвиля зазнає віддзеркалення й переломлення, а в товщі екрана через його провідні властивості й часткове поглинання енергії електромагнітного поля. Таким чином, електромагнітна хвиля при взаємодії з екраном віддзеркалюється від його поверхні, частково проникає в стінку екрану, багаторазово віддзеркалюється від стінок екрану й в остаточному підсумку проникає в екрануючу область. При цьому всі перераховані вище процеси супроводжуються втратами електромагнітної енергії хвилі. Таким чином, загальна ефективність екранування дорівнює сумі втрат на віддзеркалення ( $A_{\text{відз}}$ ), поглинання ( $A_{\text{погл}}$ ) й багаторазові віддзеркалення в стінках екранів ( $A_{\text{Б.відз}}$ ):

$$A_{[\text{Дб}]} = A_{\text{відз}} + A_{\text{погл}} + A_{\text{Б.відз}} \quad (1)$$

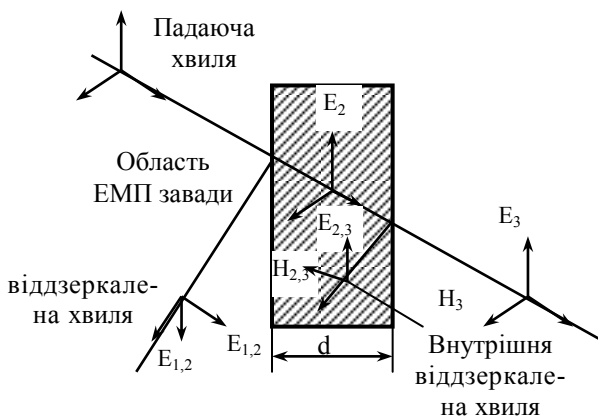


Рис. 1. Віддзеркалення й переломлення падаючої електромагнітної хвилі на елементі екрану

Для будь-якої електромагнітної хвилі, що розповсюджується, характерним параметром є повний хвильовий опір середовища ( $Z_{\text{ХВ}}$ ), в якому відбувається її розповсюдження

$$Z_{\text{ХВ}} = \dot{E} / \dot{H} \quad (2)$$

де  $\dot{E}, \dot{H}$  – комплекси напруженості електричного і магнітного поля.

Якщо врахувати, що повний характеристичний опір середовища  $Z_0 = \sqrt{j\omega\mu / (\sigma + j\omega\varepsilon)}$ , то для плоскої хвилі в дальній зоні випромінювання

$$Z_{\text{хв}} = Z_0,$$

де  $\sigma$  – питома провідність середовища, См/м;  $\mu$  – магнітна проникність, Гн/м;  $\varepsilon$  – діелектрична проникність, Ф/м;  $\omega$  – кутова частота, рад/с.

Так, як для діелектрика  $\sigma \ll j\omega\varepsilon$ , тоді

$$Z_{\text{хв}} = Z_0 = \sqrt{\mu/\varepsilon} = 120\pi, \quad (3)$$

Для провідного середовища  $\sigma \gg j\omega\varepsilon$ , повний характеристичний опір відповідає повному опору екрану ( $Z_e$ ):

$$Z_0 = Z_e = \sqrt{\frac{j\omega\mu}{\sigma}} \quad \text{або} \quad |Z_e| = \sqrt{\frac{\omega\mu}{\sigma}}. \quad (4)$$

**Втрати на віддзеркалення на межі розподілу двох середовищ.** Ці витрати пов'язані з різними значеннями повних характеристичних опорів цих середовищ. При проходженні хвилі через екран вона зустрічає на своєму шляху дві межі розподілу рис. 2.

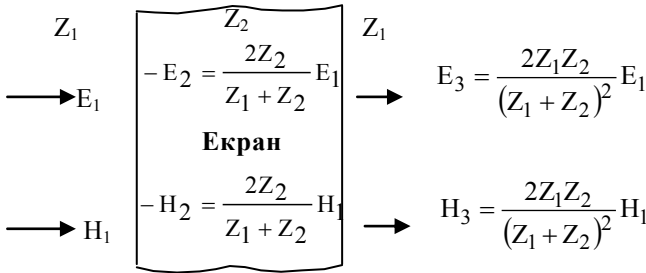


Рис. 2. Часткові віддзеркалення й переломлення на поверхнях екрана компонент електромагнітного поля

Хоча електричного й магнітного поля віддзеркалюються від кожної межі по-різному, сумарний ефект після проходження обох меж однаковий для обох полів. Якщо екран виготовлений з металу, тоді  $Z_1 \geq Z_2$ . При цьому найбільше віддзеркалення (найменша напруженість пройденної хвилі) спостерігається для електричних полів при її виході з екрану (на другій межі).

Оскільки віддзеркалення електричних полів відбувається головним чином на першій поверхні, то навіть тонкі екрани забезпечують більші втрати на віддзеркалення.

Для металевих екранів

$$A_{\text{відз[дБ]}} \approx 20 \lg \left( \frac{Z_{\text{хв}}}{4|Z_e|} \right). \quad (5)$$

У випадку плоскої хвилі (у дальній зоні) випромінювання вираз (5) для втрат на віддзеркалення з урахуванням (3), (4) прийме вигляд

$$A_{\text{відз}}[\text{дБ}] = 20 \lg(94,25 \sqrt{\sigma} \sqrt{\omega \mu}), \quad (6)$$

звідки виходить, що втрати на віддзеркалення великі в екрана, виготовленого з матеріалу з високою провідністю й малою магнітною проникністю. Близня зона випромінювання в основному визначаються не характеристиками середовища, а параметрами джерела (антени).

Хвильовий опір, створюваний точковим низькоомним джерелом електричного поля для ближньої зони випромінювання ( $r < 0,1 \lambda/2\pi$ ), можна апроксимувати наступним рівнянням

$$|Z_{\text{хв}}|_{\text{ел}} = 1/(\omega \epsilon), \quad (7)$$

де  $r$  – відстань від джерела до екрану,  $m$ ;  $\omega$  – кутова частота випромінювання,  $\text{рад/с}$ .

У цьому випадку втрати на віддзеркалення в електричному полі ближньої зони джерела випромінювання розраховуються за формулою [2]

$$A_{\text{відз.ел}}[\text{дБ}] = 20 \lg(1/(4\omega \epsilon |Z_e|)), \quad (8)$$

де  $Z_e$  – повний опір екрана, обумовлений (4).

При цьому втрати електричного поля ближньої зони випромінювання на віддзеркалення виявляються більші, ніж втрати в плоскій хвилі, і в основному визначають процес екранування.

Хвильовий опір, обумовлений точковим низькоомним джерелом магнітного поля в ближній зоні його випромінювання ( $r < 0,1 \lambda/2\pi$ ),

$$|Z_{\text{хв}}|_{\text{м}} = \omega \mu r, \quad (9)$$

тоді

$$A_{\text{відз.ел}}[\text{дБ}] = 20 \lg(\omega \mu r / (4|Z_e|)). \quad (10)$$

У цьому випадку втрати на віддзеркалення менші, ніж у плоскій хвилі, і на низьких частотах їх можна прийняти рівними нулю.

**Втрати на поглинання.** Ці втрати обумовлені поверхневим ефектом в провідниках, що приводить до експоненціального зменшення амплітуди електричних і магнітних полів, які протікають в металевий екран (рис. 3). Це пояснюється тим, що струми індуковані в металі, викликають омичні втрати і, отже, нагрів екрану. Таким чином

$$E_2 = E_1 \exp\left(\frac{-x}{\gamma}\right); \quad H_2 = H_1 \exp\left(\frac{-x}{\gamma}\right), \quad (11)$$

де  $E_2$  і  $H_2$  – відповідно напруженості електричних і магнітних полів на відстань  $x$  від поверхні екрану;  $\gamma = \sqrt{2/(\omega \mu \epsilon \sigma)}$  – глибина скин-шару, визначена як відстань, яка повинна пройти електромагнітна хвиля в металі, щоб послабшати в  $e$  разів.

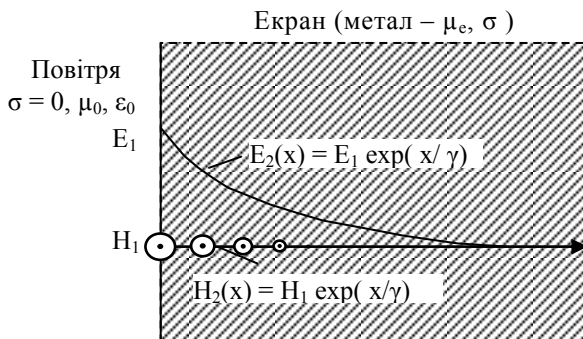


Рис. 3. Ослаблення електромагнітного поля в поглинаючому середовищі

Тоді втрати на поглинання екраном товщиною  $d$

$$A_{\text{погл}}[\text{дБ}] = 8.69d / \gamma = 6.16d \sqrt{\omega \mu_e \sigma} . \quad (12)$$

Як видно з наведеного виразу, втрати на поглинання зростають пропорційно товщині екрану, магнітній проникності і питомої провідності його матеріалу, а також частоти поля завади.

**Втрати на багатократні віддзеркалення в тонких екранах.** Ці втрати пов'язані з хвильовими процесами в товщині екрану і в основному визначаються віддзеркаленням від його межі і поглинанням в металі екрану. Для електричних полів майже вся енергія падаючої хвилі віддзеркалюється від першої межі і лише невелика її частина проникає в екран. Тому багатократними віддзеркаленнями усередині екрану для електричних полів можна нехтувати. Для магнітних полів велика частина електромагнітної хвилі, що впливає проходить на екран, в основному віддзеркалюючись тільки на другій межі, тим самим створюючи передумови до багатократних віддзеркалень усередині стінки екрану. Коефіцієнт корегування багатократного віддзеркалення для магнітних полів в екрані з товщиною стінки  $d$  при глибині скин-шару  $\gamma$  [2]

$$A_{\text{м.відз}}[\text{дБ}] = 20 \lg [1 - \exp(-2d/\gamma)] . \quad (13)$$

При цьому коефіцієнт багатократного віддзеркалення має негативне значення, що вказує на зменшення ефективності екранування тонким екраном унаслідок багатократних віддзеркалень.

**Методи рішення задач екранування.** Отримання аналітичних співвідношень для розрахунку ефективності екранування реальних корпусів-екранів радіотехнічних засобів (РТЗ) шляхом точного рішення електродинамічних задач взаємодії електромагнітних завад (ЕМЗ) і екранів досить скрутно. Тому при виведенні розрахункових формул екранування використовують різні допущення, які дозволяють без істотної похибки спільності

даних процесів вирішити поставлене завдання. При цьому в теорії електромагнітного екранування широко використовується ряд методів.

**Хвильовий метод.** Цей метод застосовується, коли розміри корпусів – екранів РТЗ порівнянні або трохи перевищують довжину хвилі ЕМЗ або її еквівалент при імпульсних процесах.

Використання цього методу припускає, що екран знаходиться в хвильовій зоні випромінювання, завада розповсюджується у вигляді хвилі і форма екрану з боку падіння хвилі відповідає фронту падаючої хвилі. Процеси взаємодії електромагнітного поля завади і екрану відповідають раніше описаним. При падінні хвилі електромагнітного поля завади на екран частина енергії падаючої хвилі віддзеркалюється в навколишній простір, а частина проникає в область, що екранується, поглинаючись матеріалом екрану і проходить віддзеркалення та заломлення на внутрішній її поверхні.

У основі даного методу лежить інтегрування відомої з електродинаміки системи інтегральних та диференціальних рівнянь Максвелла:

$$\left. \begin{aligned} \oint_S \bar{B} \cdot d\bar{S} &= 0 \text{ або } \operatorname{div} B = 0; \\ \oint_S \bar{D} \cdot d\bar{S} &= \int_V \rho \cdot dV \text{ або } \operatorname{div} D = \rho. \end{aligned} \right\} \quad (14)$$

де  $\bar{B}$  – вектор магнітної індукції;  $\bar{D}$  – вектор електричної індукції (вектор електричного зсуву);  $\rho$  – щільність електричного заряду;  $V$  – об'єм;  $S$  – площа поверхні.

Інтеграція наведеної системи диференціальних рівнянь проводиться спільно з граничними (безперервність нормальних і тангенціальних складових електричних і магнітних полів на межах розподілу середовищ) і початковими умовами (для нестационарних – імпульсних процесів), а також з умовою регулярності одержаних рішень на нескінченності і в області, що екранується.

Основним недоліком хвильового методу є його складність для конструкторських розрахунків, особливо, якщо форма екрану не співпадає з конфігурацією фронту хвилі завади, оскільки в цьому випадку фронт падаючої хвилі доводиться представляти у вигляді розкладання по власним функціям, відповідних формі поверхні екрану (наприклад, при падінні плоскої електромагнітної хвилі на сферичний екран її фронт представляють у вигляді розкладання по сферичним функціям).

Проте хвильовий метод широко використовується в СВЧ техніці. У короткохвильовій частині діапазону СВЧ, починаючи з сантиметрових і особливо на міліметрових довжинах хвиль, хвильовий метод розрахунку екранів поступово переходить у метод плоских хвиль, оскільки в цьому

діапазоні довжин хвиль навіть на малих відстанях поле завади набуває структури  $T$  – хвиль, а частину поверхні екрану, що ними опромінюється, зважаючи на малі лінійні розміри і кривизну, можна вважати плоскою.

**Метод наведених потенціалів.** Цей метод застосовується, якщо розміри екрану істотно менше довжині хвилі поля завади. Метод часто носить назву «квазістаціонарного» наближення. В цьому випадку поле завади можна вважати потенціальним. Тоді в системі інтегральних та диференціальних рівнянь Максвела (14) нехтуючи струмами зсуву, що фізично означає одночасну зміну в часі поля в усіх точках даного простору. Система рівнянь в цьому випадку має вигляд:

$$\left. \begin{aligned} \oint \bar{H} dl &= \int_S \bar{\delta} ds + \int_S \frac{\Delta \bar{D}}{\Delta t} \cdot d\bar{S} \quad \text{або} \quad \text{rot} \bar{H} = \bar{\delta} + \bar{\delta}_{\text{см}}; \\ \oint \bar{E} dl &= - \int_S \frac{\Delta \bar{B}}{\Delta t} \cdot d\bar{S} \quad \text{або} \quad \text{rot} \bar{E} = - \frac{\Delta \bar{B}}{\Delta t}. \end{aligned} \right\} \quad (15)$$

де  $\delta$  – щільність струму провідності;  $\bar{\delta}_{\text{см}}$  – щільність струму зсуву.

З (14) витікає, що завдання оцінки ефективності електромагнітного екранування для випадку квазістаціонарного наближення зводиться до завдання про проникнення магнітної складової електромагнітного поля. Напруженість електричного поля завади на поверхні екрану із-за його потенційного характеру рівна нулю і надалі присутня, як індукційна – наведена магнітним полем завади в металі екрану. При цьому основний процес екранування пов'язаний з поглинанням енергії поля завади матеріалом екрану.

**Метод теорії кіл.** Фізичні процеси, що відбуваються в електромагнітних екранах, багато в чому схожі з процесами, що протікають в електричних колах з розподіленими параметрами (довгих ліній). При розповсюдженні енергії поля завади через екран доводиться брати до уваги поглинання енергії в матеріалі екрану і її віддзеркаленням на межах розподілу повітря – екран – повітря. Поглинанню енергії в екрані в теорії кіл відповідає затухання хвиль в лінії, а віддзеркаленню енергії на межі екрану – віддзеркалення енергії хвиль в лінії з неузгодженим навантаженням.

Фізична аналогія виражається і в схожому математичному описі цих двох процесів, диференціальні рівняння яких мають вигляд:

– для процесу екранування:

$$\left. \begin{aligned} \frac{\partial \dot{H}_y}{\partial z} &= (\sigma + j\omega \epsilon) \dot{E}_x; \\ \frac{\partial \dot{E}_x}{\partial z} &= -j\omega \mu \dot{H}_y; \end{aligned} \right\} \quad (16)$$

– для лінії передачі:

$$\left. \begin{aligned} \frac{\partial \dot{I}}{\partial z} &= -Y\dot{U}; \\ \frac{\partial \dot{U}}{\partial z} &= -Z\dot{I}. \end{aligned} \right\} \quad (17)$$

Цей метод не має особливої переваги перед хвильовим (останній є більш загальним), але він дозволяє використовувати відомі з теорії кіл рішення. Різновидом даного методу у разі квазістаціонарного наближення є схемний метод, широко вживаний в закордонній практиці, де він відомий під назвою «теорія індукційного екранування». В цьому випадку електричне і магнітне екранування розглядають окремо і описують їх процесами, які пояснює рис. 4. При цьому коефіцієнти магнітного ( $S_H$ ) і електричного ( $S_E$ ) екранування мають вид:

$$S_H = R / (R + j\omega L); \quad S_E = R / (R + 1 / j\omega C). \quad (18)$$

Обмеженість даного методу полягає в тому, що його доцільно застосовувати виключно при низькочастотному полі впливу на екрани, для яких глибина скин-шару відповідає або більше товщини стінки екрану на ( $\delta \geq d$ ). Інакше необхідно враховувати залежність активного опору оболонки  $R$  від частоти.

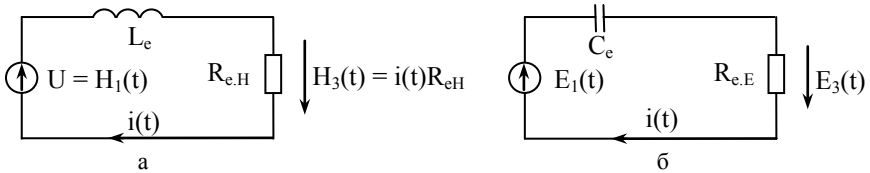


Рис. 4. Еквівалентні схеми заміщення для процесів низькочастотного екранування: а – електричне екранування, б – магнітне екранування

**Методи рішення задач екранування при гармонійних і імпульсних процесах.** ЕМЗ досить різноманітні по своїй формі, а їх часові характеристики охоплюють достатньо широкий діапазон. Але ж зі всього їх різноманіття можна виділити два основні види – гармонійні і імпульсні завади.

*Синусоїдальні завади.* Представлення зовнішньої синусоїдальної дії у вигляді:

$$\dot{H} = \dot{H}_{\max} \exp(j\omega t) \quad \text{або} \quad \dot{H} = \dot{H}_{\max} \exp(-j\omega t), \quad \text{де} \quad \dot{H}_{\max} = e^{j\psi_H},$$

дозволяє досить легко розділити просторові і тимчасові змінні в початкових диференціальних рівняннях, що описують процеси екранування, і виключити з розгляду при рішенні тимчасову змінну. Це можна здійснити на підставі того, що при проходженні синусоїдальної хвилі електромагнітного поля через металеву стінку екрану вона не змінює своєї час-



тоти в порівнянні з падаючим полем. Такий розподіл змінних дозволяє досить легко вирішувати задачі екранування.

*Імпульсні завади.* Оскільки імпульси містять не одну частоту, а їх спектр, подібного розподілу змінних, як було описано раніше, зробити неможна зважаючи на різну реакцію екрану на поля різних частот. Тому при оцінці ефективності екранування від імпульсних завад потрібне застосування спеціальних методів: спектрального аналізу, що містить в своїй основі пряме і зворотне перетворення Фур'є [7]; метод на основі інтеграла Дюамеля; методу операційного обчислення, в основі якого лежить пряме і зворотне перетворення Карсона – Хевісайда.

**Висновки.** 1. Для електричного поля основним механізмом екранування є втрати на віддзеркалення.

2. Для низькочастотного магнітного поля в дальній зоні випромінювання майже все ослаблення досягається за рахунок втрат на віддзеркалення, тоді як на високих частотах ослаблення відбувається в основному із-за втрат на поглинання, вони ж є визначними і при екрануванні магнітних полів ближньої зони випромінювання.

3. Вибір методу рішення задачі екранування необхідно робити з врахуванням частотних та електромагнітних властивостей завад.

## ЛІТЕРАТУРА

1. *Самойленко Б.Ф., Гнатов А.В. та ін. Проблеми забезпечення ЕМС при розробці та виготовленні вимірювальної та РЕТ для різноманітних комплексів озброєння // Вісник НТУ "ХПИ". – Х.: ХПИ, 2002. – № 7. – С. 148-153.*
2. *Кравченко В.І., Болотов Е.А., Летунова Н.И. РЭС и мощные электромагнитные помехи. – М.: Радио и связь, 1987. – 250 с.*
3. *Гнатов А.В. Диагностика сложных систем комплексов технических средств по электромагнитной обстановке // Системы обработки информации. – Х.: ХВУ, 2004. – Вып. 10 (38). – С. 16-25.*
4. *Аполонский С.М., Вілесов Д.В., Воршевский А.А. Электромагнитна сумісність в системах електропостачання // Электричество. – 1991. – № 4. – С. 91-93.*
5. *Князев А. Д. Элементы теории та практики забезпечення електромагнітної сумісності РЕЗ. – М.: Радио и связь, 1984. – 336 с.*
6. *Отт Г. Методы подавления шумов и помех в электронных системах. – М.: Мир, 1979. – 317 с.*
7. *Гнатов А.В. Математична модель корисних сигналів та завад на комплексі технічних засобів // Системы обработки информации. – Х.: ХУ ПС, 2005. – Вып. 3(43). – С. 175-183.*

Надійшла 22.05.2006

**Рецензент:** доктор технічних наук, професор Б.Ф. Самойленко,  
Харківський університет Повітряних Сил ім. І. Кожедуба.