

mgr inż. PATRYK ZRADZIŃSKI  
 mgr inż. KRZYSZTOF GRYZ  
 mgr inż. JOLANTA KARPOWICZ  
 mgr inż. MARCIN MOLEND  
 Centralny Instytut Ochrony Pracy  
 – Państwowy Instytut Badawczy

## Profilaktyka zagrożeń elektromagnetycznych – symulacje komputerowe i badania osłon ekranujących

Ekranowanie elektromagnetyczne jest jedną z bardziej skutecznych metod technicznych ograniczania zagrożeń elektromagnetycznych w środowisku pracy. W artykule omówiono metody ograniczania zagrożeń oraz zaprezentowano możliwości stosowania symulacji numerycznych, na przykładzie obliczeń i pomiarów parametrów prostych ekranów wykonanych z różnych materiałów. W podsumowaniu stwierdzono, że symulacje numeryczne mogą być wygodnym narzędziem doboru i projektowania właściwych rozwiązań osłon ekranujących.

### Prevention of electromagnetic hazards – numerical simulations and an experimental study

Electromagnetic shielding is one of the more effective technical methods of reducing electromagnetic hazards in the working environment. Methods of hazards reduction are discussed and the possibility of using numerical simulations is presented, with sample calculations and measurements of characteristics of simple shields made from different materials. Numerical calculations can be a convenient tool for selecting and designing suitable shields.

### Pole elektromagnetyczne w środowisku

Każde urządzenie elektryczne jest źródłem pola elektromagnetycznego, które może być wytwarzane w sposób zamierzony lub jako niepożądany efekt uboczny [1, 2]. Do źródeł pól występujących często w środowisku pracy należą urządzenia:

- elektroenergetyczne (linie energetyczne, podstacje elektroenergetyczne, prądowe tory zasilające itp.)
- radionadawcze i telekomunikacyjne (nadawcze stacje radiowo-telewizyjne, urządzenia radiolokacyjne, systemy telekomunikacyjne itp.)
- urządzenia medyczne (aparaty do elektrochirurgii, diatermie fizykoterapeutyczne, aparaty do magnetoterapii itp.)
- urządzenia elektrotermiczne (nagrzewnice i piece indukcyjne, zgrzewarki rezystancyjne i pojemnościowe itp.).

Pole elektromagnetyczne jest bardzo niejednorodnym czynnikiem środowiska, który oprócz oddziaływania bezpośredniego na organizm człowieka i wywołania lub przyczyniania się do niepożądanych zmian stanu zdrowia, może powodować różnego typu zjawiska prowadzące do sytuacji wypadkowych lub potencjalnie wypadkowych. Zagrożenia te są skutkiem bezpośredniego oddziaływania energii pola na ludzi i elementy materialne środowiska (obiekty lub konstrukcje przewodzące) [1]. Zjawiska te są niebezpieczne dla bezpieczeństwa ludzi prze-

bywających w pobliżu źródeł pól elektromagnetycznych, ponieważ odbiór energii pola elektromagnetycznego może być przyczyną m.in.:

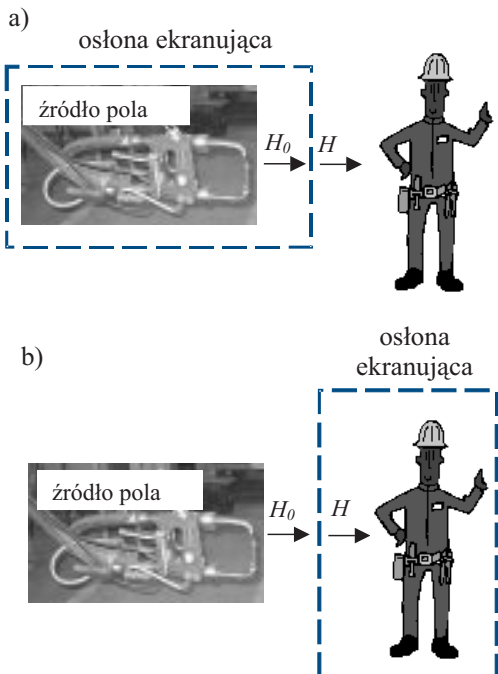
- zakłóceń pracy automatycznych urządzeń sterujących i elektronicznej aparatury medycznej (w tym elektronicznych implantów medycznych)
- detonacji urządzeń elektrowybuchowych (detonatorów)
- pożarów i eksplozji związanych z zapaleniem się materiałów łatwopalnych od iskier wywoływanych przez pola indukowane
- porażenia lub mikroporażenia ludzi prądem kontaktowym, prowadzącego do ich nieprzewidzianych reakcji, potencjalnie groźnych w środowisku pracy.

Z powodu przytoczonych pokrótce niepożądanych następstw ekspozycji, pola i promieniowanie elektromagnetyczne uznano za jeden z niebezpiecznych i szkodliwych czynników występujących w procesie pracy (PN-80/Z-08052). W celu ograniczania oddziaływań bezpośrednich, warunki ekspozycji w otoczeniu ujawnionych źródeł pól poddaje się okresowej kontroli i ocenie w oparciu o kryteria bezpiecznej ekspozycji, ustalone przepisami bhp lub ochrony środowiska [1]. Wnioski z oceny powinny odnosić się również do potrzeby wprowadzenia niezbędnych, dostosowanych do charakteru i stopnia zagrożenia, działań prewencyjnych.

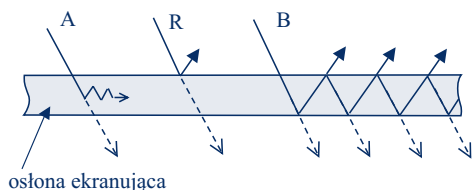
Zapobieganie oddziaływaniom pośrednim oraz niepożądanemu zakłócaniu

działania urządzeń technicznych nie jest rozpatrywane w przepisach bezpieczeństwa i higieny pracy w polach elektromagnetycznych. W przypadku oddziaływania pola elektromagnetycznego na materialne środowisko pracy sytuacja jest utrudniona bowiem do jednoznacznego, wiarygodnego prognozowania wystąpienia określonej sytuacji potencjalnie niebezpiecznej niezbędne jest wzięcie pod uwagę wielu, bardzo różnorodnych i zmieniających się dynamicznie czynników. Oprócz takich podstawowych czynników, jak natężenie i częstotliwość pola elektromagnetycznego, istotne są także wymiary geometryczne, usytuowanie i parametry oraz rodzaj infrastruktury technicznej (m.in. wielkości i właściwości elektrycznych materiałów konstrukcyjnych, skuteczności uziemień), parametrów środowiska (m.in. wilgotności powietrza i wybuchowości atmosfery), odległość człowiek-źródło pola. Zagadnienia dotyczące interakcji pól elektromagnetycznych z urządzeniami technicznymi są rozpatrywane głównie w dokumentach z zakresu kompatybilności elektromagnetycznej (EMC) i normach technicznych dotyczących poszczególnych urządzeń. Przestrzeganie zasad EMC urządzeń ma m.in. na celu zmniejszenie prawdopodobieństwa występowania niepożądanych następstw oddziaływania pól na urządzenia elektryczne i elektroniczne.

Przy tak zróżnicowanych warunkach trudno określić wielkości pól, przy których w żadnym przypadku nie wystąpią jakiegokolwiek niepożądane oddziaływania pól elektromagnetycznych. Dla przykładu najsilniejsze pole magnetostatyczne uznawane za bezpieczne dla osób z elektrostymulatorami serca (0,5 mT) jest kilkadziesiąt razy słabsze od dopuszczalnego w odniesieniu do ekspozycji ogółu ludności (10 ÷ 40 mT) oraz kilkakrotnie słabsze od wielkości pola, w jakim możliwe jest wystąpienie potencjalnie groźnego zjawiska „latających obiektów fer-



Rys. 1. Zasady ekranowania: a) lokalizującego, b) osłaniającego



Rys. 2. Oddziaływanie ekranu na pole elektromagnetyczne:  $R$  – tłumienie odbiciowe zewnętrzne,  $A$  – tłumienie absorpcyjne,  $B$  – tłumienie odbiciowe wewnętrzne (zwykle zaniebtywane)

romagnetycznych” przyciąganych przez magnes (3 mT) [1]. Kolejny przykład to pole magnetyczne 50 Hz zakłócające obraz większości monitorów ekranowych, co może niedopuszczalnie pogorszyć warunki pracy wzrokowej, np. przy sterowaniu procesem technologicznym lub przy precyzyjnych opracowaniach graficznych (ok. 0,5  $\mu$ T). Pole to jest 160 ÷ 200 razy słabsze od dopuszczalnego w odniesieniu do ekspozycji ogółu ludności (80 ÷ 100  $\mu$ T) [1].

### Techniczne środki prewencji zagrożeń elektromagnetycznych

Stosowanie różnego rodzaju, właściwie dobranych technicznych środków prewencji jest zalecane w pierwszym rzędzie w celu ograniczenia prawdopodobieństwa wystąpienia zagrożeń elektromagnetycznych i przeciwdziałania niezamierzonej ekspozycji ludzi i elementów

materialnych środowiska, jako najbardziej skuteczne i niezawodne. Stosowanie osłon oraz ekranowanie maszyn i urządzeń wytwarzających pola elektromagnetyczne jest jedną z metod postępowania zalecanych przez PN-EN 12198 [2] w celu ograniczenia emisji promieniowania maszyn do otoczenia.

Ekranowanie elektromagnetyczne jest procesem konstrukcyjnym, polegającym na otoczeniu jakiejś przestrzeni odpowiednim materiałem w celu zmniejszenia poziomów pól elektromagnetycznych po przeciwnej stronie ekranu w stosunku do umiejscowienia źródła pola. Można rozróżnić dwa rodzaje ekranowania [1, 3]:

- lokalizujące – zamknięcie pola elektromagnetycznego wewnątrz obszaru, do którego człowiek nie ma dostępu w czasie normalnej eksploatacji urządzenia (rys. 1a)
- osłaniające – osłonięcie przed polami elektromagnetycznymi tylko tej przestrzeni, w której człowiek przebywa (rys. 1b).

Ekranowanie lokalizujące powinno być preferowane przy wyborze sposobu ekranowania, ponieważ umożliwia zmniejszenie natężenia pola w całym obszarze otaczającym źródło, a tym samym pewniejszą ochronę ludzi i urządzeń znajdujących się w otoczeniu źródła pola oraz wykluczenie możliwości narażenia przypadkowego. Działanie ekranu elektromagnetycznego jest oparte na wykorzystaniu zjawisk fizycznych zachodzących wówczas, kiedy pole elektromagnetyczne napotyka barierę przewodzącą – odbicia od zewnętrznej i wewnętrznej powierzchni ekranu oraz absorpcji energii pola w materiale ekranu. Parametrem charakteryzującym jakość ekranu jest skuteczność ekranowania  $S$  wyrażana w dB [1, 3]:

$$S[\text{dB}] = 20 \log \frac{X}{X_e} \quad (1)$$

gdzie:

$X$  – natężenie pola elektrycznego,  $E$ , magnetycznego,  $H$ , lub indukcja magnetyczna,  $B$ , w określonym punkcie przestrzeni przed zastosowaniem ekranu,

$X_e$  – natężenie pola elektrycznego,  $E_e$ , magnetycznego,  $H_e$ , lub indukcja magnetyczna,  $B_e$ , w tym samym punkcie po zastosowaniu ekranu.

Pola elektromagnetyczne przechodzące przez ekran (np. siatkę metalową, blachę oraz materiały wielowarstwowe) są częściowo tłumione w wyniku zjawiska odbicia powierzchniowego, tzn. tłumienia odbiciowego zewnętrznego lub strat odbicia. Nie odbita część pola elektromagnetycznego jest tłumiona przy przechodzeniu przez materiał ekranu, a efekt ten jest nazywany tłumieniem absorpcyjnym lub stratami absorpcji. Przy przechodzeniu pola z ekranu na zewnątrz może wystąpić zjawisko jego odbicia od wewnętrznej powierzchni ekranu i wielokrotnych odbić wewnątrz ekranu, nazywane tłumieniem odbiciowym wewnętrznym (rys. 2.). Skuteczność ekranowania, wyrażana w dB, jest sumą skuteczności tych zjawisk:

$$S[\text{dB}] = R + A + B \quad (2)$$

gdzie:

$R$  – tłumienie odbiciowe zewnętrzne  
 $A$  – tłumienie absorpcyjne  
 $B$  – tłumienie odbiciowe wewnętrzne (zwykle zaniebtywane).

Skuteczność ekranowania konstrukcji określonego rodzaju zmienia się wraz z częstotliwością i zależy od parametrów zastosowanego materiału, struktury geometrycznej ekranu i odległości ekranu od źródła pola. Ekranowanie jest zagadnieniem trudnym. Praktycznie niemożliwe jest jednoznaczne prognozowanie wpływu niekompletnych ekranów na poziom pól w wybranych miejscach na zewnątrz ekranu. Do szacunkowych symulacji prognozowanego rozkładu pola dla osłon ekranujących można stosować obliczenia komputerowe [1, 2, 4, 5]. Mogą być one pomocne przy określaniu optymalnych parametrów osłon w celu uzyskania możliwie największej skuteczności ekranowania. Jedyny możliwy sposób ostatecznego zweryfikowania skuteczności zainstalowanego ekranowania polega na porównaniu zmierzonego natężenia pola wystę-

pującego w danym miejscu przed i po założeniu wykonanego ekranu. Skuteczność ekranowania w małym stopniu zależy od kształtu ekranu, który należy dobrać głównie pod kątem jego funkcjonalności ergonomicznej i zabezpieczenia pracownika przed urazami mechanicznymi.

Dużą rolę przy projektowaniu osłon ekranujących odgrywa doświadczenie. Skutkiem nieumiejętnego ekranowania może być nawet spowodowanie zwiększonego zagrożenia na stanowiskach pracy, zamiast oczekiwanego i pożądanego jego zmniejszenia. Dlatego ekranowanie powinno być wykonywane lub co najmniej nadzorowane przez doświadczonych ekspertów, profesjonalnie zajmujących się tymi zagadnieniami. W każdym przypadku po zainstalowaniu ekranu powinny być przeprowadzone pomiary weryfikujące jego skuteczność.

### Symulacje komputerowe jako środek wspomagający projektowanie osłon ekranujących

Modelowanie pól elektromagnetycznych jest wygodnym narzędziem w przypadku, gdy:

- obliczenia analityczne są bardzo złożone lub rozwiązania takie nie są znane
- prognozowanie prowadzone jest na etapie projektu.

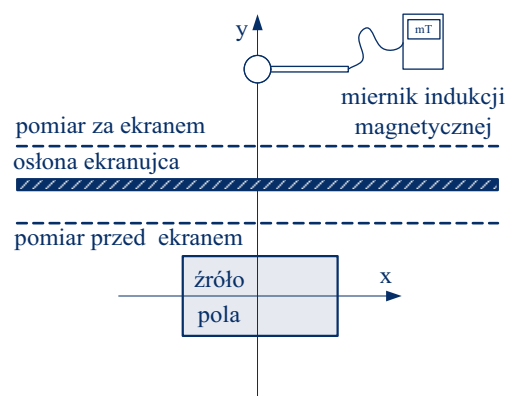
Zastosowanie modelu o geometrii 2D (dwuwymiarowej) wymaga przyjęcia szeregu uproszczeń dotyczących geometrii rozpatrywanego zagadnienia. Dokładność przy modelowaniu złożonych struktur bywała w takim przypadku niewystarczająca. W ostatnich latach wzrastająca gwałtownie moc obliczeniowa komputerów typu PC oraz dostępne komercyjne pakiety oprogramowania umożliwiają stosunkowo dokładne obliczenia modeli 3D, przeprowadzane przy racjonalnym nakładzie pracy i czasie obliczeń. Możliwe jest zastosowanie do symulacji rozkładu przestrzennego pól elektromagnetycznych różnorodnych metod numerycznych róż-

niących się zakresem praktycznego wykorzystania. Bardzo zaawansowana aplikacyjnie i wielokrotnie zweryfikowana doświadczalnie jest metoda elementów skończonych (MES). Główne zalety MES to łatwość wprowadzania tzw. warunków brzegowych definiujących rozpatrywane zagadnienie, prostota logiczna algorytmów, duża uniwersalność i dostępność komercyjnych programów wspomagających tworzenie modelu (ang.: *pre-processing*), wykonanie obliczeń i analizę wyników (ang.: *post-processing*).

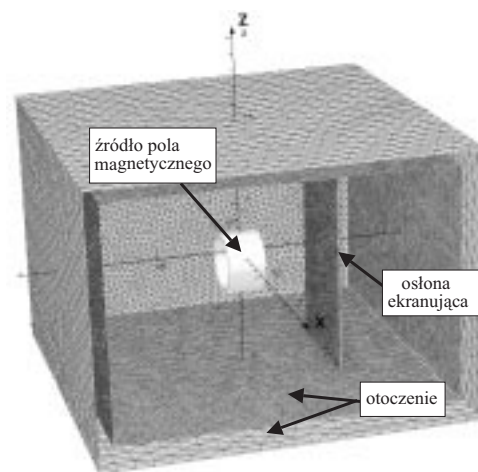
W dalszej części artykułu zostaną przedstawione przykładowe wyniki symulacji numerycznych rozkładu pola magnetycznego 50 Hz w otoczeniu osłon ekranujących wykonanych z różnych materiałów (stal, mosiądz itp.). Wykorzystany pakiet ELEKTRA/OPERA – Vector Fields Ltd. jest przeznaczony do obliczeń przy małych częstotliwościach. Równoległe z symulacjami wykonano serię laboratoryjnych badań doświadczalnych.

### Wyniki pomiarów i symulacji

W prezentowanych przykładowo badaniach i symulacjach numerycznych jako źródło pola magnetycznego, wokół którego wyznaczano rozkład indukcji magnetycznej (rzędu ok.  $1 \div 100 \mu\text{T}$ ) stosowano cewkę wielozwojową. Schemat zastosowanego układu pomiarowego do wyznaczania skuteczności ekranowania przedstawiono na rys. 3., a na rys. 4. geometrię zbudowanego modelu numerycznego z wygenerowaną siatką elementów skończonych rozpatrywanego obszaru. Na rys. 5. prezentowane są wyniki pomiarów i obliczeń rozkładu pola w otoczeniu jego źródła, przy którym ustawiono osłonę ekranującą w postaci blachy aluminiowej. W badaniach laboratoryjnych i symulacjach, oprócz osłon aluminiowych stosowano również blachy miedziane i stalowe o różnych wymiarach, w celu sprawdzenia wpływu właściwości materiałowych oraz geometrii osłon na rozkład pola magnetycznego i skuteczność ekranowa-

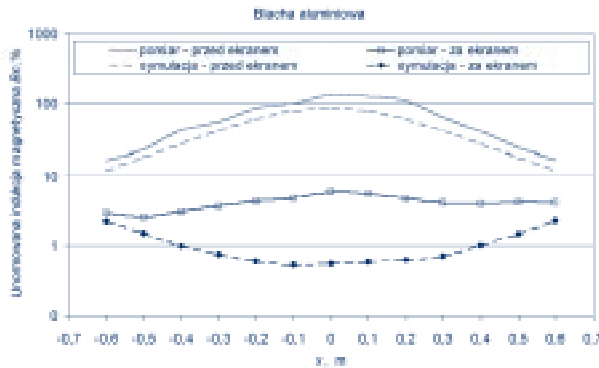


Rys. 3. Schemat układu, w którym mierzono skuteczność ekranowania pola magnetycznego (oś  $z$  – prostopadła do płaszczyzny  $xy$ )

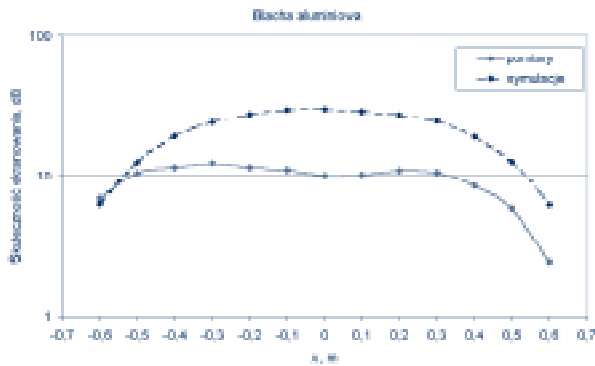


Rys. 4. Model numeryczny układu z rys. 3.

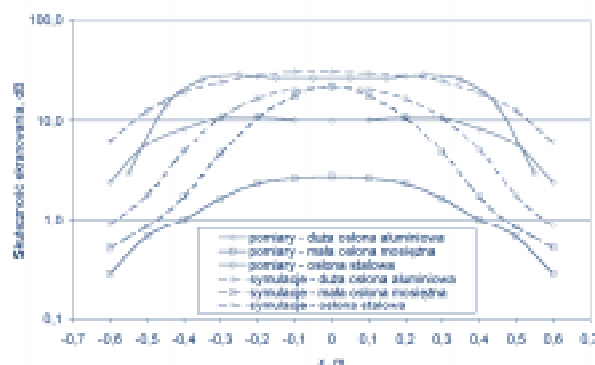
nia. Z uwagi na możliwości obliczeniowe pakietu ELEKTRA/OPERA, w modelu numerycznym stosowano dyskretyzację co 2 cm w odniesieniu do blach i 3 cm do otaczającego je bezpośrednio powietrza. Z tego powodu minimalna grubość modelowanych osłon wynosiła 2 cm. Pomiary laboratoryjne wykonywano w odniesieniu do blach cieńszych, o grubości 2 mm, i dlatego odnotowano niewielkie różnice w wynikach pomiarów i symulacji numerycznych rozkładu pola magnetycznego za ekranem (rys. 5.) oraz mniejszą pomierzoną skuteczność ekranowania niż wynikająca z obliczeń (rys. 6.). Na rozkład pola, oprócz osłon wpływają obiekty metalowe znajdujące się w otoczeniu. Pokazuje to przykładowo niesymetria w przebiegu krzywej obrazującej wyniki pomiarów przedstawione na rys. 6. Jest to efekt ustawienia w czasie pomiarów dużego obiektu stalowego w pobliżu źródła pola magnetycznego, którego nie uwzględniono w czasie symulacji.



Rys. 5. Wyniki pomiarów i symulacji indukcji magnetycznej  $B_n$  w otoczeniu aluminiowej osłony ekranującej (indukcja magnetyczna unormowana względem wartości w środku geometrycznym źródła pola). Układ współrzędnych zgodny ze schematem z rys. 3.



Rys. 6. Skuteczność ekranowania pola magnetycznego przez płytę aluminiową o szerokości 1,25 m. Środek płyty w osi Y układu współrzędnych według rys. 3.



Rys. 7. Skuteczność ekranowania pola magnetycznego przez osłony z różnych materiałów i o różnej wielkości

Zestawienie na rys. 7. wyników pomiarów i badań przy osłonach wykonanych z różnych materiałów i o różnych wymiarach potwierdza, że w przypadku ekranowania słabych pól magnetycznych rodzaj materiału w małym stopniu wpływa na

skuteczność ekranowania. Ferromagnetyki, np. stal, pracują bowiem w takim przypadku na początkowej części charakterystyki magnesowania, zachowują się jak paramagnetyki i w niedużym stopniu skupiają linie sił pola magnetycznego [7].

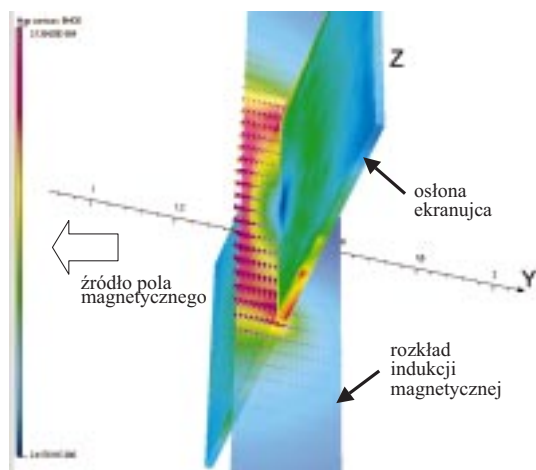
Stąd niewielkie różnice w wynikach pomiarów odpowiadających punktowi za środkiem blachy (dla  $x = 0$ ), (rys. 7.). Istotny wpływ na rozkład pola w otoczeniu osłony oraz skuteczność ekranowania ma grubość i wielkość osłony. Lepsze właściwości ekranujące mają osłony szerszej osłaniające źródło pola, najlepiej pełne, otaczające źródło ze wszystkich stron. Pokazują to wyniki symulacji przedstawione na rys. 8. i 9., na których widoczne jest otaczanie krawędzi ekranu przez pole magnetyczne.

O skuteczności ekranowania decyduje także struktura osłony (rys. 10.). Nieznacznie lepsze efekty uzyskuje się w przypadku osłon wielowarstwowych wykonanych z tych samych materiałów, gdy osłony te przylegają do siebie. W przypadku słabych pól magnetycznych krotność osłabienia pola przez osłonę wielowarstwową jest w przybliżeniu sumą osłabienia przez każdą z warstw.

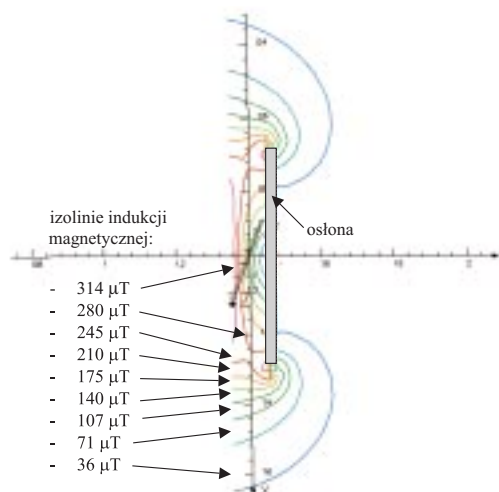
## Podsumowanie

Porównanie wyników obliczeń i pomiarów skuteczności ekranowania wskazuje na wystarczającą zgodność uzyskanych rezultatów. Potwierdza to przydatność symulacji numerycznych jako wygodnego narzędzia do projektowania osłon ekranujących i działań prewencyjnych zmierzających do ograniczania zagrożeń elektromagnetycznych w środowisku pracy. Stosowanie różnego rodzaju właściwie dobranych technicznych środków prewencji (m.in. ekranowania osłaniającego i lokalizującego) jest bardzo efektywną metodą ograniczania zagrożeń, polecaną przez normy i zalecenia międzynarodowe (m.in. PN-EN 12198 [2]).

Aby ekrany spełniały swoją funkcję i były skuteczne, należy dobrać odpowiednie materiały ekranujące i ich geo-



Rys. 8. Indukcja magnetyczna (czerwone strzałki) wyznaczona w płaszczyźnie przechodzącej przez osłonę ekranującą ( $z=0$  w układzie współrzędnych z rys. 3.) – wyniki symulacji



Rys. 9. Izolinie indukcji magnetycznej w płaszczyźnie przechodzącej przez osłonę ekranującą ( $z=0$  w układzie współrzędnych wg rys. 3.) – wyniki symulacji

metrię. Zastosowanie modelowania komputerowego może być przydatne przy prognozowaniu rozkładu pola po zastosowaniu osłon ekranujących. Należy pamiętać, że niewłaściwie dobrane środki techniczne są całkowicie nieskuteczne (np. siatka metalowa ekranująca pole elektryczne nie zmniejsza natężenia pola magnetycznego), a nawet mogą zwiększać zagrożenie (np. szczelina w ekranie elektromagnetycznym może być źródłem stosunkowo silnego pola). W czasie eksploatacji wykonanych już i zamontowanych osłon ekranujących powinno się dokonywać okresowych konserwacji, kontroli szczelności ich konstrukcji oraz pewności połączeń poszczególnych elementów, ponieważ skuteczność osłon istotnie zależy od jakości połączeń elektrycznych i uziemień (szczególnie w przypadku ekranowania pola elektrycznego).

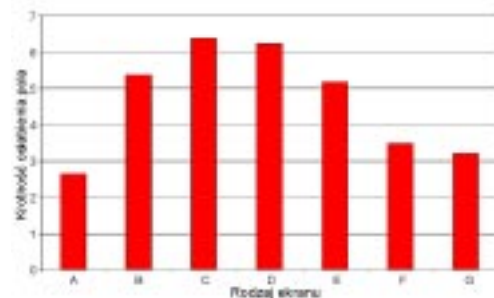
Ograniczenie poziomu pól magnetycznych można także osiągnąć przez zbliżenie do siebie torów szynowych lub kabli z prądami płynącymi w różnych fazach. Na skutek wykorzystania zjawiska samokompensacji pola magnetycznego wytwarzanego przez takie prądy można w ten sposób uzyskać w otoczeniu szyn i kabli kilkukrotne zmniejszenie poziomu ekspozycji. W przypadku niezbyt silnych pól magnetycznych jest to efekt porównywalny, a często nawet korzystniejszy w stosunku do ekranowania niezbyt grubą blachą aluminiową lub stalową. Natomiast koszt takiego rozwiązania jest zde-

cydowanie niższy, a na etapie projektowania i budowy instalacji wręcz nie wymaga nakładów finansowych. W wielu przypadkach może to skutecznie ograniczyć wielkości zagrożeń do niewielkiego obszaru, w którym pracownik nie musi przebywać.

W niektórych przypadkach wystarczające do zapewnienia warunków pracy zgodnych z wymaganiami przepisów jest również zastosowanie jednej z metod organizacyjnych (rotacja zespołu pracowników przy obsłudze źródła pola, odsunięcie pracowników na większą odległość od źródła).

#### PIŚMIENNICTWO

- [1] Gryz K., Karpowicz J. *Pola elektromagnetyczne w środowisku pracy*. CIOP, Warszawa 2000
- [2] PN-EN 12198. *Bezpieczeństwo maszyn – ocena i zmniejszanie ryzyka wynikającego z promieniowania emitowanego przez maszyny*
- [3] Korniewicz H. *Ekranowanie źródeł pól elektromagnetycznych 0,1-300 MHz*. Prace CIOP 120, 1984
- [4] Krawczyk A. *Podstawy elektromagnetyzmu matematycznego*. Polskie Towarzystwo Zastosowań Elektromagnetyzmu. Instytut Naukowo-Badawczy. Wyd. Z.Turek, Warszawa 2001
- [5] Wincenciak S. *Komputerowe metody analizy pola elektromagnetycznego*. WNT, Warszawa 1993



Rys. 10. Tłumienie pola magnetycznego przez osłony o różnej strukturze materiałowej:

- A – pojedyncza blacha aluminiowa, #2mm;
- B – podwójna blacha aluminiowa, 2 x #2mm;
- C – potrójna blacha aluminiowa ze szczeliną powietrzną: 2 x #2mm Al oraz #2cm powietrze oraz #2mm Al;
- D – podwójna blacha aluminiowa plus blacha mosiężna: 2 x #2mm Al oraz #2cm powietrze oraz #2mm mosiądz;
- E – podwójna blacha aluminiowa ze szczeliną powietrzną: #2mm Al oraz #2cm powietrze oraz #2mm Al;
- F – blacha aluminiowa #2mm i mosiężna #2mm ze szczeliną powietrzną #2 cm – blacha aluminiowa od strony źródła pola;
- G – blacha aluminiowa #2mm i mosiężna #2mm ze szczeliną powietrzną #2 cm – blacha mosiężna od strony źródła pola.

[6] Karwat T. *Pola magnetyczne od urządzeń elektroenergetycznych, ograniczenie szkodliwego wpływu na otoczenie*. „Przegląd Elektrotechniczny” R.LXXVII 12, 2002

[7] Rawa H. *Elektryczność i magnetyzm w technice*. Wydawnictwo Naukowe PWN, Warszawa 1994

Opracowano w ramach prac upowszechniających wyniki realizacji projektu celowego zamawianego PCZ-16-21, dofinansowywanego ze środków Komitetu Badań Naukowych oraz Ministerstwa Gospodarki, Pracy i Polityki Społecznej