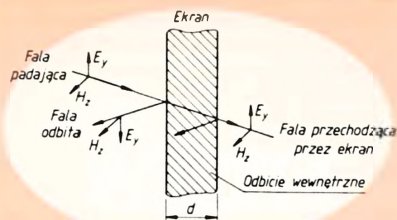


Jednym z ważniejszych problemów wymagających rozwiązania podczas projektowania i wykonawstwa urządzeń elektronicznych jest usunięcie sprzężeń pasożytniczych, które mogą wystąpić między różnymi obwodami urządzenia lub wskutek oddziaływań zewnętrznych. Mogą to być sprzężenia impedancyjne na wspólnych dla różnych obwodów rezystancjach uziemienia i/lub zasilania, albo sprzężenia przez pola elektryczne i magnetyczne.

W celu eliminacji szkodliwego oddziaływania pól lub przynajmniej ich zmniejszenia trzeba czasem zmienić układ urządzenia lub elementy i podzespoły, zmienić schemat montażowy, rozwiązanie konstrukcyjne poszczególnych układów i modułów urządzenia, zastosować inne materiały itd. Jeśli te środki zaradcze okażą się nieskuteczne lub niewystarczające, to należy rozważyć zastosowanie osłon przewodzących (najczęściej metalicznych) nazywanych ekranami. Ekranowanie jest zwykle środkiem bardzo skutecznym. Trzeba jednak mieć na uwadze, że może ono pogorszyć niektóre parametry elektryczne urządzenia lub jego obwodów i spowodować rezonanse elektryczne w zaekranowanych obiektach. Zwiększa ono objętość i masę urządzenia, utrudnia

Rys. 1. Zasada działania ekranu



EKRANOWANIE i ELEMENTY EKRANUJĄCE ⁽¹⁾

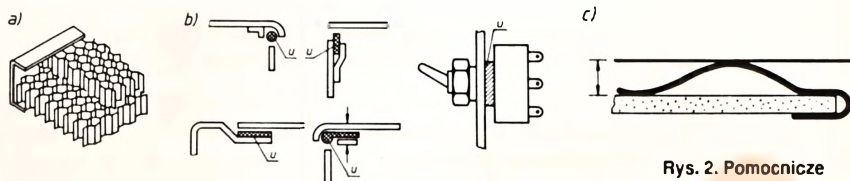
jego obsługę i podnosi ogólne koszty. Mimo tych wad pozytywne skutki wprowadzenia ekranowania są w większości przypadków przeważające, a w wielu współczesnych urządzeniach ekranowanie jest wręcz niemożliwe. Dotyczy to, przykładowo, urządzeń cyfrowych, w których częstotliwości taktowania (zegarowe) wzrosły w ostatnim dwudziestoleciu od kilkunastu do ponad 200 megaherców, jak również urządzeń analogowych, takich jak telefony komórkowe, bezprzewodowe sieci lokalne i przenośne urządzenia przywoławcze (*pagery*), które zaczynają już pracować w zakresie mikrofal. W takich urządzeniach odcinki przewodów, ścieżki przewodzące na płytkach drukowanych, końcówki elementów, złącza oraz inne jeszcze fragmenty obwodów stają się nieintencjonalnymi antenami, promieniującymi energię elektromagnetyczną przy przepływie przez nie prądu.

Rodzaje ekranów i miejsca ich instalowania

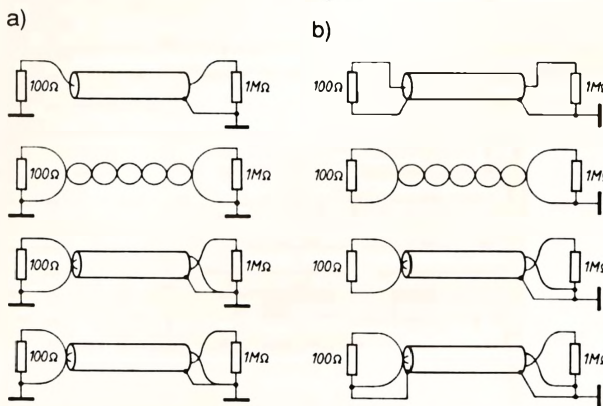
Rozróżnia się ekrany elektrostatyczne, magnetostatyczne i elektromagnetyczne – zależnie od dominującego rodzaju pola, przed którym mają one chronić lub przynajmniej zmniejszać ich wpływ. Głównym celem ekranowania elektrostatycz-

nego jest zmniejszenie pojemności sprzęgających, ustalenie ich wartości i niezależenie od sposobu montażu i obsługi. Te ostatnie zadania powodują konieczność uziemienia ekranu (połączenia go z masą), choć już samo istnienie ciągłej, przewodzącej osłony, przegrody między obwodami lub obudowy urządzenia stanowi barierę dla pola elektrostatycznego. Ekran magnetostatyczny można traktować jako bocznicę magnetyczną, skupiający dużą część pola magnetycznego, a zatem osłabiający to pole poza ekranem. Skuteczność takiego ekranu zależy od właściwości zastosowanego materiału – poprawia się ze zwiększeniem wartości przenikalności magnetycznej ekranu, a także przy powiększeniu jego grubości.

W ekranach elektromagnetycznych następuje indukowanie się prądów wirowych. Wywołane przez nie pola nakładają się na pierwotne pole elektromagnetyczne, obniżając wypadkowe natężenie pola poza ekranem. Skuteczność ekranowania zależy w tym przypadku od przewodności materiału ekranu i stosunku grubości ekranu do głębokości wnikania pola w ekran, związanej z efektem naskórkowości. Dla przykładu można podać, że jednostkowa głębokość wnikania przy częstotliwości 60 Hz wynosi 8,55 mm dla ekranu miedzianego, a 0,86 mm dla stalowego; wielkość ta maleje przy 1 MHz do 0,076



Rys. 2. Pomocnicze elementy ekranujące
a – struktura typu "plaster miodu" do okien wentylacyjnych, b – uszczelki przewodzące – u, c – sprężyny kontaktujące (zwykle z brązu berylowego)



Rys. 3. Nieskuteczne (a) i prawidłowe (b) ekranowanie i uziemianie przewodów i kabli

mm dla miedzi i 0,0076 mm dla stali.

Podstawowy, tzn. elementowy (lub podzespołowy) poziom ekranowania realizuje się przez umieszczenie poszczególnych podzespołów, takich jak dławiki i inne cewki indukcyjne oraz transformatory i małe moduły, np. zasilające, w obudowach (pudełkach) metalowych. Drugi, możliwy do wyróżnienia poziom jest związany z ekranowaniem modułów i bloków funkcjonalnych oraz rozbudowanych układów na płytkach drukowanych. Ekranowanie na tym poziomie polega także na otoczeniu wymienionych obiektów osłonami – metalowymi lub plastikowymi z metalizacją powierzchniową, ale mającymi często odpowiednie wyrowadzenia, przepusty lub standardowe złącza do połączeń w panelu lub kompletnym urządzeniu.

Kolejny poziom ekranowania obejmuje urządzenia lub ich grupy i całe systemy rozmieszczone w panelach, stojakach, szafach itp.

Mechanizm ekranowania i jego skuteczność

Działanie ekranu jest wypadkową pochłaniania (absorpcji) energii padającej fali i jej odbicia od czołowej powierzchni ekranu (rys. 1). Jeżeli oznaczyć przez F_0 natężenia pola elektrycznego, magnetycznego lub elektromagnetycznego w przestrzeni przed ekranem, a przez F_1 natężenie takiego pola poza ekranem, to do określenia skuteczności ekranowania przyjmuje się wyrażenie

$$S \text{ [dB]} = 20 \lg F_0/F_1.$$

Skuteczność tę można wyznaczyć także ze stosunku natężenia pola w tym samym miejscu przestrzeni przed i po zainstalowaniu ekranu. Minimalna, akceptowana w praktyce skuteczność wynosi 30 dB, za dobrą uznaje się 60÷90 dB, a za bardzo dobrą – powyżej 90 dB.

Źródło promieniowania o dużej impedancji wewnętrznej wytwarza w najbliższym sąsiedztwie pole z przewagą składowej elektrycznej E (określanej w V/m), a źródło o małej impedancji wewnętrznej – z przewagą składowej magnetycznej H (określanej w A/m). Stosunek tych składowych, E/H w fali elektromagnetycznej nosi nazwę impedancji falowej Z_0 .

W odległości do ok. 1/6 długości promieniowanej fali od źródła, czyli w tzw. polu bliskim, w polu o przewodze składowej elektrycznej, impedancja falowa maleje wykładniczo a przy przewodzie składowej magnetycznej rośnie wykładniczo. W większej odległości, a więc w polu dalekim, impedancja falowa pozostaje stała na poziomie 377 Ω , co odpowiada impedancji charakterystycznej wolnej przestrzeni.

Powyższe zależności mają wpływ na dobór materiałów i konstrukcji ekranów oraz miejsca ich zainstalowania w stosunku do ekranowanego obiektu.

Materiały stosowane na ekrany

Na ekrany stosuje się zarówno metale niemagnetyczne jak też i materiały ferromagnetyczne. Materiały niemagnetyczne (o współczynniku względnej przenikalności magnetycznej $\mu_w = 1$) działają jak osłony przed polem magnetycznym wskutek występowania w nich prądów wirowych; są zatem nieskuteczne w przypadku pola magnetostaticznego lub zmiennego pola magnetycznego o małej częstotliwości. Dobrze natomiast ekranują przed polem elektrycznym.

Materiały ferromagnetyczne ($\mu_w \gg 1$) doskonale tłumią pole magnetyczne, ale wykonane z nich ekrany mają gorsze właściwości dla pól elektrycznych o małej częstotliwości. Ze wzrostem częstotliwości rośnie efektywność tłumienia zarówno dla pól elektrycznych, jak i magnetycznych.

Materiały na ekrany dostępne są w różnej formie, m.in. jako następujące wyroby:

□ arkusze i taśmy z blachy stalowej i miedzianej, dostosowane do łączenia na śruby lub spawania, w celu wytworzenia obudów ekranujących przed polami lub do konstruowania ekranowanych pomieszczeń (tzw. klatki Faradaya i komory bezodbiciowe);

□ folie z materiałów o dużej przenikalności magnetycznej, cienkie i łatwe do cięcia oraz formowania, przydatne do szybkiego wykonywania modeli laboratoryjnych z osłonami ekranującymi;

□ taśmy lub plecionki metaliczne do ekranowania kabli;

□ metaliczne siatki do dodatkowego ekranowania oddzielnych kabli lub ich wiązek;

□ metaliczne tkaniny, przewodzące przezroczyste folie i przesłony do okien w obudowach urządzeń lub pomieszczeniach;

□ metaliczne struktury typu "plaster miodu", np. do okien wentylacyjnych i jako kominki "plastrowe" (rys. 2);

□ warstwy srebra, niklu lub miedzi natryskiwane lub nanoszone chemicznie na obudowy z tworzyw;

□ materiały połączeniowe lub uszczelniające – metaliczne i z tworzyw zmodyfikowanych domieszkami w postaci proszków metali, włókien metalicznych lub cząsteczek węgla;

□ tkaniny bawełniane łączone z nićmi stalowymi – na odzież chroniącą przed promieniowaniem w.cz.

Materiały na ekrany, uszczelki, połączenia, przepusty itd. mogą mieć specyficzne właściwości. Jako przykład służyć może przewodzący elastomer silikonowy (krzemowy) z wypełniaczem z miedzi platerowanej srebrem, przeznaczony na uszczelki odporne na wilgoć, lub przewodzący fluorek krzemowy z takim samym wypełniaczem, z którego wytłacza się uszczelki odporne na działanie olejów (ogólniej różnych węglowodorów). Inne materiały są z kolei przewidziane do zastosowań tam, gdzie oczekuje się występowania wyższych temperatur, np. aż do 200°C, a jeszcze inne do zastosowań w zakresie mikrofal, np. dla częstotliwości do 12 GHz.

Ekranowanie przewodów i kabli

W nieekranowanych liniach sygnałowych, transmisji danych i pomiarowych oraz w przewodach sieciowych i służących do regulacji i sterowania może się pojawić poprzeczne (przeciwfazowe, różnicowe) napięcie zakłócające, spowodowane przez pole elektryczne, a także napięcie wzdlużne (synfazowe, wspólne) spowodowane obecnością zewnętrznego pola magnetycznego. Ekrany przewodów i kabli wykonane z dobrze przewodzących materiałów (oploty miedziane lub aluminiowe) obniżają te napięcia, ale efekty tego działania zależą od sposobu uziemienia ekranów.

Przy uziemieniu jednostronnym, tzn. przy źródle sygnału lub jego odbiorniku (obciążeniu) zmniejsza się, indukowane polem elektrycznym, napięcie poprzeczne w obwodzie. Natomiast przy uziemieniu dwustronnym tworzy się dodatkowo zamknięty obwód, w którym zmienne pole magnetyczne może indukować przepływ prądu. Przykłady nieprawidłowego (lub nieskutecznego) i prawidłowego uziemienia ekranów kabli przedstawiono na rys. 3. Jeśli tłumienie przy obecności jednego ekranu jest niewystarczające, to stosuje się dwa ekrany zachodzące na siebie i wzajemnie odizolowane. Dwustronnie uziemiony wewnętrzny ekran nie oddziałuje zbyt skutecznie przy małych częstotliwościach zakłóceń, ale jest efektywny przy wielkich częstotliwościach. Odwrotna sytuacja ma miejsce przy jednostronnym uziemieniu wewnętrznego ekranu.

Niezaekranowana para przewodów skręconych (skrętka) zapewnia tylko niewielką ochronę przed przenikaniem zakłóceń od pól elektrycznych, ale daje bardzo dobre zabezpieczenie od pól magnetycznych. Natomiast zaekranowana skrętka ma charakterystyki podobne do charakterystyk kabla podwójnie zaekranowanego, a jest tańsza. Ma jednak większą pojemność niż kabel współosiowy i dlatego jest mniej użyteczna przy dużych częstotliwościach i w obwodach o dużej impedancji.

Większość kabli jest obecnie ekranowana opłotem, a nie ekranem jednolitym, co powoduje malenie skuteczności ekranowania przy większych częstotliwościach. Ogólnie dostępne stają się również kable z ekranem ciągłym z folii aluminiowej. Zapewniają one dobre ekranowanie, choć nie są tak wytrzymałe jak oploty. Przy braku pokrycia powłoką z miedzi lub srebra mogą się na nich tworzyć warstwy tlenkowe, co oczywiście pogarsza kontakty elektryczne.

Przy dołączaniu ekranowanego przewodu do obudowy urządzenia należy zapewnić dobry kontakt elektryczny ekranu na całym jego obwodzie (360°), przy czym nie zaleca się wprowadzania zewnętrznego ekranu do obudowy urządzenia i uziemiania go dopiero tam. Połączenie ekranu do obudowy (lub chassis) urządzenia nie powinno być dłuższe niż kilkanaście centymetrów, aby z powodu pasożytniczej indukcyjności nie zaindukował się w ekranie zakłócający sygnał w.cz., który następnie mógłby być wypromieniowany. ■

Jerzy F. Kołodziejczyk

Ekranujące obudowy urządzeń

Na rysunku 4 przedstawiono przykłady nieprawidłowego i prawidłowego rozwiązania obudowy, ze wskazaniem na niektóre fragmenty konstrukcyjne decydujące o takiej klasyfikacji.

Najlepiej byłoby, gdyby części (ściany) metalowych obudów były łączone galwanicznie, jednak nie zawsze jest to możliwe, np. w szafach montażowych, w których są drzwi lub szuflady, a więc części ruchome. Pociąga to za sobą potrzebę wykonania metalicznych, odpornych na korozję powierzchni kontaktowych, dociskanych równomiernie w wielu punktach. Docisk taki mogą zapewnić sprężyny z brązu berylowego. Części stalowe powinny być na ogół pocynowane, a dla lepszego przewodzenia powierzchni – chromowane. Połączenia elektryczne z otoczeniem należy prowadzić tylko przez specjalnie wykonane uszczelnione przepusty. Odprowadzanie ciepła powinno odbywać się przez otwory z przestonami lub przez fragmenty ścian ukształtowane jak żaluzje.

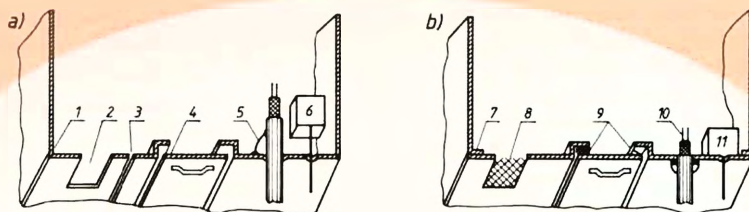
Wiele urządzeń elektronicznych, jak np. komputery, monitory, klawiatury, urządzenia elektromedyczne, urządzenia pomiarowe, telefony itd. ma obecnie obudowy wykonane z tworzyw sztucznych. Aby taka obudowa mogła pełnić jednocześnie funkcję ekranu, powinna zawierać przewodzące metaliczne włókna, albo należy ją powierzchniowo metalizować. Przykładowo, po pokryciu wewnętrznej powierzchni obudowy warstwą aluminiową grubości 2,5 μm , tłumienie zakłóceń emitowanych przez komputer w obudowie z tworzywa wzrasta średnio o około 30 dB (rys. 5).

Nieciągłości w ekranach

Względy konstrukcyjne, technologiczne, estetyczne itd. powodują, że w obudowach lub poszczególnych ekranach występują różnego rodzaju otwory, szczeliny i oddzielone od siebie punkty zgrzewania oraz zainstalowane są różne pomocnicze podzespoły, np. elementy wskaźnikowe lub regulacyjne. Efektem tego są nieciągłości ekranów, umożliwiające wnikanie pola elektromagnetycznego do chronionej przestrzeni i zmieniające rozkład pól i dróg przepływu prądów wirowych w stosunku do stanu pierwotnego (rys. 6).

Jako praktyczną zasadę można przyjąć, że nieciągłość (otwór) umożliwia wnikanie fali elektromagnetycznej wówczas, gdy połowa długości fali jest porównywalna z największym rozmiarem nieciągłości. Do budynku o konstrukcji stalowej, w którym belki rozmie-

EKRANOWANIE I ELEMENTY EKRANUJĄCE (2)



Rys. 4. Przykład niewłaściwego (a) i właściwego (b) rozwiązania konstrukcyjnego obudowy ekranującej

1 – nieszczelne połączenie ścianek, 2 – duży otwór, 3 – szczeliny działające jak anteny, 4 – niepewne kontakty przy drzwiczkach, 5 – kable z ekranami wprowadzone do wnętrza urządzenia, 6 – linie nieekranowane doprowadzone do filtra wewnątrz obudowy, 7 – uszczelki w miejscu połączenia ścianek, 8 – duży otwór zakryty metalową siatką, 9 – drzwi uszczelnione elastomerami lub kontaktującymi sprężynami, 10 – krótkie połączenie ekranu, 11 – filtr zamontowany na ścianie obudowy

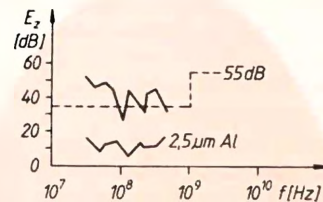
szczone są w odstępach ok. 3,5 m, a więc przy przekątnej – największym rozmiarze nieciągłości – wynoszącej ok. 5 m, stosunkowo łatwo mogą wnikać fale radiowe z zakresu UKF. Natomiast fale z zakresu długofalowego, np. o długości 300 m ($f = 1$ MHz) będą tłumione w stosunku 5:150, czyli 30-krotnie. Aby zapewnić 1000-krotne (60 dB) tłumienie sygnału o spotykanej w układach cyfrowych częstotliwości 100 MHz ($\lambda/2 = 3$ mm), otwór lub szczelina w ekranie nie powinna być większa niż 1,5 mm.

Niekiedy, ze względów technicznych, świadomie stosuje się tylko ekranowanie częściowe. Taka sytuacja ma przykładowo miejsce przy wykonywaniu płytek drukowanych, w których funkcję ekranu pełni nieciągła uziemiona warstwa folii metalowej (rys. 7).

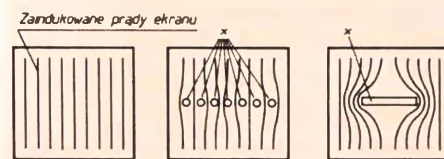
Jerzy F. Kołodziejcki

LITERATURA

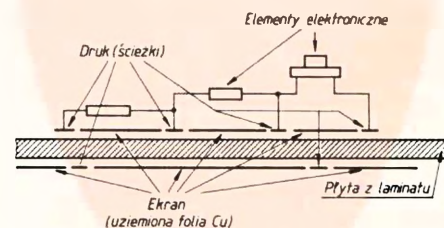
- [1] Habiger E.: Elektromagnetische Verträglichkeit. Hüthig Verlag Heidelberg 1966
- [2] Praca zbiorowa: Zakłócenia w aparaturze elektronicznej. Radioelektronik, Warszawa 1995
- [3] Ott H.W.: Metody redukcji zakłóceń i szumów w układach elektronicznych. WNT, Warszawa 1979
- [4] Ross G.: Shielding methodology: how to meet EMC requirements. Compliance Engineering-European Edition, September/October 1997, 47-52
- [5] Stacewicz T., Kotlicki A.: Elektronika w laboratorium naukowym. PWN, Warszawa 1994



Rys. 5. Pola zakłócające emitowane przez komputer w obudowie bez pokrycia ekranującego I w obudowie pokrytej warstwą aluminium



Rys. 6. Wpływ nieciągłości na rozptył prądów wirowych w ekranie



Rys. 7. Ekranująca warstwa uziemionej folii na płytce drukowanej