

O pewnych właściwościach mieszanych ekranów warstwowych

Streszczenie. W artykule zwrócono uwagę na kilka interesujących właściwości mieszanych ekranów warstwowych przewodnik/ferromagnetyk. Szczegółowo zbadano ekran dwuwarstwowy - miedź/stal elektrotechniczna. Stwierdzono występowanie plateau w zależności impedancji powierzchniowej w funkcji częstotliwości w takim układzie oraz obniżenie jej wartości poniżej wartości odpowiadającej jednolitemu ekranowi miedzianemu. Efekt ten pozwala na obniżenie strat w badanym układzie i poprawę właściwości ekranowania o kilkanaście procent.

Abstract. The article focuses on some interesting properties of mixed layered conductor/ferromagnetic screens. The two-layer screen: copper/electrical steel was examined in detail. For such a system it was found, that in relation of frequency function on the surface impedance there is a plateau, and surface impedance of analyzed screen reduce its value comparing the value obtained for the homogeneous copper screen. This effect reduces the losses in copper/electrical steel screen system and improves the shielding properties over a dozen percent. (On some properties of mixed layered screens).

Słowa kluczowe: ekrany elektromagnetyczne, ekrany mieszane, impedancja powierzchniowa, metoda macierzy przejścia.

Keywords: electromagnetic screens, mixed screens, impedance surface, transfer matrix method

Wstęp

W celu ograniczenia zakłóceń powodowanych zmiennymi polami elektromagnetycznymi, strat mocy, oraz szkodliwych skutków cieplnych w częściach konstrukcyjnych urządzeń elektrycznych stosuje się dwa rodzaje ekranowania – magnetyczne i elektromagnetyczne [1, 2]. Charakter ich działania jest zasadniczo odmienny - ekrany magnetyczne odprowadzają strumień magnetyczny od chronionego obszaru („przyciągają” go), natomiast elektromagnetyczne osłabiają w nim pole dzięki reakcji pola prądów wirowych („odpychają” strumień magnetyczny).

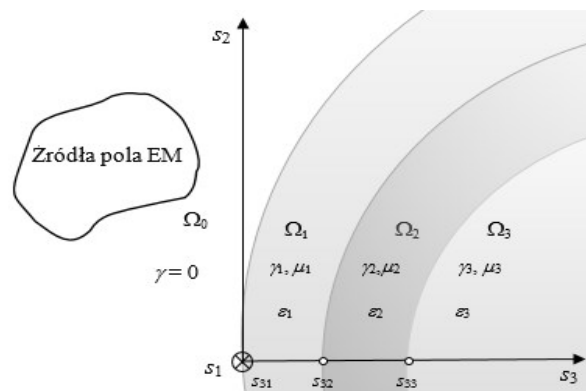
W przypadkach pól o bardzo dużych koncentracjach (np. w transformatorach energetycznych dużych mocy) stosuje się też pewne kombinacje obu rodzajów ekranów, nazywane ekranowaniem mieszanym [1, 2]. W zależności od rozkładu pola rozproszenia, ekrany różnych rodzajów układane są wówczas na różnych fragmentach powierzchni chronionych. Ze względu na przeciwstawne działanie ekranów magnetycznych i elektromagnetycznych może się wydawać, że ich warstwowe układanie mija się z celem. Przedstawione w niniejszej pracy badania symulacyjne takich układów wskazują jednak, że ich zastosowanie może dawać w pewnych przypadkach istotną poprawę właściwości ekranujących w stosunku do ekranów jednorodnych. Ponadto zwrócono uwagę na inne interesujące właściwości takich układów.

Ogólne sformułowanie zagadnienia i metoda rozwiązania

Rozważany układ składa się z umieszczonego w ośrodku dielektrycznym przewodzącego ciała masywnego (obszar chroniony), na którego powierzchni znajduje się wielowarstwowy ekran wykonany również z materiałów przewodzących (Rys. 1).

Grubość każdej warstwy ekranu jest stała. Zakłada się, że parametry elektromagnetyczne poszczególnych obszarów są stałe oraz, że promień krzywizny powierzchni granicznych między tymi obszarami jest znacznie większy od zastępczej głębokości wnikania pola. Układ poddany jest działaniu harmonicznego pola elektromagnetycznego, którego źródła pierwotne znajdują się w obszarze dielektrycznym. Rozpatrywany jest ustalony stan pracy układu, co przy tych założeniach oznacza, że wszystkie składowe pola elektromagnetycznego są sinusoidalnymi funkcjami czasu.

Ponadto zakłada się, że zmienność funkcji pola (maksymalne wartości modułu pochodnych) w kierunkach stycznych do powierzchni granicznych jest znacznie mniejsza niż w kierunku do nich prostopadłym.



Rys.1. Rozważany układ. Ω_1 , Ω_2 - warstwy ekranu, Ω_3 - obszar chroniony

Rozważmy niewielki fragment analizowanego układu w otoczeniu dowolnie wybranego punktu powierzchni obszaru chronionego. Przy poczynionych założeniach można przyjąć, że w obszarach przewodzących układu wektor natężenia pola elektrycznego \mathbf{E} ma kierunek równoległy do ich powierzchni granicznych, a wektor natężenia pola magnetycznego \mathbf{H} jest prostopadły do \mathbf{E} [1, 2]. Nie ograniczając ogólności, do opisu pola elektromagnetycznego w otoczeniu wybranego punktu, można przyjąć lokalny, kartezjański układ współrzędnych s_1, s_2, s_3 (Rys.1), w którym:

$$(1) \quad \mathbf{E} = [E_1, 0, 0] \quad \mathbf{H} = [0, H_2, H_3]$$

Zespolone składowe pola elektromagnetycznego w obszarach przewodzących można opisać jako płaskie fale tłumione rozchodzące się w kierunku s_3 o amplitudach zależnych od współrzędnych s_1, s_2 :

$$(2) \quad E_{1,k}(s_1, s_2, s_3) = E_{1,k}^+(s_1, s_2) e^{-\alpha_k(s_3 - s_{3,k})} + E_{1,k}^-(s_1, s_2) e^{\alpha_k(s_3 - s_{3,k})}$$

$$(3) \quad H_{2,k}(s_1, s_2, s_3) = H_{2,k}^+(s_1, s_2)e^{-\alpha_k(s_3-s_{3,k})} + H_{2,k}^-(s_1, s_2)e^{\alpha_k(s_3-s_{3,k})}$$

$$(4) \quad H_{3,k}(s_1, s_2, s_3) = H_{3,k}^+(s_1, s_2)e^{-\alpha_k(s_3-s_{3,k})} + H_{3,k}^-(s_1, s_2)e^{\alpha_k(s_3-s_{3,k})}$$

gdzie $s_{3,k}$ oznacza współrzędną początku k -tej strefy (por. Rys. 1), $\alpha_k = \sqrt{j\omega\gamma_k\mu_k}$, $k = 1, \dots, n$.

Dla uproszczenia zapisów, w dalszej części pracy argumenty s_1, s_2, s_3 funkcji występujących we wzorach (2) – (4) będą pomijane.

Na podstawie prawa Faradaya otrzymuje się zależności:

$$(5) \quad \frac{E_{1,k}^+}{H_{2,k}^+} = -\frac{E_{1,k}^-}{H_{2,k}^-} = Z_k = \sqrt{\frac{j\omega\mu_k}{\gamma}}$$

$$(6) \quad H_{3,k}^+ = \frac{1}{j\omega\mu_k} \left(\frac{\partial E_{1,k}^+}{\partial s_2} - \frac{\partial E_{2,k}^+}{\partial s_1} \right)$$

$$(7) \quad H_{3,k}^- = \frac{1}{j\omega\mu_k} \left(\frac{\partial E_{1,k}^-}{\partial s_2} - \frac{\partial E_{2,k}^-}{\partial s_1} \right)$$

pozwalające zredukować liczbę niezależnych niewiadomych w (2) – (4) do dwóch, np. $E_{1,k}^+$ i $E_{1,k}^-$. W celu ich wyznaczenia wygodnie jest posłużyć się szczegółowo opisaną w [3] metodą macierzy przejścia M_k , wiążących amplitudy pola elektrycznego sąsiadujących obszarów:

$$(8) \quad \begin{bmatrix} E_{k+1}^+ \\ E_{k+1}^- \end{bmatrix} = M_k \begin{bmatrix} E_k^+ \\ E_k^- \end{bmatrix}$$

Korzystając z warunków ciągłości stycznych składowych E i H otrzymuje się ich jawną postać:

$$(9) \quad M_k = \frac{1}{2} \begin{bmatrix} (1+\lambda_k)e^{-\alpha_k d_k} & (1-\lambda_k)e^{\alpha_k d_k} \\ (1-\lambda_k)e^{-\alpha_k d_k} & (1+\lambda_k)e^{\alpha_k d_k} \end{bmatrix}, \quad \lambda_k = \frac{Z_{k+1}}{Z_k},$$

d_k – szerokość k -tej warstwy.

Zależność między amplitudami pola elektrycznego w pierwszej warstwie ekranu i w obszarze chronionym może być zapisana jako:

$$(10) \quad \begin{bmatrix} E_{1,n+1}^+ \\ E_{1,n+1}^- \end{bmatrix} = P \begin{bmatrix} E_{1,1}^+ \\ E_{1,1}^- \end{bmatrix}$$

gdzie:

$$(11) \quad P = M_n M_{n-1} \dots M_1 = \begin{bmatrix} p_{11} & p_{12} \\ p_{21} & p_{22} \end{bmatrix}$$

jest macierzą przejścia całego układu.

Na podstawie znajomości elementów macierzy P można wyznaczyć wartości wszystkich wielkości użytecznych przy projektowaniu ekranów. W [3] przedstawiono wzory na niektóre z nich, przy założeniu znajomości amplitudy fali padającej z obszaru dielektrycznego. W analizie tego typu zagadnień dla pól wolnozmiennych bardziej praktyczne są wzory wyrażające te wielkości przy założeniu znajomości układu prądowego przy powierzchni zewnętrznej układu ($s_1 = 0$) [1], co jest równoważne znajomości składowej stycznej $H_{||}$ natężenia pola magnetycznego na tej

powierzchni. Poniżej przedstawiono kilka z nich.

Natężenie pola elektrycznego na powierzchni zewnętrznej

$$(12) \quad E_{1,1} = Z_1 \frac{p_{22} - p_{21}}{p_{22} + p_{21}} H_{||}$$

Natężenie pola elektrycznego na powierzchni obszaru chronionego

$$(13) \quad E_{1,n+1} = Z_{n+1} \frac{1}{p_{22} - p_{21}} H_{||}$$

Natężenie pola magnetycznego na powierzchni obszaru chronionego

$$(14) \quad H_{1,n+1} = \frac{1}{p_{22} - p_{21}} H_{||}$$

Gęstość powierzchniowa mocy pozornej wnikażącej do układu (normalna składowa wektora Poyntinga)

$$(15) \quad S_{3,1} = \frac{1}{2} Z_1 \frac{p_{22} - p_{21}}{p_{22} + p_{21}} |H_{||}|^2$$

Gęstość powierzchniowa mocy pozornej wnikażącej do obszaru chronionego

$$(16) \quad S_{3,n+1} = \frac{1}{2} Z_{n+1} \left| \frac{H_{||}}{p_{22} + p_{21}} \right|^2$$

Powierzchniowa impedancja falowa (na powierzchni zewnętrznej)

$$(17) \quad Z_f = Z_1 \frac{p_{22} - p_{21}}{p_{22} + p_{21}}$$

Współczynnik zaekranowania elektromagnetycznego mocy (według definicji w [1])

$$(18) \quad p_{em} = \frac{|Z_0 + Z_{n+1}|^2 (p_{22} - p_{21})(p_{22} + p_{21})^*}{4Z_0^* Z_{n+1} |p_{22}|^2}$$

(W pracy [3] wzór na p_{em} został podany błędnie jako stosunek odwrotny do (18)).

Strumień magnetyczny w ekranie na jednostkę długości

$$(19) \quad \Phi_{ekr} = \frac{Z_1 (p_{22} - p_{21}) - Z_{n+1}}{j\omega(p_{22} + p_{21})} H_{||}$$

Strumień magnetyczny w obszarze ekranowanym na jednostkę długości

$$(20) \quad \Phi_{obe} = \frac{Z_{n+1}}{j\omega(p_{22} + p_{21})} H_{||}$$

Właściwości dwuwarstwowych ekranów mieszanych

W dalszej części pracy skupiono się na analizie pewnych właściwości ekranów mieszanych składających się z dwóch warstw – zewnętrznej, wykonanej z dobrego, niemagnetycznego przewodnika (np. miedź lub aluminium) oraz z wewnętrznej, wykonanej z przewodzącego ferromagnetyka.

Rozważany jest ekran wzdłużny, tzn. zakłada się, że pole magnetyczne ma kierunek równoległy do jego powierzchni

($H_{3,k} = 0$)).

Do obliczeń przyjęto następujące parametry:

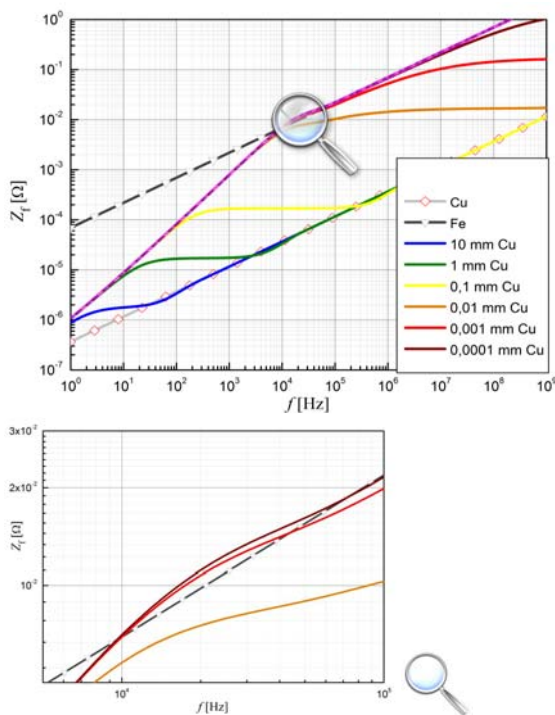
warstwa zewnętrzna $\gamma = 58,8 \text{ MS/m}$, $\mu_r = 1$ (miedź)

warstwa wewnętrzna $\gamma = 1,65 \text{ MS/m}$, $\mu_r = 1000$ (stal elektrotechniczna)

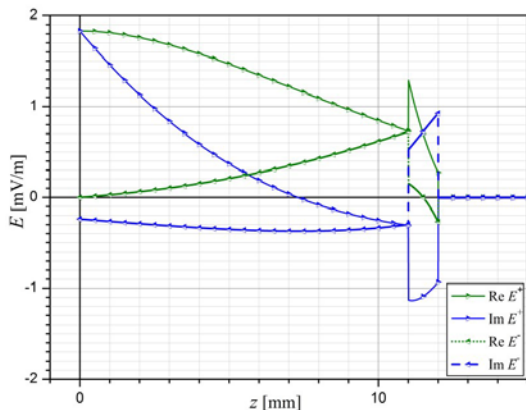
obszar chroniony $\gamma = 58,8 \text{ MS/m}$, $\mu_r = 1$ (miedź)

Przyjęcie jednakowych parametrów dla obszaru chronionego jak dla warstwy zewnętrznej ma na celu zwiększenie przejrzystości analizy. Należy zaznaczyć, że wynikające z niej zasadnicze wnioski nie zależą w istotny sposób od parametrów materiałowych obszaru chronionego (w urządzeniach elektrotechnicznych niskiej częstotliwości obszarami chronionymi są najczęściej stalowe elementy konstrukcji).

Wykresy na rysunkach 2, 3 przedstawiają zależność impedancji powierzchniowej (17) od częstotliwości, dla różnych grubości warstw ekranu (dla porównania przedstawiono też wykresy impedancji falowej miedzi i stali konstrukcyjnej, z jakiej wykonana jest druga warstwa ekranu).

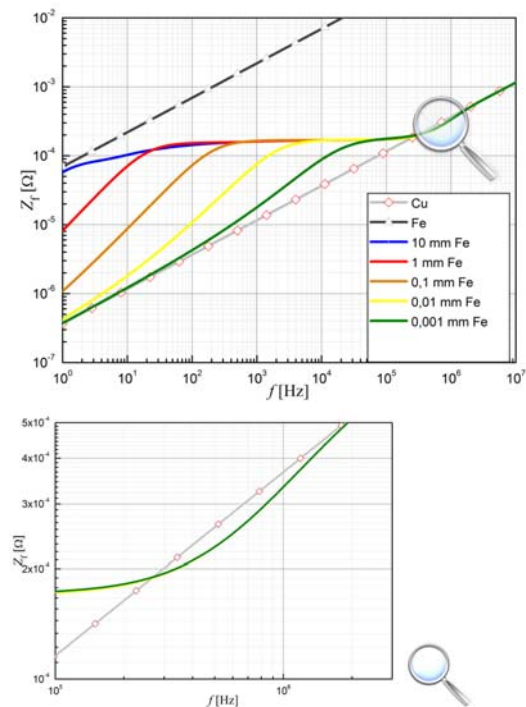


Rys.2. Zależność impedancji powierzchniowej od częstotliwości dla różnych grubości warstwy miedzianej ekranu



Rys.3. Zależność impedancji powierzchniowej od częstotliwości dla różnych grubości warstwy ferromagnetycznej ekranu

Zwracają na nich uwagę fragmenty krzywych obejmujące duże zakresy częstotliwości, gdzie impedancja powierzchniowa przyjmuje niemal stałą wartość (plateau). Z porównania wykresów na rysunkach 2 i 3 widać, że poziom tych plateau jest uwarunkowany grubością warstwy pierwszej (miedzianej), a jego zakres w dziedzinie częstotliwości grubością warstwy drugiej (stalowej). Inna interesująca właściwość analizowanego układu uwidoczniła na tych wykresach, polega na obniżeniu impedancji powierzchniowej poniżej impedancji falowej miedzi (patrz powiększenie na rysunku 3.). Efekt przeciwny, polegający na uzyskiwaniu impedancji powierzchniowej powyżej impedancji falowej stali, z której wykonana jest wewnętrzna warstwa ekranu jest uwidocznił na rysunku 2. Oba efekty występują w pewnych zakresach częstotliwości zależnych od grubości warstw ekranu. Ich przyczyn należy upatrywać w odwróceniu fazy fali przeciwbieżnej (E^-) względem fazy fali współbieżnej (E^+), na zewnętrznej powierzchni ekranu (Rys. 4).

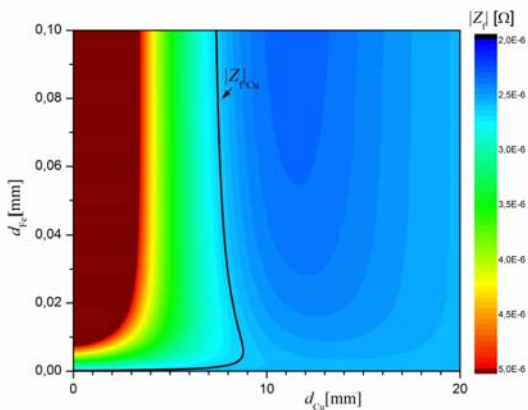


Rys.4. Fala współbieżna i przeciwbieżna pola elektrycznego w analizowanym układzie przy wymuszeniu $H_{2,1} = 1\text{kA/m}$

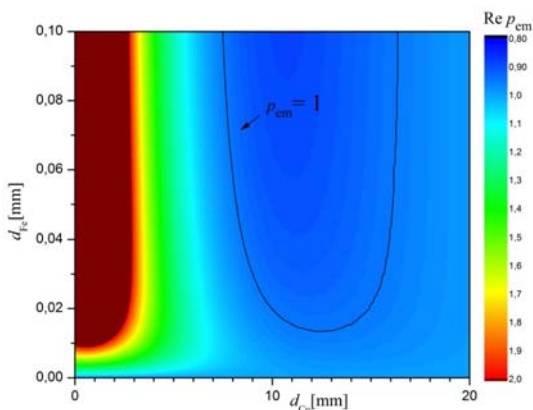
Ze względu na duże znaczenie ekranowania w urządzeniach energetycznych (np. w transformatorach) zbadano dokładniej ten efekt dla pól niskiej częstotliwości.

Na rysunku 5. przedstawiono zależność impedancji powierzchniowej w zależności od grubości obu warstw ekranu przy częstotliwości 50 Hz. Obniżona wartość impedancji powierzchniowej oznacza, że przy założonym wymuszeniu polem magnetycznym, mniejsza jest składowa styczna pola elektrycznego na powierzchni zewnętrznej układu, co przekłada się na zmniejszenie wnikającego do niego strumienia mocy.

Oznacza to, że odpowiednio zaprojektowany mieszany ekran warstwowy może mieć silniejsze działanie ekranujące w określonym zakresie częstotliwości niż jednorodny ekran elektromagnetyczny o tej samej grubości. Parametrem określającym skuteczność tego działania jest współczynnik zaekranowania elektromagnetycznego mocy (18).



Rys.5. Zależność impedancji powierzchniowej od grubości warstw ekranu z miedzi i ze stali, dla $f = 50$ Hz. Czarna linia odpowiada wartości $|Z_f|$ dla miedzi



Rys.6. Zależność współczynnika zaekranowania mocy p_{em} od grubości warstw ekranu z miedzi i ze stali konstrukcyjnej, dla częstotliwości $f = 50$ Hz. Czarna linia odpowiada wartości p_{em} jednorodnego ekranu miedzianego

Na rysunku 6 zaprezentowano zależność p_{em} od grubości warstw ekranu przy częstotliwości 50 Hz.

Z wykresu tego wynika, że zastosowanie ekranu mieszanego o grubościach warstw ok. 11 mm Cu i 0,1 mm Fe w miejsce jednorodnego ekranu Cu, może poprawić współczynnik zaekranowania (obniżyć straty mocy w układzie) o ok. 15 % .

Podsumowanie

W artykule zwrócono uwagę na kilka interesujących właściwości mieszanych ekranów warstwowych przewodnik/ferromagnetyk (np. miedź/stal elektrotechniczna).

- Występowanie plateau na wykresach zależności impedancji powierzchniowej od częstotliwości. Stwierdzono, że charakterystyczna wartość impedancji falowej (poziom) plateau zależy od grubości warstwy przewodzącej, a jego zakres częstotliwości (szerokość) od grubości warstwy ferromagnetycznej.
- Impedancja powierzchniowa w pewnych zakresach częstotliwości może przyjmować mniejsze wartości niż impedancja falowa przewodnika, z którego wykonana jest pierwsza warstwa ekranu, pomimo że impedancja falowa drugiej warstwy jest wielokrotnie wyższa.
- Impedancja powierzchniowa w pewnych zakresach częstotliwości może przyjmować większe wartości niż impedancja falowa ferromagnetyka, z którego wykonana jest druga warstwa ekranu, pomimo że impedancja falowa pierwszej warstwy i obszaru chronionego jest wielokrotnie niższa.
- Przeprowadzone symulacje dla ekranu Cu/Fe wskazują, że przy odpowiednim doborze grubości jego warstw można znacząco poprawić (kilkanaście procent) współczynnik zaekranowania elektromagnetycznego w stosunku do jednorodnego ekranu Cu o tej samej grubości.

Autorzy: Stanisław Pawłowski PhD, Department of Electrodynamics and Electrical Machine Systems, ul. W. Pola 2, 35-959 Rzeszów, Poland; E-mail: spawlo@prz.edu.pl. Jolanta Plewako PhD, EE, Department of Power Electronics, Power Engineering and Complex Systems, ul. W. Pola 2, 35-959 Rzeszów, Poland; E-mail: jplewako@prz.pl

LITERATURA

- [1] Turowski J., Elektrodynamika techniczna, PWN Warszawa, (2014)
- [2] Turowski J., Obliczenia elektromagnetyczne elementów maszyn i urządzeń elektrycznych, WNT Warszawa, (1982)
- [3] Pawłowski S., Plewako J., Macierzowa metoda obliczania parametrów wielowarstwowych ekranów pola elektromagnetycznego, Przegląd Elektrotechniczny, R. 91 NR 12/2015