OBUDOWY URZĄDZEŃ A KOMPATYBILNOŚĆ ELEKTROMAGNETYCZNA

Obudowy i konstrukcje nośne urządzeń mają na celu zapewnienie właściwego rozmieszczenia elementów i ich wzajemnej współpracy dla realizacji złożonych funkcji elektronicznych. ochronę przed wpływem środowiska (w tym przed czynnikami mechaniczno-klimatycznymi i zaburzeniami elektromagnetycznymi) oraz ochronę operatorów. a także innych obiektow przed niepożądanym oddziaływaniem danego urządzenia. Unifikacja umożliwia budowę większych urządzeń i systemów z mniej złożonych urządzeń i modułów. pochodzących przy tym od rożnych producentów. Podstawową wyodrębnianą jednostką konstrukcyjną jest moduł (inaczej pakiet). reprezentujący obwód funkcjonalny o określonych sygnałach wejściowych i wyjściowych. W technice komputerowej podobną jednostkę konstrukcyjną przyjęto nazywać kartą. Podstawę montażową w module stanowi płytka drukowana jedno-, dwu- lub wielowarstwowa. na której montuje się elementy i podzespoły elektroniczne oraz gniazda i złącza. Powszechnie stosowany jest 19-calowy (ok. 48.24 cm) amerykański system CAMAC z płytkami drukowanymi o wymiarach 200 x 290 mm lub 100 x 160 mm. a także inne systemy. takie jak np. Eurocard. Ustalenia dotyczące wymiarów zawarte są w dwóch międzynarodowych normach: IEC 60 297 opisującej system 19-calowy i IEC 60 917 opisującej system metryczny.

Poszczególne moduły lub ich zespoły instaluje się w kasetach. mających odpowiednie prowadnice oraz elementy ustalające i mocujące. Z kolei kasety mogą być łączone w szufladzie lub na półce. które zaopatruje się na ogół w płytę czołową i gdzie rozmieszcza się również układy zasilania, układy chłodzenia i inne. Dla większych urządzeń stosuje się konstrukcje ramowe: przy dalszej ich rozbudowie. zwłaszcza w pionie – stojaki, a przy złożonym sprzęcie o znacznych rozmiarach w pionie i poziomie – szafy.

Wymagania o charakterze mechanicznym lub związane z możliwymi wpływami czynników klimatycznych wydają się bardziej oczywiste i podlegają wolniejszym modyfikacjom niż te. które wynikają z konieczności zapewnienia odpowiedniej kompatybilności elektromagnetycznej obudów, a szczególnie spełnianych przez nie zadań ekranowania. Dlatego też zagadnienia dotyczące kompatybilności będą szerzej omówione w dalszej części artykułu.

Ochrona przed zaburzeniami elektromagnetycznymi

Skuteczną ochronę przed zaburzeniami, które mogą być doprowadzone do modułu lub urządzenia przez przewody i kable, a więc przed zaburzeniami przewodzonymi, uzyskuje się zwykle za pomocą odpowiednich filtrów. Zapewnić przy tym trzeba właściwą drogę powrotną dla filtrowanych sygnałów. Taką drogę powrotną prądu może stanowić ekran. Chroni on jednocześnie przed niepożądanymi wpływami pól elektrycznych i magnetycznych oraz fal elektromagnetycznych. które mogłyby oddziaływać bezpośrednio na obwody elektryczne, przewody i kable.

Ekranowanie od stałych pól elektrycznych (pól elektrostatycznych) i także od zmiennych pól elektrycznych w zakresie od małych do wielkich częstotliwości jest możliwe przy użyciu zamkniętej obudowy metalicznej o umiarkowanej grubości, rzędu 50÷100 μm.

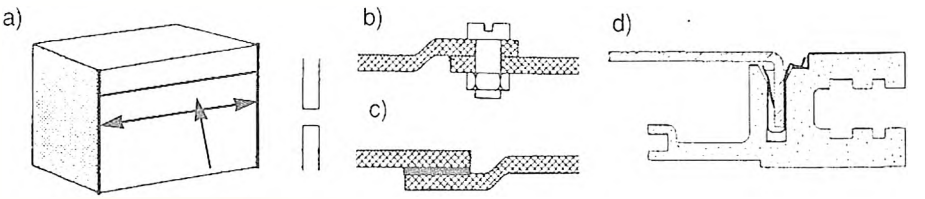
Ekranowanie od stałych pól magnetycznych (pól magnetostatycznych) i od zmiennych pól magnetycznych o małej częstotliwości jest możliwe tylko przy użyciu dość grubej warstwy materiału o dużej przenikalności magnetycznej, takiego np. jak μ-metal (mumetal – stop niklu z miedzią i chromem). Alternatywnie można także zastosować dość cienki ekran ale z dobrze przewodzącego materiału. ponieważ zmienne pole magnetyczne wytwarza w nim prądy wirowe (*eddy currents*), których własne pole magnetyczne jest o przeciwnej orientacji i kompensuje pole zewnętrzne. Efekt ten wyraża się silniej dopiero przy większych częstotliwościach. ale ze względu na porównawczo niewielkie koszty, ekrany np. z aluminium stosuje się dość często do ekranowania transformatorów sieciowych. a więc już przy 50 Hz.

Tłumienie pól elektrycznych, magnetycznych i fal elektromagnetycznych dochodzących do ekranu zachodzi częściowo wskutek odbicia, a częściowo wskutek pochłaniania przenoszonej energii, przy czym udział obu tych zjawisk zależy od rodzaju pola i częstotliwości jego zmian oraz od materiału ekranu. Fala elektromagnetyczna (fala płaska) jest w ekranie tłumiona eksponencjalnie. Odległość od powierzchni wnikania potrzebna do stłumienia pola od wartości początkowej do wartości 1/e (do ok. 37%, tj. o 8.6 dB) jest określona jako głębokość wnikania δ. W zakresie wielkich częstotliwości głębokość wnikania jest bardzo mała. co wynika z wyraźnego występowania efektu naskórkowości (np. dla ekranu z Al przy 30 MHz $\delta = 0.015$ mm).

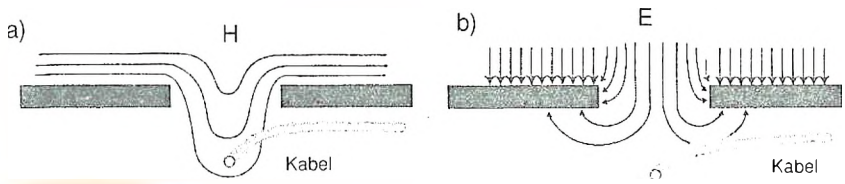
Otwory w obudowach – nieciągłości ekranu

Teoretycznie już przy zastosowaniu stosunkowo cienkiego (poniżej 1 mm) ale ciągłego, tzn. całkowitego ekranu np. z miedzi, można byłoby stosunkowo łatwo uzyskać tłumienie fal elektromagnetycznych na częstotliwościach do 1 GHz o wartości znacznie ponad 100 dB (przy 100 dB stosunek napięć lub prądów wynosi 10^5, a stosunek mocy 10^{10}). Jednakże w praktyce nie jest to możliwe, ze względu na konieczność pozostawienia w obudowach otworów. do np. chłodzenia (przepływu powietrza), wprowadzenia przewodów i kabli, zainstalowania na płycie czołowej urządzenia elementów regulacyjnych i kontrolnych itp. Inne nieciągłości w ekranie, związane np. ze złym kontaktem w miejscu połączenia różnych fragmentów obudowy, działają podobnie jak otwory. obniżając skuteczność ekranowania (rys. 1).

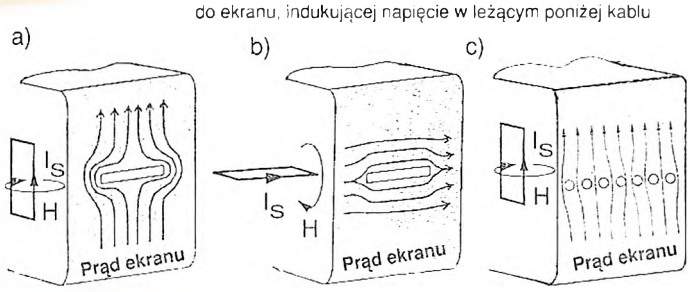
Warto zauważyć, że dla danej konfiguracji otworów w obudowie, w zakresie w.cz mogą. wystąpić rezonanse elektryczne, co sprawia, że dla przepływającego w ekranie zaindukowanego prądu w.cz., otwory stają się antenami nadawczymi niepożądanych sygnałów.



Rys. 1. Szczelina w obudowie (a) i rozwiązania konstrukcyjne "uszczelniające" połączenia b – stale, c,d – zatrzaskowe z wykorzystaniem specjalnie profilowanej blachy



Rys. 2. Wnikanie składowych pola elektromagnetycznego przez otwór w metalowym ekranie
a – magnetycznej, stycznej do ekranu, indukującej prąd w leżącym poniżej kablu, b – elektrycznej, prostopadłej do ekranu, indukującej napięcie w leżącym poniżej kablu



Rys. 3. Wpływ na rozpływ prądów w obudowie (ekranie)
a, b – podłużnej szczeliny, c – rzędu otworów o powierzchni zbliżonej do szczeliny

Na rys. 2 przedstawiono, jak przez otwór w ekranie przenikają pola elektryczne i magnetyczne, powodując indukowanie zakłócających napięć i prądów w kablu znajdującym się poza ekranem poniżej otworu [1]. Pokazane linie sił pola elektrycznego są prostopadłe do metalicznego ekranu z otworem i dochodzą do kabla na pewnym jego odcinku, a linie sił pola magnetycznego są równoległe do tego ekranu i otaczają kabel.

Wąski, długi otwór lub szczelina wykazują większy niepożądany efekt wtedy, gdy prąd płynie w stosunku do nich pod kątem prostym (rys. 3a), niż gdy pętla prądowa jest do nich równoległa (rys. 3b) [4]. Najlepszym rozwiązaniem, uniezależniającym od orientacji pętli prądowej, jest zamiana wąskiej szczeliny na szereg oddzielnych otworów, rozmieszczonych w odległości większej od połowy długości najkrótszej fali odpowiadającej największej częstotliwości sygnału użytecznego (rys. 3c) [3]. Jeżeli odległość otworów a spełnia nierówność $a \leq \lambda/2$, to zmniejszenie skuteczności ekranowania w stosunku do pojedynczego otworu jest proporcjonalne do pierwiastka kwadratowego z liczby otworów: np. matryca 100 otworów o średnicy d równej 3 mm spowoduje zmniejszenie tej skuteczności o 20 dB w stosunku do wartości odpowiadającej pojedynczemu otworowi o tej samej średnicy. W przypadku, gdy długość fali sygnału $\lambda \geq d$ [m], wówczas w odległości 1 metra poza tym otworem skuteczność ekranowania można oszacować jako równą: 1) 20 dB – przy l/d = 1; 2) 40 dB – przy l/d = 2; 3) 60 dB – przy l/d = 5 [1].

Ze stosunkowo dużym zapasem przyjmuje się w praktyce, że średnica (lub najdłuższy wymiar szczeliny o innym kształcie niż kołowy) nie powinna być większa niż ok. $\lambda/30$. Można założyć, że w zakresie częstotliwości do 1 GHz otwór nie powinien być większy niż 1 cm. Ograniczenie to można też odnieść do kuchenek mikrofalowych, pracujących na częstotliwości 2,45 GHz. Podczas ich eksploatacji nie wolno dopuścić do uszkodzenia ekranującego pokrycia okienka wziernikowego, starannie zamykać drzwiczki i dbać, aby ich krawędzie były zawsze czyste, co zapewni dobry kontakt elektryczny z pozostałą częścią obudowy.

W celu uniknięcia osłabiającego wpływu jaki mają na ekranowanie otwory wentylacyjne, stosuje się ich charakterystyczne rozwiązania w postaci tzw. plastrów pszczelich. Trzy przykładowe rozwiązania użyteczne dla częstotliwości do 1, 10 i 35 GHz przedstawiono na rys. 4 [2].

Wprowadzanie przewodów i kabli do ekranujących obudów

Właściwe rozwiązanie tego zadania ma bardzo istotne znaczenie dla sumarycznej skuteczności ekranowania spełnianego przez obudowę. Zastosowanie bowiem wyłącznie nie ekranowanych przewodów lub przewodów i kabli bez filtrów może zniweczyć pozytywne skutki wprowadzenia innych środków związanych z ekranowaniem. Zwyczajne przewody i kable działają jak anteny nadawcze i odbiorcze, wyprowadzając z obudowy i wprowadzając do niej niepożądane sygnały zakłócające pracę obwodów elektrycznych. Stosując ekranowane przewody i kable należy zadbać o dobre połączenia tych ekranów z obudową, obejmujące cały obwód przewodu lub kabla aż do miejsca ich wprowadzenia do obudowy (rys. 5). Zaleca się przykręcanie kabli i przewodów albo stosowanie połączeń zaciskowych.

Jeśli przewody i kable nie są ekranowane, to wówczas we wtykach lub gniazdach związanych z tymi przewodami i kablami należy stosować odpowiednie filtry dolnoprzepustowe, przy czym samo połączenie filtru z obudową powinno mieć małą rezystancję i małą indukcyjność. W handlu dostępne są wtyki i gniazda z filtrami do przewodów zasilających, spełniające normy IEC i Unii Europejskiej. Podobnie, zintegrowane filtry są dostępne w subminiaturowych złączach (D-Sub), stosowanych do kabli dla transmisji danych.

W przypadku dużej liczby końcówek dochodzących do danego urządzenia, można je wprowadzić przez wydzielony blok końcówek, wyposażony w filtry, poza którymi znajduje się dopiero ekranowana część obwodu elektrycznego urządzenia.

Uszczelki i taśmy kontaktowe

Uszczelki i taśmy kontaktowe należy traktować jako pomocniczy środek techniczny umożliwiający poprawę skuteczności ekranowania, zwłaszcza wtedy, gdy mamy do czynienia z połączeniami rozłączalnymi lub ruchomymi fragmentami obudów. Ze względu na omówione wcześniej ograniczenia dopuszczalnych rozmiarów nieciągłości, związane z długością fal elektromagnetycznych, uszczelki i taśmy są zwłaszcza użyteczne przy ekranowaniu od sygnałów w.cz. Wytwarza się wiele odmian elementów uszczelniających na bazie różnych materiałów i o różnych kształtach. Przykładowo są to:

- płytki, pręty, sznury, rurki itp., wytwarzane z elastomerów krzemo-kauczukowych (kauczuk silikonowy) z wypełniaczami przewodzącymi, którymi mogą być np. cząsteczki węgla, niklu, srebra, platerowana srebrem miedź lub posrebrzany proszek aluminiowy;
- tkaniny metaliczne z rdzeniem z elastomerów lub bez rdzenia;
- siatki druciane impregnowane elastomerem;
- kontaktujące zespoły sprężynowe z brązu berylowego (stop berylu z miedzią);
- przewodzące smary i kleje.

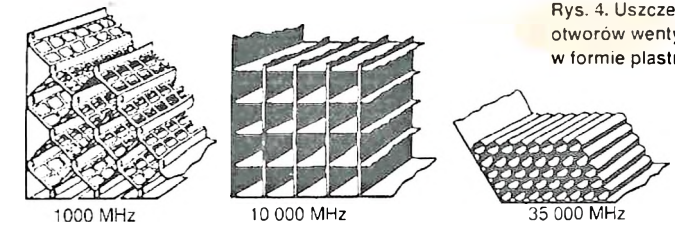
Uszczelki odporne dodatkowo na wilgoć wytwarza się z przewodzącego elastomeru krzemowego z wypełniaczem z miedzi platerowanej srebrem, a uszczelki odporne na działanie olejów i innych węglowodorów – z przewodzącego fluorku krzemowego z takim samym wypełniaczem. Dostępne są również materiały na uszczelki w miejscach, gdzie oczekuje się występowania stosunkowo wysokich temperatur, np. aż do 200°C.

Dobierając uszczelki należy wziąć pod uwagę jakie miejsce w szeregu elektrochemicznym zajmuje materiał obudowy lub jej pokrycia i materiał uszczelki; aby uniknąć przemieszczania się jonów powinny to być materiały umiejscowione blisko siebie w tym szeregu, a najlepiej z tej samej grupy.

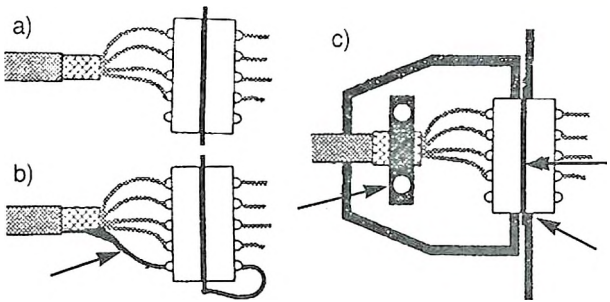
Przewodzące pokrycia obudów z tworzywa

Ze względu na estetykę wykonania, masę i koszty – dla wielu wyrobów elektronicznych opracowuje się obudowy z tworzyw sztucznych. Aby mogły więc one stanowić skuteczny ekran elektromagnetyczny, muszą być pokryte z jednej lub z obu stron przewodzącym pokryciem metalicznym, gdyż tworzywo kompozytowe z przewodzącym wypełniaczem nie jest zbyt dobrym materiałem ekranującym.

Można wyróżnić kilka metod nanoszenia przewodzących pokryć, m.in.: malowanie (nikiel,



Rys. 4. Uszczelnienie elektromagnetyczne otworów wentylacyjnych w formie plastrów pszczelich



Rys. 5.
Wprowadzenie kabla do obudowy
a – bez ekranowania końcówek,
b – z dołączeniem ekranu kabla w formie tzw. świńskiego ogonka,
c – z dodatkową osłoną końcówek kabli połączoną z obudową;
rozwiązania
a) i b) są niewłaściwe

miedź), pokrywanie natryskowe (cynk), pokrywanie galwaniczne (miedź, nikiel) i metalizacja próżniowa (aluminium). Im większa jest rezystywność pokrycia, tym gorsza jest jego skuteczność jako elementu ekranującego. Stąd też przewodzące lakiery, o rezystywności ok. 1 Ω/kwadrat, stanowią ekran o gorszych właściwościach niż inne typy metalizacji, umożliwiające uzyskanie rezystywności nawet poniżej 0,1 Ω/kwadrat.

Należy mieć na uwadze, że cienkie pokrycia nie stanowią dobrej ochrony przed polami magnetycznymi. Aby otrzymać grubsze, jednorodne i ciągłe pokrycia, poza doborem właściwej metody ich nanoszenia należy również zapewnić odpowiednie kształty geometryczne obudowy, która nie powinna mieć ostrych załamań i wgłębień. Ponadto pokrycie musi być chronione od zadrapań i pęknięć.

Wnioski

Zadowalające spełnienie przez obudowy wszystkich oczekiwanych od nich funkcji wymaga zgromadzenia odpowiednich doświadczeń przez projektantów i producentów takich obudów. Stąd też wytwórcy modułów (pakietów), urządzeń i systemów elektronicznych korzystają najczęściej z gotowych obudów kupowanych w wyspecjalizowanych firmach. Wytwarzane przez nie wyroby, takie jak szafy, stojaki, półki, ramki, chassis, obudowy i związane z nimi akcesoria mają dostatecznie uniwersalny charakter i zapewniają w ramach przyjętego standardu daleko idące możliwości zaspokojenia indywidualnych potrzeb, w tym szerokiego asortymentu wymiarów. Są także specjalizowane serie wyrobów, np. dla central telefonicznych lub urządzeń zasilających. Najczęściej stosowanym materiałem jest wytłaczane i odlewane pod ciśnieniem aluminium oraz blacha stalowa, ewentualnie platerowana cynkiem. Można wymienić kilka firm znanych na rynku europejskim, jak np. niemieckie ELMA Electronic AG, Schroff GmbH, Rittal-Werk, Fischer Elektronik, Knürr AG itd., przy czym m.in. firma Schroff ma swoje przedstawicielstwo w Polsce.

J.F. Kołodziejski

LITERATURA
[1] D.Björklöf: Shielding for EMC.Compliance Engineering vol. XVI, No. 4, 63-69
[2] V.Haag: EMV-gerechtes Gehausedesign. Berlin. Offenbach VDE-VERLAG 1998
[3] Praca zbiorowa: Zakłócenia w aparaturze elektronicznej. Radioelektronik Sp. z o.o., Warszawa 1995
[4]T. Williams: EMC for product designers. Butterworth-Heinemann Newnes. Oxford 1996
[5] Schroff(R): Catalogue for Electronics Enclosures 1999/2000