

РОЗРАХУНОК ЕЛЕКТРОМАГНІТНИХ ЕКРАНІВ

Розглянуті методи забезпечення електромагнітної сумісності за допомогою екранування, вказаний порядок розрахунку різних типів екранів, приведено приклад розрахунку магнітостатичного екрана, розмірів з'єднань, технологічних, вентиляційних й комутаційних отворів, патрубків, стільникових ґрат, в екрані. Наведено приклад розрахунку коефіцієнта екранування плоского металевих екрана в ближній та дальній зонах випромінювання.

Ключові слова: захист інформації, електромагнітна сумісність, електромагнітна обстановка, екранування, випромінювання, тип поля завади, ефективність екрана, параметри матеріалів, магнітостатичний, технологічні отвори, патрубки, стільникові ґрати, компенсація, хвильовий опір, відносна провідність матеріалу, глибина проникнення хвиль.

Вступ.

Без знання основ впливу потужних полів на електронні засоби та методи їх захисту у сфері захисту інформації, в умовах великої конкуренції, неможливо кваліфіковано забезпечити захист інформації від несанкціонованого доступу (розповсюдженню) в багатьох галузях, враховуючи і галузь інформаційної безпеки.

За методами і способами забезпечення електромагнітної сумісності (ЕМС) накопичений значний практичний досвід як у вигляді загальних технічних розв'язків завдання ослаблення перешкод і їхніх джерел, наприклад, шляхом застосування фільтрів, екранів, раціонального монтажу, ефективного заземлення, так і у вигляді численних приватних розв'язків схемного і конструктивно-технологічного характеру при створенні конкретних пристроїв перешкодозахисту й перешкодовидалення [1-3]. Ефективність таких розв'язків підвищується, якщо вони передбачаються на початкових етапах розробки й виробництва виробів.

У першу чергу це ослаблення повинне проводитися прямим зменшенням величин паразитних опорів. Способи такого зменшення елементарні: розміщення ймовірних джерел і приймачів на максимально можливій відстані один від одного: правильна взаємна орієнтація їх деталей і контурів, вилучення сторонніх проводів, які можуть зв'язати джерело й приймач і т.д. За недостатності всіх указаних заходів доводиться застосовувати екранування.

Екрануванням називається локалізація електромагнітної енергії в межах певного простору, що досягається шляхом заборони поширення її всіма можливими способами.

Електромагнітна хвиля в металі практично повністю загасає на відстані, порівнянному з довжиною хвилі, що обумовлює ефективність екранування металом електромагнітних випромінювань надвисоких і дуже високих частот. Для низькочастотної області це неприйнятно, тому металеві екрани тут мають обмежену ефективність.

Природа дії електромагнітного екрана полягає в тому, що електромагнітне поле проникає в стінку екрана й збуджує в ньому заряди або індукує струми, власні поля яких накладаються на первинне поле, частково або повністю компенсуючи його.

При цьому несуттєво, чи перебуває первинне поле усередині або зовні екрана.

Важливе практичне значення має розрахунок екранів. Оскільки в результаті розрахунку отримуються основні параметри екрану, його форма, матеріал, товщина стінок і т.п.

Основна частина.**1. Порядок розрахунку екранів:**

1. Визначається тип поля завади, яке класифікується як електростатичне, магнітостатичне та електромагнітне;

а) Простір навколо умовного випромінювача електромагнітної завади поділяється на ближню зону $r < \lambda / 2\pi$ та дальню $r > \lambda / 2\pi$ зони, де λ - довжина хвилі завади, r - відстань від випромінювача до екрана.

Якщо випромінювач уявити у вигляді електричного диполя, то у наближеній зоні переважає електричне поле, а якщо уявити у вигляді – рамки зі струмом, то переважає

магнітне поле. У першому випадку можна говорити про електростатичне поле, а у другому – про магнітостатичне. Наприклад, високовольтні елементи та пристрої можуть бути представлені електричним диполем, а котушки індуктивності, трансформатори, провідники – рамкою зі струмом;

2. Визначається необхідна ефективність екрана (тобто у скільки разів потрібно ослабити дію поля).

$$E_e = E \setminus E_1 \quad \text{та} \quad E_m = H \setminus H_1$$

де: E_e – ефективність екранування за електричною складовою поля; E – напруженість електричного поля до екранування, E_1 – напруженість електричного поля після екранування; E_m – ефективність екранування за магнітною складовою поля; H – напруженість магнітного поля до екранування, H_1 – напруженість магнітного поля після екранування.

3. Вибираємо конструктивну форму екрана, наприклад, у вигляді паралелепіпеда, циліндра або сфери. Форма екрана впливає на ефективність екранування та на резонансні якості, а саме на значення частоти, на якій відбувається різке зростання магнітного або електричного поля всередині екрана. Для порівняння екранів різних форм, вводять загальний параметр – еквівалентний радіус R_e . Для екрана у вигляді паралелепіпеда:

$$R_e = \sqrt[3]{\frac{3}{4\pi} l_1 l_2 l_3}, \quad \text{для циліндричного екрана: } R_e = \sqrt[3]{\frac{3}{16} D^2 h}, \quad \text{для сферичного екрана: } R_e = r_e$$

де l_1, l_2, l_3 – відповідно довжина, ширина та глибина паралелепіпеда; D, h – відповідно діаметр та висота циліндричного екрана; r – радіус сфери сферичного екрана.

$$4. \text{ Визначаємо нижню резонансну частоту екрана: } f_{\text{рез}} = \frac{138}{R_e} 10^6$$

Значення резонансної частоти не повинно входити в спектр частот завади.

5. Вибираємо матеріал (табл. 1) і конструкцію стінок екрана. Матеріал стінок екрана найбільше впливає на ефективність екранування. Величиною, що характеризує екрануючу дію матеріалу, є глибина проникнення δ (на такій глибині напруженість електричного поля зменшується в n разів);

$$\delta = 0,52(\pi f \mu_r \sigma),$$

де f – частота поля завади, МГц; μ_r – відносна магнітна проникність матеріалу екрана; σ – питома провідність матеріалу екрана, См/м.

Таблиця 1 - Електричні параметри матеріалів, призначених для екранування

Матеріал	Питома провідність σ , См/м 10^{-7}	Відносна магнітна проникність μ_r	Матеріал	Питома провідність σ , См/м 10^{-7}	Відносна магнітна проникність μ_r
Алюміній	3,54	1	Залізо	1,0	1100-22000
Латунь	1,25	1	Нікель	1,38	12-80
Мідь	5,8	1	Сталь	0,66	150
Срібло	6,2	1	Пермалой	0,42	80-8000

6. Розраховуємо товщину екрана.

2. Розрахунок магнітостатичного екрана

Екранування магнітних полів виконується на основі шунтування магнітного поля феромагнітними матеріалами (магнітостатичне екранування) та на основі витіснення магнітного поля полем вихрових струмів в екрані.

При магнітостатичному екрануванні відбувається замикання магнітного поля, утвореного постійними магнітами або струмами, що протікають по електричних колах апаратури, екраном внаслідок його підвищеної магнітної проникності [1-3].

Якщо екран виконати із феромагнітних матеріалів (пермалой, сталь) з великою магнітною проникністю, то магнітний потік замикається в основному на стінках екрана, який має менший магнітний опір у порівнянні з опором повітряного простору, зайнятим екраном. При цьому ефективність екранування буде тим вища, чим менше стиків, швів і розрізів, які ідуть поперек напрямленню лініям магнітної індукції.

Ефективність екранування визначається за формулою:

Для екрана в вигляді паралелепіпеда:

$$E=20\lg[1+[1+(1-a_1^2/a_2^2)(\mu_r+1/\mu_r-2)],$$

де: a_1 – внутрішній розмір екрана; a_2 – зовнішній розмір екрана;
Товщина екрана визначиться із залежності:

$$d=0,5a_2 [1-\sqrt{1-(10^{E/20}-1)/(\mu_r+1/\mu_r-2)}],$$

Для циліндричного екрана:

$$E=20\lg[10,25(1-r_1^2/r_2^2)(\mu_r+1/\mu_r-2)],$$

де: r_1 – зовнішній радіус екрана; r_2 – внутрішній радіус екрана;
Товщина екрана визначиться із залежності:

$$d=r_2 [1-\sqrt{1-4(10^{E/20}-1)/(\mu_r+1/\mu_r-2)}],$$

Для сферичного екрана:

$$E=20\lg\{1+0,22[1-(r-d^3)/r^3]\{\mu_r+(1/\mu_r)-2\}\},$$

$$d=r [1-\sqrt[3]{1-4,5(10^{E/20}-1)/(\mu_r+1/\mu_r+2)}],$$

При магнітостатичному екрануванні та проектуванні екранів необхідно виконати такі вимоги:

- магнітна проникність матеріалу екрана повинна бути якомога більшою;
- збільшення товщини стінок приводить до збільшення ефективності екранування, але необхідно враховувати можливі конструктивні обмеження за масою та габаритами;
- стики, розрізи та шви повинні розміщуватися паралельно лініям магнітної індукції;
- заземлення екрана не впливає на ефективність екранування.

Дія металевих екранів у змінному високочастотному магнітному полі ґрунтується на використанні явища електромагнітної індукції, що викликає вихрові струми в екрані, які утворюють вторинне магнітне поле, направлене зустрічно полю у зону, яку захищають.

В результаті при конструюванні високочастотних функціональних вузлів апаратури в якості матеріалів екранів найчастіше використовують немагнітні матеріали, які забезпечують достатню ефективність і вносять в екрановані вузли менше втрат у порівнянні з магнітними матеріалами.

Еквівалентна глибина проникнення для різних матеріалів в області високих частот достатньо мала, тому екран з будь якого матеріалу порівняно невеликої товщини забезпечить ефективне екранування. При конструюванні таких екранів найчастіше постає питання забезпечення жорсткості, стійкості до механічних впливів, стійкості до корозії та технологічності конструкції.

Таким чином основні вимоги до конструювання екранів, що діють методом витіснення магнітного поля вихровими струмами, такі:

- товщину екрана необхідно вибрати більшою за еквівалентну глибину проникнення;
- ефективність екранування підвищується зниженням опору вихровим струмам, тому найчастіше виготовляють екрани з алюмінію, міді та латуні;
- стики, розрізи та шви повинні розміщуватись у напрямку вихрових струмів в екрані;
- заземлення екранів, що працюють за рахунок утворення вихрових струмів, не впливає на ефективність екранування.

3. Розрахунки розмірів з'єднань, технологічних отворів, патрубків, стільникових ґрат

З'єднання елементів екрана

Для забезпечення електричної герметичності листи (полотна) екрана повинні бути відповідним чином з'єднані: в нахлест (з перекриттям), встик або подвійним фланцем.

Зварювання безперервним швом може бути замінено точковим зварюванням або кріпленням листів гвинтами. При цьому середнє число n контактних крапок на 1 м довжини контакту визначається за залежністю:

$$n = 10,6 (Ln \setminus \lambda)^{0,25},$$

де Ln - необхідна ефективність екранування, дБ.

Для забезпечення зниження впливу електромагнітних перешкод (ЕМП) на 40 дБ при довжині хвилі менш 5 м слід відмовитися від крапкових контактів і використовувати суцільні з'єднання елементів конструкції екрана.

Вентиляційні й комутаційні отвори в екрані

Не повинні знижувати ефективність екрана. Ці отвори повинні бути виконані за принципом поза межного хвилеводу.

Мінімальне загасання, внесенє отвором як фільтром, може бути розраховане за залежністю:

Для прямокутних отворів

$$L_{\min} = \frac{27,3}{\alpha} \sqrt{1 - \left(\frac{2\alpha}{\lambda}\right)^2},$$

де L_{\min} - мінімальне загасання, внесенє хвилеводом як фільтром, (тобто зниження електромагнітних коливань) на 1 м довжини, дБ/м; α - мінімальний розмір отвору, м; λ - довжина хвилі ТМП, м.

Для круглого отвору слід прийняти:

$$\alpha = 0,853 D, \text{ де } D - \text{діаметр отвору в м.}$$

В діапазоні сантиметрових хвиль отвори в екранах закриваються хвилеводними фільтрами типу «сотова решітка». Сотова конструкція патрубка має більшу ефективність, ніж ефективність окремого хвилевода. Додаткове ослаблення випромінювання сотової конструкції $L_{\text{дод}}$, дБ, для квадратного або прямокутного патрубка визначається із залежності:

$$L_{\text{дод}} = 20 \ln \sqrt{n_{\text{я}}}$$

Де: $n_{\text{я}}$ - число комірок в загальному сотовому хвилеводі.

Додаткове ослаблення випромінювання сотовим патрубком $L_{\text{дод}}$ вираховується із заданого ослаблення при визначенні мінімальної довжини поза межного хвилевода, тому довжина сотової решітки

$$L_{\text{с}} = \frac{L_{\text{мп}} - 20 \ln \sqrt{n_{\text{я}}}}{B_{\text{мін}}} ?$$

де: $L_{\text{с}}$ - довжина сотової решітки, м.

4. Приклад рішення задачі розрахунку коефіцієнта екранування плоского металевго екрана

Товщина екрана 0,05 мм на частоті 10^5 Гц в ближній і дальній зоні випромінювання. Провідність матеріала екрана $5,8 \cdot 10^8$ См/м, відносна магнітна проникність 100.

Вихідні дані:

$$\sigma = 5,8 \cdot 10^7, \quad f = 0,1 \cdot 10^6, \quad \mu = 100, \quad d = 0,05, \quad i = \sqrt{-1}, \quad E = 1$$

Визначаємо відносну провідність матеріалу і глибину проникнення хвиль в нього:

$$\sigma_r = \frac{\sigma}{5,8 \cdot 10^7}, \quad \omega = 2\pi f 10^6, \quad \delta = \frac{1}{\sqrt{\pi f \mu \sigma_r} 10^{-6}}, \quad \sigma = 0,178$$

Визначимо хвильовий опір матеріалу стінки екрана:

$$Z_e = \sqrt{i\omega \frac{\mu}{\sigma}}, Z_e = 377$$

Визначимо хвильовий опір в ближній зоні випромінювання:

$$Z_d=377, Z_{bm}=7,9*10^{-6} \text{ rf}, Z_{bm} = 188,599$$

Визначимо коефіцієнт затухання екрана внаслідок відбиття в дальній зоні:

$$P_1=108-10\log\left(\mu \frac{f10^{-6}}{\sigma_r}\right), P_1=98$$

В ближній зоні:

$$P_{be}=142-10 \log\left[\mu f(10^{-6})^3 \frac{r^2}{\sigma_r}\right], P_{be}=104,44$$

Визначимо коефіцієнт затухання внаслідок поглинання в стінці екрана:

$$\Pi=131,4 d \sqrt{f\mu\sigma_r}, \Pi=2,078*10^4, db=0,001, fb=1, l=(0,1314 \frac{d}{\pi})\sqrt{\mu\sigma_r} \sqrt{\frac{f}{\alpha}}, fb=2,078*10^4$$

Корегуючий коефіцієнт:

$$B=20 \lg(|1-e^{2d\sqrt{\pi\mu\sigma_r}10^{-6}} e^{i2d\sqrt{\pi\mu\sigma_r}10^{-6}}|), B=0,417$$

Загальний коефіцієнт затухання в ближній та дальній зоні:

$$E_d = P_1 + \Pi + B, E_d = 2,087 * 10^4$$

$$E_{de} = P_{be} + \Pi + B, E_{de} = 2,088 * 10^4$$

Висновки

Необхідність електромагнітної сумісності обумовлена тим, що в реальних умовах роботи встаткування присутнє чимале число випромінювань різного роду, а спільна коректна й надійна робота технічних засобів неможлива без забезпечення електромагнітної сумісності (ЕМС). Вихід технічних засобів з ладу або ж неправильна їхня робота можуть стати причиною аварії, у тому числі системної. Крім того, порушення можуть бути як зворотними, так і незворотними.

ЕМС технічних засобів повинна забезпечуватися на всіх етапах їх «життя»: як під час проектування, введення в роботу, так і в процесі експлуатації.

Знання електромагнітної обстановки стосовно різних місць розміщення технічних засобів, тобто видів електромагнітних перешкод, що впливають на технічні засоби і їх характеристик (насамперед рівнів перешкод, а також тимчасових і спектральних параметрів, частот виникнення, величин внутрішнього опору джерел перешкод і т.д.), має велике значення, тому що дозволяє обґрунтовано визначити рівні ЕМС для ЕМП (електромагнітних перешкод) різних видів і встановлювати граничні рівні перешкодоемісії і завадостійкості, що забезпечують ЕМС ТЗ у конкретних умовах експлуатації.

Можливість теоретичного розрахунку параметрів екранів для забезпечення ЕМС ТЗ та захисту персоналу дозволяє зменшити втрати при проектуванні та виготовленні екранів, зменшити ризики відмов ТЗ при експлуатації та виходу їх з ладу.

Література

1. Кечиев Л.Н., Акбашев Б.Б., Степанов П.В. Экранирование технических средств и экранирующие системы. – М.: ООО "Группа ИДТ", 2010. – 470 с.
2. Петраков А. В. Основы практической защиты информации : учеб. пособие. ; 3-е изд. – М. : Радио и связь, 2001. – 368с.
3. Островский О.С., Одаренно Е.Н., Шматько А.А. Защитные экраны и поглотители электромагнитных волн // Харьковский национальный университет им. В.Н. Каразина, Украина. 2003. <http://www.bnti.rn>.

Надійшла: 18.01.2018

Рецензент: д.т.н. Вишнівський В.В.