

# Projektowanie płytek obwodów drukowanych zgodnie z wymaganiami EMC i ESD (3)



*Poprzednie artykuły z tego cyklu zawierały przede wszystkim wskazówki dotyczące zminimalizowania negatywnego wpływu zewnętrznego środowiska elektromagnetycznego na projektowany system oraz wytłumienia promieniowania elektromagnetycznego, powstającego w obrębie naszego projektu poprzez odpowiednie wykonanie mozaiki połączeń na powierzchni laminatu. W tym artykule zaprezentuję, w jaki sposób należy podejść do wykonania portów wejścia/wyjścia tworzonego urządzenia oraz na co zwrócić uwagę podczas ekranowania. Ostatnią część artykułu poświęcę wskazówkami dotyczącym zwiększenia odporności systemu na wyładowania elektrostatyczne (ESD).*

Wiele urządzeń elektronicznych nie wymaga do poprawnego działania wymiany sygnałów ze światem zewnętrznym. Jeżeli jednak taka konieczność zachodzi wybór medium odbywa się pomiędzy łączami bezprzewodowymi, światłowodowymi oraz tradycyjnymi przewodowymi. Każdy z wymienionych typów łączności ma szereg wad i zalet. Ważne jest rozważenie, które właściwości dla projektowanego systemu są pożądane, a które dyskwalifikujące.

## Złącza i okablowanie

Skupimy się na łączności przewodowej. Charakteryzuje się ona niskim kosztem implementacji oraz prostotą wykonania. Nie jest konieczne stosowanie specjalnych przetworników, a elementy potrzebne do wykonania interfejsu przewodowego są szeroko dostępne. Wadami komunikacji przewodowej są:

- Wrażliwość na zaburzenia elektromagnetyczne oraz generowanie promieniowania elektromagnetycznego.
- Możliwość nieuprawnionego odtworzenia przesyłanej informacji na podstawie analizy pola elektromagnetycznego wytworzonego wokół przewodu.
- Podatność kabli na korozję i czynniki środowiskowe.
- Konieczność wykonania okablowania pomiędzy urządzeniami, nierzadko składającego się z wielu dziesiątek lub nawet setek żył.

Ze względu na bogactwo typów złączy dostępnych na rynku oraz z uwagi na podo-

bieństwo zjawisk elektromagnetycznych, które będą w nich będą zachodziły, sposób rozmieszczenia linii sygnałowych będę opisywał tylko na podstawie typowego konektora jednorzędowego.

Przy projektowaniu złącza, podobnie jak ścieżek znajdujących się w obrębie płytki obwodów drukowanych, ważne jest określenie typów sygnałów, które będą nimi przesyłane. Należy zwrócić uwagę na spodziewane wartości natężenia przepływającego prądu, typ przebiegu (prostokątny, sinusoidalny, itd.), jego częstotliwość, czasy narostu i opadania zboczy sygnałowych. Dla magistral cyfrowych, warto określić aktywność poszczególnych linii. Pisząc „aktywność” mam na myśli częstość zmian poziomu logicznego sygnału. Im częściej jest zmieniany poziom logiczny, tym aktywność takiej linii jest wyższa. Na podstawie tych kryteriów można łatwo określić poziom generowanego szumu przez poszczególne linie interfejsu. Za połączenia wrażliwe na szum elektromagnetyczny są uważane te, którymi są prowadzone sygnały analogowe.

Po wykonaniu analizy właściwości transmitowanych sygnałów można będzie określić ile dodatkowych wyprowadzeń masy będziemy musieli wprowadzić do złącza oraz jak w jego obrębie porozmieszczać. W wypadku aplikacji generujących spory szum lub wrażliwych na niego warto rozważyć możliwość użycia okablowania ekranowanego. Istotnym minusem będzie tutaj oczywiście wzrost kosztów wykonania urządzenia.

Pierwszym krokiem do właściwego uporządkowania sygnałów jest określenie przynależności każdego z nich do jednej z następujących grup:

- sygnały wrażliwe (najczęściej analogowe),
- sygnały szczególnie wrażliwe (jeżeli występują),
- sygnały wysokoszumne (najczęściej cyfrowe),
- sygnały szczególnie szumiące (jeżeli występują).

Najlepiej, aby sygnały wrażliwe oraz szumiące nie znajdowały się w obrębie jednego złącza, a jeżeli już tak musi być, to te grupy powinny znajdować się jak najdalej od siebie i być odseparowane liniami masy. Generalnie nie jest wskazane mieszanie obu tych typów ze sobą w obszarze jednego złącza. Dobrą praktyką jest dołączenie skrajnych wyprowadzeń do masy w celu stworzenia swoistego ekranu dla pozostałych linii. Kolejnymi (w kierunku centrum złącza) mogą być przesyłane sygnały z grupy wysokoszumnych lub wrażliwych (nie należy mieszać tych grup!). Im sygnał będzie bardziej wrażliwy/szumiący, tym bliżej środka powinien się znajdować. Jeżeli w poprzednim etapie wyróżniona została grupa wyjątkowo krytyczna, to musi się ona znaleźć w centrum złącza, otoczona z obu stron dodatkowymi liniami masy. Na rysunku 1 pokazano przykładowe złącze 1-rzędowe.

W sąsiedztwie jednego doprowadzenia masy powinno znajdować się co najwyżej osiem wyprowadzeń sygnałowych. Wraz ze wzrostem mocy generowanych zaburzeń przez sygnały biegnące w poszczególnych przewodach, dodatkowe wyprowadzenia masy powinny występować częściej. Przy projektowaniu magistrali cyfrowej dobrze jest w bezpośrednim sąsiedztwie masy umieścić sygnał najbardziej aktywny. Zazwyczaj jest to sygnał zegarowy bądź linia przenosząca stan najmłodszego bitu.

Rozważając budowę interfejsu przewodowego, należy bacznie przyjrzeć się kwestii odległości, na jaką ma być przesyłany sygnał. Wraz ze wzrostem długości przewodu następuje większa degradacja przesyłanej nim infor-

macji. Dzieje się to na skutek rosnących pojemności i rezystancji przewodu oraz zwiększonej zdolności do emitowania i zbierania energii elektromagnetycznej. W celu zachowania dostatecznych parametrów sygnału docierającego do odbiornika należy wraz ze wzrostem dystansu transmisji:

- Obniżyć jego częstotliwość.
- Zwiększyć zakres zmian napięcia reprezentującego informację.
- W miarę możliwości przysyłać sygnały zmieniające się dyskretnie (np. zmieniające się zero-jedynkowo). Jest wtedy o wiele łatwiej wydobyć poprawną informację nawet z mocno zdegradowanego sygnału, ponieważ jest ona kodowana przez określony zakres napięć (a nie tylko przez jedną konkretną wartość, jak ma to miejsce przy zmianach ciągłych). Przykładowo, w standardzie TTL każda wartość napięcia pomiędzy 2,4 V a 5 V jest traktowana jako poziom logiczny wysoki, natomiast zakres od 0 V do 0,8 V jako poziom logiczny niski.
- Zamiast przesyłania sygnału danych za pomocą jednego przewodu dobrze jest użyć skrętki i przesyłać nią informację w postaci sygnału różnicowego. Z jednej strony, pola magnetyczne wytworzone wokół kabli tworzących skrętkę będą się znosiły z powodu przeciwnego kierunku, natomiast z drugiej, po odjęciu od siebie sygnałów z obydwu żył okaże się, że różnica (sygnał użyteczny) została wzmocniona, natomiast część wspólna (zaburzenia) wyeliminowana.
- Dla bardzo dużych odległości należy rozważyć zastosowanie regeneratora sygnału.

Oprócz poradzenia sobie z problemem zapewnienia odpowiedniego stosunku sygnału użytecznego do szumu w sygnale docierającym do odbiornika, przed konstruktorem stoi jeszcze jedno poważne zadanie: dodanie przewodów do urządzenia (nieważne czy będzie spełniało rolę nadajnika czy odbiornika) wiąże się również z możliwością zwiększenia poziomu zaburzeń, jakie będą docierały do urządzenia. Przy nieumiejętnym rozmieszczeniu okablowania (np. prowadząc przewody przez duże otwory w ekranie) nawet ekranowanie obejmujące całe urządzenie nie będzie w stanie skutecznie zatrzymać niepożądanego promieniowania elektromagnetycznego przedostającego się z i do systemu. Rozmieszczając przewody wewnątrz obwody systemu oraz poza nią należy pamiętać o:

- Utrzymaniu ich we względny porządku. Przypadkowo wiszące przewody mogą utworzyć antenę (najczęściej pętlową bądź dipolową), która pogorszy parametry urządzenia pod względem kompatybilności elektromagnetycznej.
- Przewody, którymi przesyłane są dane cyfrowe bądź płyną nimi prądy o dużym natężeniu należy trzymać z dala od kabli

wiodących sygnały analogowe wrażliwe na zaburzenia.

- Nieprowadzeniu przewodów w pobliżu elementów i urządzeń generujących pole elektromagnetyczne o znacznym natężeniu. Mowa tutaj przede wszystkim o różnego rodzaju układach cyfrowych, rezonatorach, silnikach elektrycznych, transformatorach, itd.
- Nieumieszczaniu okablowania w sąsiedztwie otworów, szczelin wykonanych w materiałach przewodzących, ponieważ będą one działały jak anteny szczelinowe.
- Nieprowadzeniu krytycznego sygnału żyłą znajdującą się na zewnątrz wiązki kablowej nawet, gdy jest ona ekranowana.
- Unikaniu układania przewodów w pobliżu materiałów przewodzących o niezdefiniowanym potencjale. Takie obiekty mają skłonność do odbijania oraz magazynowania energii promieniowania elektromagnetycznego.
- Zadbaniu o to, aby przewody nie były zagięte pod zbyt dużym kątem.
- Użyciu kabla koncentrycznego do prowadzenia sygnałów o częstotliwości wyższej niż 10 MHz oraz w aplikacjach, w których jest istotne dopasowanie impedancji w szerokim zakresie częstotliwości.

Jak już pisałem w pierwszym artykule, najlepszą drugą do zabezpieczenia się przed zaburzeniami elektromagnetycznymi jest eliminowanie ich potencjalnych źródeł. Jeżeli usunięcie przyczyny jest niemożliwe, np. znajduje się poza zasięgiem konstruktora, to należy podjąć próby ochrony systemu tak blisko niej, jak to tylko możliwe. Wyposażając projektowany system w okablowanie, konstruktor ma możliwość eliminowania zaburzeń już na etapie tworzenia okablowania. Jest to realizowanie poprzez użycie kabli ekranowanych, skrętek, koralików ferrytowych. Dobór zabezpieczenia zależy przede wszystkim od jego kosztów oraz stopnia ochrony, który jest wymagany przez założenia projektowe.

## Ekranowanie

Zdarza się, że projektowane urządzenie musi poprawnie pracować w silnie zaszumionym środowisku elektromagnetycznym i że źródła tego szumu znajdują się poza zasięgiem konstruktora. Skoro nie można ich usunąć, to trzeba skutecznie chronić zaprojektowane urządzenie przed ich niekorzystnym wpływem. Najlepszym rozwiązaniem jest otoczenie całego urządzenia kompletnym ekranem elektromagnetycznym. Idealny ekran jest wykonany z idealnego przewodnika (rezystancja między dwoma dowolnymi punktami takiego przewodnika zawsze wynosi 0 omów).

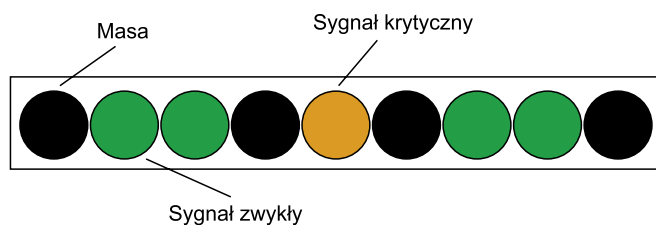
Jak taki ekran działa? Na początek przyjrzyjmy się promieniowaniu elektromagnetycznemu. Składa się ono ze sprzężonych ze sobą pól: elektrycznego i magnetycznego. Pole elektryczne powoduje powstanie w obrębie przewodnika ruchu ładunków elektrycznych. Prąd wyindukowany w idealnym przewodniku, na skutek przyłożonego zewnętrznego pola elektrycznego, spowoduje powstanie wewnątrz tego przewodnika pola elektrycznego, wewnętrznego. Oba te pola będą się wzajemnie znosiły, ponieważ będą miały przeciwne zwroty. Na skutek tego, wypadkowe pole elektryczne wewnątrz przewodnika będzie wynosiło zero.

Zmienne pole magnetyczne (o częstotliwości wyższej niż 100 kHz) powoduje powstanie prądów wirowych w przewodniku. Wytworzone przez nie pole magnetyczne będzie znosiło przyłożone zmienne pole magnetyczne, również dzięki przeciwnym zwrotom.

Zarówno pole elektryczne jak i magnetyczne będą „odbijane” od powierzchni ekranu idealnego. Niestety coś takiego jak przewodnik idealny nie istnieje. Niemożliwe będzie również znalezienie ekranu idealnego. Parametry ekranu rzeczywistego będą gorsze z powodu:

- Rezystancji przewodnika rzeczywistego. Ta rezystancja ograniczy natężenie wyindukowanego w przewodniku prądu. Prąd o niższym natężeniu z kolei wytworzy słabsze pole elektryczne wewnątrz przewodnika.
- Otworów wykonanych w ekranie. Każda nieciągłość w strukturze przewodnika zaburzy przepływ wyindukowanego prądu. Jak powszechnie wiadomo, prąd będzie płynął ścieżką o najniższej impedancji, czyli opłynie otwór w przewodniku. Brak przepływu ładunku elektrycznego w tym miejscu objawi się brakiem wewnętrznego pola elektrycznego, które znosiłoby to zewnętrzne. Tym samym w tym miejscu zostanie osłabiona ochrona przed zewnętrznym polem elektromagnetycznym.

Jeżeli urządzenie miało być chronione przed działaniem stałego pola magnetycznego (bądź zmiennego o częstotliwości niższej niż 100 kHz), należałoby je wyposażać w dodatkowy ekran wykonany z materiału cechującego się wysoką przenikalnością magnetyczną (np. z materiału ferromagnetycznego). Jego sposób działania będzie nieco inny, niż ekranu typowego dla ochrony przed falami radiowymi (RF). Mianowicie, będzie on tworzył wewnątrz siebie ścieżkę, która będą biegły linie pola magnetycznego omijając urządzenie otoczone ekranem magnetycznym. Skuteczność ekranowania



Rysunek 1. Widok przykładowego złącza jednorzędowego

wania zależy od przenikalności magnetycznej zastosowanego materiału. Efektywność spada zarówno w przypadku obecności bardzo słabego pola magnetycznego, jak i bardzo silnego. Jest związane ze zjawiskiem nasycania się materiału. Z tego powodu efektywne ekrany wolnozmiennego pola magnetycznego wykonywane są z kilku warstw materiałów o różnych wartościach przenikalności magnetycznej. W tym przypadku możliwe jest również użycie ekranów aktywnych (wyżej opisane ekrany są pasywne). W odróżnieniu od pasywnych, wytwarzają własne pole magnetyczne, które eliminuje to pochodzące ze środowiska zewnętrznego. Przykładami takich urządzeń są elektromagnesy, selenoidy, cewki Hekmholtza.

Bardzo ciekawym rozwiązaniem jest wykorzystanie efektu Meissnera, jednak ze względu na konieczność wykorzystania nadprzewodnika, czy też ciekłego azotu do jego chłodzenia, piszę o tym tylko jako o ciekawostce.

W tym podrozdziale przez cały czas pisałem tylko o konieczności ekranowania projektowanego systemu przed niekorzystnym wpływem zewnętrznego promieniowania elektromagnetycznego. Ekrany elektromagnetyczne są również wykorzystywane w celu ochrony zewnętrznego środowiska elektromagnetycznego przed szkodliwą działalnością projektowanego urządzenia.

Ekranowanie może zarówno obejmować cały system, jak i być ograniczone tylko do krytycznego podsystemu (podział projektu na grupy funkcjonalne znacznie uprości jego zidentyfikowanie oraz określenie poziomu koniecznych zabezpieczeń). Niezależnie od tego, jaka część urządzenia będzie objęta ekranem, to musi być on szczelny. Szczelny, w tym przypadku nie znaczy tylko, że użyty blok metalu nie ma żadnych otworów czy szczelin. Oznacza to, że każda linia wchodząca bądź opuszczająca chronioną strefę, musi być filtrowana. Jeżeli zostanie to zaniedbane, to okaże się, że w tym miejscu pole elektromagnetyczne znacznie „przeciekać”. Istnieje oczywiście możliwość (przy zachowaniu pewnych reguł) wykonania ekranu półotwartego. Jego użycie może być podyktowane koniecznością zapewnienia swobodnej cyrkulacji powietrza. W każdym razie, trzeba mieć na uwadze trzeba mieć, że będzie on mniej efektywny od całkowicie szczelnego „kuchnia”. Żeby spełniał on swoje zadanie należy dopilnować, aby szczeliny i otwory były sporo mniejsze od długości najkrótszej z fal, przed którymi ma chronić. Często przyjmuje się, że szczelina powinna mieć wymiary mniejsze niż 1/10 długości najkrótszej fali, natomiast średnica otworów nie powinna być większa niż 1/100 długości najkrótszej fali.

W typowo hobbyistycznych projektach zazwyczaj do skutecznego ekranowania systemu nie jest potrzebna metalowa obudowa (która nawiasem mówiąc jest sporo droższa od zwykłej, plastikowej). Jeżeli jest potrzebna ochrona przed promieniowaniem elektromagnetycznym

o częstotliwości nieprzekraczającej 30 MHz, to będzie wystarczająca zwykła warstwa przewodząca pokrywająca wewnętrzną część obudowy plastikowej.

Typ ekranu wybrany, co dalej? Należy go odpowiednio dołączyć do zaprojektowanej płytki PCB. Jak już pisałem, nie można pozostawiać elementów przewodzących bez zdefiniowanego potencjału. Aby ekran poprawnie spełniał swoją rolę musi być dołączony za pomocą niskiimpedancyjnych połączeń z masą systemu. Najlepiej, aby odbyło się to w strefie portów I/O. Efektywność ekranowania zostanie podniesiona przez zapewnienie jak największej liczby połączeń z masą systemu. Osłabiona zostanie w ten sposób skłonność do oddziaływania z pobliskimi obiektami.

### Zabezpieczenie systemu przed ESD

Obecnie bardzo popularne przyrządy półprzewodnikowe są bardzo wrażliwe na wyładowania elektrostatyczne. Owe wyładowania powstają w wyniku utworzenia się dużej różnicy potencjałów między dwoma punktami w wyniku nagromadzenia się ładunku elektrostatycznego. Napięcie wyładowania elektrostatycznego wynosi nawet kilkanaście kilowoltów. Jest ono wystarczające do zniszczenia wrażliwych układów scalonych. Tak duże napięcie powoduje oczywiście również przepływ prądu o odpowiednio wysokim natężeniu, które, nawiasem mówiąc, można łatwo obliczyć korzystając z prawa Ohma. To w połączeniu z bardzo krótkim czasem wystąpienia zjawiska, które jest widziane w dziedzinie częstotliwości jako zespół sygnałów sinusoidalnych o bardzo dużej częstotliwości, jest powodem powstania silnego pola magnetycznego. Owe pole powoduje wyindukowanie się prądu w sąsiadujących z miejscem wyładowania elementach przewodzących. Skutki zdarzenia ESD nie są więc ograniczone tylko do miejsca jego występowania, ale również będą widoczne w jego sąsiedztwie.

Wyładowanie elektrostatyczne może spowodować:

- Uszkodzenie bądź zniszczenie układu scalonego lub innego elementu półprzewodnikowego.
- Wyindukowanie się szumu w sygnale przepływającym w sąsiedztwie.
- Różnicę potencjału masy w różnych punktach systemu i doprowadzić do niepoprawnej pracy urządzenia;
- Różnicę potencjału pomiędzy różnymi częściami ekranu elektromagnetycznego. Spowoduje to obniżenie jego skuteczności.
- Modyfikację wartości zapisanych w rejestrach i pamięciach układów cyfrowych.

Udopornienie systemu na zdarzenia ESD realizuje się na drodze sprzętowej i programowej. Rozwiązania sprzętowe skupiają się na obniżeniu (w jak najkrótszym czasie) do bezpiecznego poziomu pików napięciowych i prądowych i odprowadzeniu nadmiarowego

ładunku do masy. Na tym poziomie jest realizowana ochrona przed fizycznym uszkodzeniem zarówno składowych, jak i całości systemu elektronicznego. W celu efektywnego opracowania ochrony sprzętowej przed ESD, trzeba ustalić potencjalne miejsca wystąpienia tego zjawiska. To zadanie może wydawać się trudne do wykonania, jednak jest zgoła inaczej.

Najczęstszym powodem powstania wyładowania elektrostatycznego w systemie elektronicznym jest kontakt jego składowych z użytkownikiem. Podczas codziennych czynności na powierzchni ciała ludzkiego mogą gromadzić się ogromne ilości ładunków elektrostatycznych. Każdemu chyba zdarzyło się, że został „kopnięty” np. przez klamkę. Wyobraźmy sobie, że zamiast wspomnianej klamki, w zasięgu naładowanego palca znajdzie się płytka obwodów drukowanych. Katastrofa gotowa! Niestety, ale najczęściej po takim kontakcie urządzenie elektroniczne nadaje się co najwyżej do naprawy. Wniosek nasuwa się jeden – należy chronić wrażliwe części systemu przed bezpośrednim kontaktem z użytkownikiem. Oznacza to ni mniej, ni więcej tyle, że trzeba umieścić wykonaną z wielkim pietyzmem płytkę PCB w zamkniętej obudowie. W takim wypadku strefa podwyższonego zagrożenia wyładowaniami ESD zostanie ograniczona do portów I/O.

Na **rysunku 2** pokazano przykładowy obwód zabezpieczający system elektroniczny przed wyładowaniem elektrostatycznym. W celu stłumienia impulsów spowodowanych wyładowaniem elektrostatycznym stosuje się:

- Cewki. Jako że dla sygnałów wysokoczęstotliwościowych są one widoczne jako elementy o bardzo dużej impedancji, natomiast dla niskoczęstotliwościowych jako zwarcie, to należy włączać je szeregowo do linii zagrożonej wystąpieniem zdarzenia ESD. Oczywiście, powinny się znaleźć jak najbliżej miejsca spodziewanego wyładowania elektrostatycznego. Najlepsze będą cewki ferrytowe o jak najniższej rezystancji. Wartość indukcji nie jest istotna.
- Diody Zenera. Stanowią one bardzo dobre zabezpieczenie przeciwprzepięciowe. Są one często umieszczane jak ochrona I/O układów cyfrowych. Nie należy oczywiście zdawać się tylko na te już zaimplementowane w strukturę układu. Kluczowym parametrem w ich wypadku jest czas potrzebny do przejścia w stan przebicia. Im krótszy tym lepiej. Jako że ich zadaniem jest zwarcie powstałego impulsu ESD do masy bądź zasilania, należy je wpinać równolegle pomiędzy masę (lub szynę zasilającą), a zagrożoną linię.
- Kondensatory. Stanowią one elementy o niskiej impedancji dla sygnałów wysokoczęstotliwościowych. Ich zadaniem jest zwarcie powstałego szumu wysokoczęstotliwościowego do masy.
- Rezystory. Ze względu na konieczność użycia dużych wartości rezystancji oraz moż-

