



Janina Pospieszna*

EFEKTYWNOŚĆ EKTRANOWANIA ELEKTROMAGNETYCZNEGO — WYBRANE ZAGADNIENIA

Streszczenie: Stały wzrost liczby eksploatowanych urządzeń energoelektronicznych powoduje wzrost poziomu zakłóceń elektromagnetycznych (EM). Równocześnie, wprowadzanie układów elektronicznych o coraz większej skali integracji związane jest z obniżeniem progu wrażliwości tych urządzeń na narażenia elektromagnetyczne. Stąd coraz większe zainteresowanie problemem ekranowania EM.

W pierwszej części artykułu podano ogólne podstawy efektywnego ekranowania pola EM. W drugiej części — przedstawiono materiały stosowane obecnie w technice ekranowania EM, przy czym zwrócono szczególną uwagę na nowoczesne technologie stosowane w tej dziedzinie.

Słowa kluczowe: pole elektromagnetyczne, efektywność ekranowania

1. Wprowadzenie

Zadaniem kompatybilności elektromagnetycznej jest zapewnienie harmonijnego współdziałania urządzeń i systemów ze środowiskiem elektromagnetycznym. Coraz większe znaczenie tego problemu wiązać należy przede wszystkim z obserwowanym zjawiskiem powszechnego uzależniania się różnych dziedzin od coraz liczniej stosowanych urządzeń i systemów elektronicznych. Stały się one integralną częścią wielu złożonych systemów, w tym i energetycznych, warunkując ich prawidłowe działanie. O niezawodności układów elektronicznych decyduje w dużym stopniu ich odporność na narażenia elektromagnetyczne, która znacznie się obniżyła po wprowadzeniu układów elektronicznych wielkiej i bardzo wielkiej skali scalenia [1]. Z drugiej strony, stały

* Instytut Podstaw Elektrotechniki i Elektrotechnologii Politechniki Wrocławskiej

wzrost urządzeń energoelektronicznych powoduje, obok określonych korzyści, również wzrost poziomu zakłóceń EM.

Rolą ekranu elektromagnetycznego jest z jednej strony ochrona ekranowanego obiektu przed działaniem zewnętrznych zakłóceń EM, a z drugiej — zapobieganie emisji zakłóceń EM z ekranowanego obszaru do środowiska zewnętrznego.

Ogólnie zakłócenia EM mogą przejawiać się różnymi formami energii. Może być to energia związana ze stałym lub zmiennym w czasie polem elektrycznym i magnetycznym (pole indukcyjne w sąsiedztwie źródła) albo energia promieniowania elektromagnetycznego (w strefie bliskiego i dalekiego zasięgu). W każdym z przedstawionych przypadków mamy do czynienia z odmiennym mechanizmem ekranowania pola, co należy uwzględnić przy wyborze medium ekranującego i geometrii ekranu.

W przypadku pól stałych technika ekranowania polega na „blokowaniu” pola (przez medium ekwipotencjalne lub medium o niskiej reluktancji, odpowiednio przy ekranowaniu elektrostatycznym lub magnetostatycznym). Jest to technika wyraźnie różna od stosowanej przy ekranowaniu pól zmiennych, gdzie wykorzystywane są mechanizmy strat odbicia i absorpcji energii pola elektromagnetycznego. Przy rozpatrywaniu tych mechanizmów należy uwzględnić odległość od źródła pola EM, którą ocenia się zwykle w stosunku do długości fali γ (częstotliwości f źródła pola). W tym kontekście rozróżniamy strefę bliską (quasi-statyczne pole indukcyjne i pole promieniowania bliskiego zasięgu) i strefę daleką pola EM. W metodologii efektywnego ekranowania pola bliskiego zasięgu zasadnicze znaczenie ma rodzaj źródła pola EM (typu dipola elektrycznego czy magnetycznego).

2. Ogólne podstawy efektywnego ekranowania pola EM

2.1. Efektywność ekranowania

Rozważmy falę elektromagnetyczną (daną przez \vec{E}_i i \vec{H}_i), która pada na metalową barierę o konduktywności σ , przenikalności elektrycznej ε i przenikalności magnetycznej μ (rys. 1). Część fali padającej zostaje odbita (składowe \vec{E}_r i \vec{H}_r), a część przechodzi przez barierę (składowe \vec{E}_t i \vec{H}_t). Efektywność ekranowania SE dla pola elektrycznego \vec{E} definiowana jest jako:

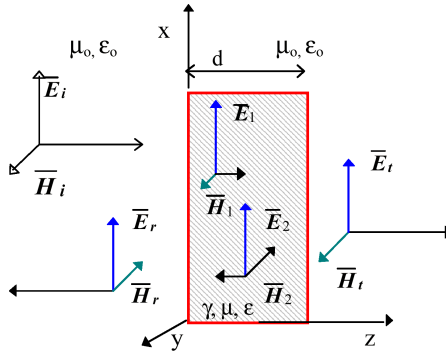
$$SE = 20 \log \left| \frac{\vec{E}_i}{\vec{E}_t} \right| \quad [\text{dB}] \quad (1)$$

gdzie \vec{E}_i/\vec{E}_t jest tzw. współczynnikiem przenoszenia ekranu.

Jeśli pole padające na ekran jest falą płaską i po obu stronach bariery mamy to samo środowisko, to efektywność ekranowania SE dla pola magnetycznego \vec{H} definiowana jest identycznie, jak dla pola elektrycznego [2, 3]:

$$SE = 20 \log \left| \frac{\vec{H}_i}{\vec{H}_t} \right| \quad [\text{dB}] \quad (2)$$

W tym przypadku składowe pola elektrycznego i magnetycznego są do siebie prostopadłe i iloraz amplitud odpowiednich fal jest wielkością stałą, równą impedancji charakterystycznej Z_c danego środowiska.



Rys. 1. Wektory spolaryzowanej fali płaskiej padającej na ekran

Dla harmonicznej fali płaskiej impedancja charakterystyczna definiowana jest jako stosunek amplitud zespolonych odpowiednich składowych wektorów natężenia pola elektrycznego i magnetycznego:

$$\underline{Z}_c = \frac{\underline{E}_m}{\underline{H}_m} = \frac{j\omega\mu}{\gamma} \quad (3)$$

gdzie:

$$\gamma = [j\omega\mu(\sigma + j\omega\varepsilon)]^{1/2} = \alpha + j\beta$$

γ – stała propagacji ośrodka, α – współczynnik tłumienia, β – współczynnik fazowy.

Dla próżni (konduktywność $\sigma = 0$): $\underline{Z}_c = \underline{Z}_o = \frac{\mu_o}{\varepsilon_o}$

Dla środowiska przewodzącego ($\sigma \gg \omega$, $\varepsilon \approx 0$): $\underline{Z}_c = (j\omega\frac{\mu}{\sigma})^{1/2}$

Efektywność ekranowania — w strefie dalekiej źródła pola EM

Załóżmy, że źródło fali padającej na ekran jest dostatecznie odległe od bariery i pole ma postać harmonicznej fali płaskiej. Korzystając z warunków brzegowych dla wektorów pola przy obu powierzchniach ekranu (zewnątrznej i wewnętrznej) z równań Maxwella otrzymujemy wyrażenie na współczynnik przenoszenia ekranu w postaci [2]:

$$\frac{\underline{E}_i}{\underline{E}_t} = \frac{(\underline{Z}_o + \underline{Z}_c)^2}{4\underline{Z}_o \underline{Z}_c} e^{d\alpha} \left[1 - \left(\frac{\underline{Z}_o - \underline{Z}_c}{\underline{Z}_o + \underline{Z}_c} \right)^2 \cdot e^{-2\gamma d} \right] \quad (4)$$

(a) (b) (c)

Poszczególne czynniki powyższego wyrażenia (a, b, c) mają swój udział w efektywności ekranowania SE jako tzw. straty odbicia R_{dB} , straty absorpcji A_{dB} oraz strat wielokrotnych odbić i transmisji M_{dB} :

$$SE_{dB} = R_{dB} + A_{dB} + M_{dB} \quad (5)$$

Przy założeniu, że ekran wykonany jest z dobrego przewodnika ($Z_c \ll Z_o$) i jego grubość jest znacznie większa niż głębokość wnikania pola ($\delta = 1/\alpha$), straty wielokrotnych odbić M_{dB} można uznać za pomijalnie małe a wyrażenia na straty odbicia i absorpcji przyjmują następującą postać:

$$R_{dB} = 168 + 10 \log \left(\frac{\sigma_\rho}{\mu_r f} \right) \quad (6)$$

$$A_{dB} = 8,6859 \frac{d}{\delta} = 131,4d \sqrt{f \sigma_r \mu_\rho}, \quad (7)$$

gdzie: $\sigma_r = \sigma / \sigma_{Cu}$, ($\sigma_{Cu} = 5,8 \times 10^7$ S/m), l [d] = 1 m.

Z analizy powyższych równań wynika, że

- w zakresie niskich częstotliwości dominuje mechanizm strat odbiciowych, które maleją ze wzrostem częstotliwości,
- przy wyższych częstotliwościach dominującym mechanizmem jest mechanizm strat absorpcji, przy czym straty te gwałtownie rosną ze wzrostem częstotliwości,
- wzrost przenikalności magnetycznej materiału ekranu powoduje obniżenie strat odbicia i znaczny wzrost strat absorpcji w ekranie.

W uzupełnieniu należy dodać, że proces absorpcji ma o wiele większe znaczenie dla redukcji pola magnetycznego niż dla pola elektrycznego. W tym przypadku główna transmisja pola (przy minimalnym odbiciu) ma miejsce przy zewnętrznej powierzchni ekranu, przy której zachodzi prawie całkowite odbicie fali pola elektrycznego. Wynika to z analizy współczynników odbicia (stosunek amplitud zespolonych fali odbitej i padającej) przy obu powierzchniach granicznych ekranu, dla obu składowych pola EM [2].

Efektywność ekranowania — w strefie bliskiej źródła pola EM

W przypadku promieniowania pola EM strukturę monochromatycznej fali płaskiej ma tylko pole w strefie dalekiej, którego składowe \underline{E}_θ i \underline{H}_φ są wzajemnie do siebie prostopadłe i ich stosunek jest równy impedancji Z_c . W strefie bliskiej, gdzie pole ma więcej składowych (dodatkowa składowa \underline{E}_r albo \underline{H}_r , w zależności od rodzaju źródła pola), które ponadto nie są prostą funkcją odwrotności odległości od źródła $1/r$ ale zależą od $1/r^2$ i $1/r^3$, stosunek $\underline{E}_\theta / \underline{H}_\varphi$ jest impedancją falową Z_w , przy czym $Z_w \neq Z_c$. W zależności od tego, czy jest to źródło typu dipola elektrycznego (e) czy magnetycznego (m), w strefie bliskiej ($\beta_o r \ll 1$) źródła promieniowania są odpowiednio źródłami o dużej impedancji Z_w , albo dużej admitancji falowej Y_w [2]:

$$|Z_w|_e = (2\pi f \varepsilon_o r)^{-1}, \quad |Z_w|_m = 2\pi f \mu_o r \quad (8)$$

W pewnej odległości od źródła (r/λ_o) impedancja falowa, niezależnie od rodzaju źródła, staje się równa impedancji charakterystycznej. Równość tę przyjmuje się jako graniczne kryterium rozróżnialności pola dalekiego i bliskiego zasięgu, przy czym

im większa jest częstotliwość źródła, tym strefa graniczna znajduje się bliżej źródła ($\lambda_o = v_o/f$).

Przybliżone wyrażenie na efektywność ekranowania SE w strefie bliskiej źródeł pola EM otrzymamy podstawiając w równaniu (4) w miejsce impedancji charakterystycznych ośrodka Z_o odpowiednie impedancje falowe. Dotyczy to członu związanego z mechanizmem strat odbicia, ponieważ straty absorpcji nie zależą od rodzaju źródła pola. Przybliżone wyrażenia na straty odbicia od dobrze przewodzącego ekranu, w zależności od rodzaju źródła pola EM, przyjmują następującą postać:

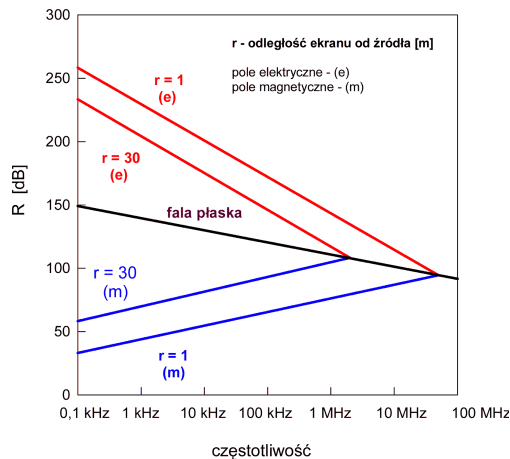
$$R_{e, \text{dB}} = 322 + 10 \log \left(\frac{\sigma_r}{\mu_r f^3 r^2} \right) \quad (9)$$

$$R_{m, \text{dB}} = 14,57 + 10 \log \left(\frac{f r^2 \sigma_r}{\mu_r} \right) \quad (10)$$

Na rys. 2 przedstawiono wykresy zależności strat absorpcyjnych od częstotliwości w strefie bliskiej źródeł pola elektrycznego i magnetycznego, przy różnych odległościach ekranu od źródła. Z rysunku widać, że w odniesieniu do źródła w postaci fali płaskiej straty odbicia w strefie bliskiej

- dla źródła pola elektrycznego są znacznie wyższe i maleją wraz ze wzrostem częstotliwości,
- dla źródła pola magnetycznego są znacznie mniejsze i rosną ze wzrostem częstotliwości.

Ze wzrostem odległości ekranu od źródła przebiegi $R_{\text{dB}}(f)$, wyznaczone zarówno dla elektrycznego jak i magnetycznego źródła pola, zbliżają się asymptotycznie do odpowiedniego przebiegu wyznaczonego dla pola w postaci fali płaskiej.



Rys. 2. Straty odbicia w strefie bliskiej źródeł pola elektrycznego i magnetycznego, dla ekranu wykonanego z miedzi [2]

Ekranowanie pola magnetycznego przy niskiej częstotliwości

Powyżej pokazano, że w strefie dalekiej pola (jednorodna fala płaska) w zakresie niskich częstotliwości w technice ekranowania dominuje mechanizm strat odbicia. W strefie bliskiej źródeł pola magnetycznego, odmiennie niż dla źródeł pola elektrycznego, dominującym mechanizmem strat w całym zakresie częstotliwości jest absorpcja. Jednak zarówno straty absorpcji, jak i odbicia dla źródeł pola magnetycznego w strefie bliskiej, przy niskich częstotliwościach, są stosunkowo małe. W tym przypadku trzeba stosować inne, bardziej efektywne metody ekranowania pola EM, takie jak:

- odchylenie strumienia magnetycznego przy wykorzystaniu materiałów ferromagnetycznych (o dużej permeancji),
- wytwarzanie przeciwnego strumienia magnetycznego metodą pętli przewodzącej (również przez prądy indukowane w ekranie przewodzącym przez zmienną w czasie składową pola magnetycznego fali EM padającej na ekran).

3. Materiały stosowane w technice ekranowania EM

Przy wyborze materiału ekranu EM należy kierować się tym, że musi on spełniać wymogi kompatybilności elektromagnetycznej (EMC) osiągając wymaganą efektywność ekranowania SE przy danych zewnętrznych zakłóceniach EM.

W świetle powyżej przedstawionych rozważań fenomenologicznych o wyborze materiału ekranującego decydują:

- właściwości elektromagnetyczne materiału,
- rodzaj źródła zakłóceń EM i zakres częstotliwości roboczej,
- geometria ekranu (kształt i wymiary),
- właściwości mechaniczne (sztywność, elastyczność, ciężar, odporność na wstrząsy i wibracje, możliwa do zastosowania technika mocowania i uszczelniania),
- odporność na działanie temperatury i innych narażeń środowiskowych,
- prostota i koszt wykonania ekranu.

Dzięki wykorzystaniu nowych, niekonwencjonalnych technologii stosowane obecnie materiały pozwalają sprostać stawianym wymaganiom efektywnego ekranowania.

Materiały te można podzielić na następujące grupy [4]:

- metale i stopy metali,
- przewodniki niemetaliczne,
- polimery przewodzące i lakiery domieszkowane metalami,
- kompozyty polimerowe z wtrąceniami przewodzącymi metalicznymi lub niemetalicznymi,
- kompozyty hybrydowe beton/polimer/beton,
- ceramiki z domieszką metali,
- wielowarstwowe laminaty bor/wolframiany boru lub grafitowe włókna w podłożu epoksydowym,
- kompozyty z włóknami grafitowymi,
- materiały ferromagnetyczne,
- tkaniny zawierające metal.

Literatura

- [1] **Bem D. J.:** *Impulsowe narażenia elektromagnetyczne*, Wrocław, Wydawnictwo Politechniki Wrocławskiej 1994
- [2] **Clayton R. P.:** *Introduction to Electromagnetic Compatibility*, New York, John Wiley & Sons, Inc., 1992
- [3] **Han F., Zhang L.:** *Degeneration of Shielding Effectiveness of Planar Shields Due to Oblique Incident Plane Waves*, Proc. IEEE 1996 Int. Symp. on Electromagnetic Compatibility, Santa Clara, California, s. 82–86
- [4] **Neelakanta P. S.:** *Handbook of Electromagnetic Materials. Monolithic and Composite Versions and Their Applications*, CRC Press, USA, 1995

ELECTROMAGNETIC SHIELDING EFFECTIVENESS — SELECTED PROBLEMS

General principles of effective electromagnetic shielding are given and materials used in the modern shielding technology are presented.

Wykonano w ramach tematu badań statutowych nr 341282,
finansowanego przez Komitet Badań Naukowych