

Projektowanie płytek (4)

Prowadzenie połączeń elektrycznych



Istotnym zagadnieniem w sztuce projektowania obwodów drukowanych jest właściwe prowadzenie połączeń elektrycznych, zwanych inaczej ścieżkami. Ścieżki są mozaiką połączeń, która musi spełnić szereg wymagań, zarówno mechanicznych, jak i elektrycznych. Tylko dobrze zaprojektowane połączenia pozwalają na uzyskanie zadowalającej jakości sygnałów, co w efekcie pozwala budowanemu urządzeniu działać niezawodnie w każdych warunkach. I odwrotnie: niezachowanie pewnych ogólnie przyjętych wytycznych może spowodować, że urządzenie nie da się uruchomić lub będzie funkcjonowało źle, ponieważ sygnały nie będą spełniały wymaganych standardów. W tej części cyklu postaram się omówić problemy pojawiające się w czasie tak zwanego routingu.

Trasowanie automatyczne czy ręczne?

Po właściwym rozmieszczeniu elementów następnym krokiem jest tak zwany *routing* (inaczej: trasowanie połączeń), czyli łączenie ze sobą doprowadzeń poszczególnych komponentów za pomocą ścieżek. Trasowanie może być wykonane automatycznie bądź ręcznie. *Routing* automatyczny polega na uruchomieniu programu automatu łączącego poszczególne piny ze sobą. Największą zaletą takiej metody jest oczywiście jej szybkość, natomiast najpoważniejszą wadą to, że połączenia wykonane za pomocą *autoroutera* są często poprowadzone chaotycznie, w różnych kierunkach, można powiedzieć – bez głowy. Trzeba jednak wiedzieć, że autorouter kieruje się pewnymi zadanymi regułami prowadzenia ścieżek, które (w dużym uproszczeniu) np. nakazują mu prowadzenie ścieżek „pionowych” na jednej warstwie, a „poziomych” na drugiej. Metoda ta nadaje się do bardzo prostych projektów bądź do projektów o dużym stopniu złożoności, gdzie automat łączy odpowiednio zdefiniowane fragmenty obwodu. Niektóre pakiety programów CAD wyposażone są w opcję *Route track* lub *Route connection*, dzięki której można wskazać i połączyć automatycznie tylko jedną ze ścieżek. Czasami jest to duże udogodnienie dla projektanta mającego do przeprowadzenia ścieżkę poprzez gąszcz innych połączeń i nie mogącego dostrzec możliwości przebiecia się. Oczywiście najczęściej później trzeba tak poprowadzoną ścieżkę poprawić ręcznie, jednak można potraktować to narzędzie jako swego rodzaju wspomaganie pomysłowości i wyobraźni.

Druga metoda łączenia, czyli *routing* ręczny, jest często stosowana. W tej metodzie projektant prowadzi połączenia ręcznie, a jego praca wspomagana jest przez program. Pomoc programu polega np. na wskazywaniu koniecznych do wykonania połączeń, miejsc łamania reguł podczas prowadzenia ścieżki, podświetlaniu łączonych pinów/padów elementu, obliczaniu długości połączeń, obliczaniu impedancji. Wadą tej metody jest niewątpliwie czas, który projektant musi poświęcić na wykonanie obwodu, natomiast niewątpliwą zaletą jest fakt, iż obwód taki jest wykonany optymalnie, logicznie i precyzyjnie.

Edytory PCB zazwyczaj zawierają szereg autorskich udogodnień, które ułatwiają bądź przyspieszają pracę projektanta. Podczas zapoznawania się z oprogramowaniem, w pierwszej kolejności należałoby zapoznać się z dokumentacją określającą zakres tych udogodnień.

Podstawy

Zwykle w projektowanym obwodzie może znajdować się kilka rodzajów sieci, w zależności od których przyjmujemy różne parametry połączeń, takie jak: grubość warstwy miedzi, szerokość i styl ścieżki, kształt czy też długość prowadzonego połączenia. Parametry te zależą od przepływu prądu, napięcia, częstotliwości sygnału. Dodatkowo są one ograniczane wymaganiami technologicznymi stawianymi przez wytwórców obwodów. Ograniczenia te w aplikacjach EDA najczęściej implementowane są za pomocą definiowanych reguł projektowych. Aby jed-

nak wykonać obwód w sposób optymalny, należy zapoznać się z typowymi parametrami i rodzajami połączeń, które omówię w dalszej części artykułu.

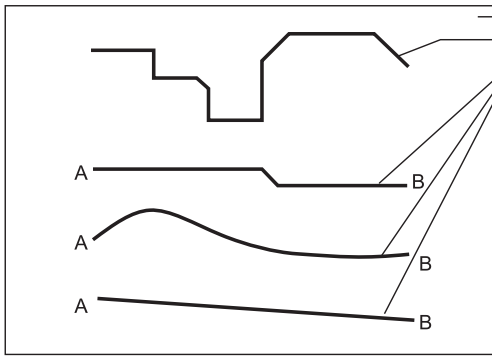
Maksymalna obciążalność prądowa połączenia

Parametr ten jest związany z rezystancją połączeń. Prąd o dużym natężeniu, przepływając przez połączenie nawet o niewielkiej rezystancji, spowoduje wzrost temperatury, co może w efekcie doprowadzić do uszkodzenia lub przepalenia ścieżki. Z reguły, większość połączeń w obwodach jest jednak niskoprądowa, a szerokości ścieżek determinowane są przez możliwość ich poprowadzenia, a nie maksymalny płynący przez nie prąd (szerokość to praktycznie jedyny parametr dostępny projektantowi, który może być zmieniany dość swobodnie podczas pracy nad płytką drukowaną). Jednak np. w układach zasilających czy też stopniach mocy prądy płynące w obwodzie mogą osiągnąć dość znaczne wartości i w takich wypadkach należy prowadzić odpowiednio dobrane połączenia. W celu uniknięcia nagrzewania się połączeń, jak już wspominałem w pierwszym artykule cyklu, należy przyjąć, iż obciążalność miedzianego połączenia (ścieżki) o szerokości 1 mm wynosi 3 A.

Zasady projektowania obwodów wielkiej częstotliwości

Osobną grupę zagadnień tworzą obwody pracujące w zakresie wielkich częstotliwości. Dla częstotliwości rzędu MHz lub GHz połączenia elektryczne w postaci ścieżek na laminacie to nie tylko rezystancja. W takim wypadku mamy do czynienia z impedancją połączeń. Wpływ na impedancję ma rezystancja, pojemność oraz indukcyjność danego połączenia. Dodatkowo należy brać pod uwagę impedancję źródła i odbiornika.

Istnieje mnóstwo literatury dotyczącej zagadnień projektowania obwodów pracujących w zakresie wielkich częstotliwości. Poniżej zaprezentuję jedynie podstawowe wskazówki dotyczące projektowania takich obwodów. Z reguły producenci podzespołów elektronicznych umieszczają w dokumentacji produktu informację, jak projektować obwód drukowany do danego rozwiązania,



Dielektryk – laminat
zbyt długie połączenie z punktu A do B
optymalne połączenie z punktu A do B

na liniach zasilających pojawiają się oscylacje, które mogą być przyczyną powstawania przepięć na liniach sygnałowych.
– Przepięcia powstające w wyniku oddziaływania czynników zewnętrznych. Są one indukowane na skutek oddziaływania innych napięć obecnych w obwodzie, zmiennych pól elektromagnetycznych, zakłóceń wnoszonych z zewnątrz bądź są skutkiem wyładowania elektrostatycznego.

Rys. 25.

bądź wręcz podają szkiełki referencyjne. W takim przypadku należy zastosować się do propozycji producenta.

Projektując płytkę dla zakresów w.cz., należy przestrzegać następujących, ogólnych zasad:

- Prowadzić możliwie jak najkrótsze połączenia, o jak najprostszym kształcie. Długie połączenia o skomplikowanym kształcie przy przewodzeniu prądów wielkiej częstotliwości mogą powodować powstawanie niepożądanych zjawisk typu odbicia i interferencje. Ponadto istnieje wyższe ryzyko indukowania się zakłóceń. Często stosowaną techniką jest trasowanie zgięć ścieżek jako łuki, a nie załamania (rys. 25).
- Nie prowadzić połączeń o długości będącej wielokrotnością długości fali płynącego prądu. Jeżeli długość połączenia i długość fali pokrywałyby się, to wówczas utworzona zostanie antena nadawcza promieniująca zakłócenia. Długość fali obliczamy ze wzoru: $l = v/f$,

gdzie: l – długość fali, v – prędkość fazowa propagacji fali w danym ośrodku, f – częstotliwość fali. Prosty wzór inżynierski, umożliwiający szacowanie długości fali $l[m] = 300/f[\text{MHz}]$.

Przepięcia

W obwodach, w których są linie transmisyjne, mogą pojawiać się na poszczególnych liniach bądź wręcz całej magistrali – przepięcia. Poprzez przepięcie rozumiemy gwałtowny i najczęściej krótkotrwały wzrost napięcia ponad jego normalną wartość. Przepięcia mogą mieć następujące przyczyny:

- Przepięcia powstające wewnątrz magistrali, wynikające z błędnej konstrukcji. Najczęściej powstają wtedy, gdy magistrala ma silny charakter RLC. Przy pewnej prędkości transmisji może wówczas dojść do rezonansu, w którym napięcie może nawet znacznie przekraczać wartość znamionową, przy której normalnie pracuje magistrala.
- Przepięcia powstające w wyniku stanów nieustalonych w obwodzie. Najczęściej pojawiają się w momencie załączenia urządzenia lub obciążenia. Wtedy

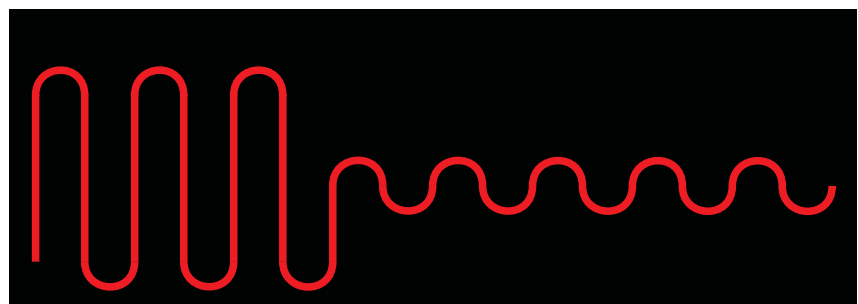
Utrata integralności sygnałowej

Pojęcie to oznacza utratę bądź zafalszowanie informacji determinujących stan linii odbiorczych urządzenia. Informacja przesyłana na poszczególnych liniach danych może docierać do odbiornika w różnych momentach czasowych. Problem pojawia się w sytuacji, gdy układ taktowny jest sygnałem zegarowym o stosunkowo dużej częstotliwości, co powoduje, że informacja trafia do odbiornika w niewłaściwych taktach zegarowych. Skutkuje to utratą prawidłowej informacji. Aby zapobiegać temu zjawisku, należy dążyć do wyrównania długości wszystkich linii danej magistrali. Najczęściej taki zabieg przeprowadza się, wstawiając do danego połączenia dodatkowe segmenty o kształcie sinusoidy o zmiennej amplitudzie. Przykład tak wykonanego połączenia przedstawiono na rys. 26.

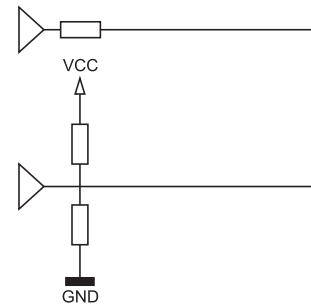
Teoria stratnych linii transmisyjnych

Wydawać by się mogło, iż technika cyfrowa jest odporna na wszelkiego rodzaju zakłócenia. Niestety tak nie jest. Im wyższa częstotliwość pracy, tym bardziej przypomina o sobie charakter analogowy wszelkich sygnałów. Linie transmisyjną można przedstawić za pomocą obwodu zastępczego RLCG, gdzie elementy R, L, C tworzą czwórnik, natomiast G jest parametrem oznaczającą przewodność związaną ze stratami sygnału w izolacji.

Istotnym parametrem linii transmisyjnej jest jej impedancja. Impedancja linii jest



Rys. 26.



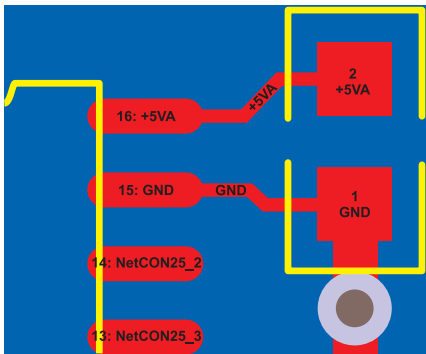
Rys. 27.

niezależna od impedancji wejścia układu odbiorczego. Jak wiemy, linia transmisyjna składa się z szeregu czwórników i od strony wejścia ma swoją impedancję. Oznacza to, że musi upłynąć jakiś czas, aby zasilić prądem z urządzenia nadawczego wszystkie pojemności i indukcyjności pasożytnicze wchodzące w skład linii transmisyjnej. Do tego momentu impedancja zależy tylko od wartości elementów linii transmisyjnej. Im dłuższa jest linia transmisyjna, tym więcej czwórników RLCG, wchodzących w jej skład, a więc wydłuży się czas propagacji sygnału.

Każda linia transmisyjna jest dołączona do nadajnika i odbiornika, a te również mają swoją impedancję. Należałoby dążyć do dopasowania wartości impedancji urządzeń transmisyjnych oraz linii transmisyjnej w celu uniknięcia niekorzystnych odbić fali dla początku i końca linii. Jak wiemy z podstaw fizyki, jeżeli fala dociera do ośrodka o innej impedancji, to pojawia się zjawisko odbicia fali. Fala odbita nakłada się na sygnał użytkowy, tworząc lokalne maksima i minima silnie zniekształcające sygnał użytkowy.

Niestety, dopasowanie impedancji ze względu na determinowaną długość linii transmisyjnej nie zawsze jest możliwe. W takim wypadku musimy zastosować jedno z rozwiązań zastępczych, czyli:

- Zmniejszyć szybkości transmisji poprzez zmniejszenie częstotliwości pracy danej linii transmisyjnej. To rozwiązanie ma jednak zasadniczą wadę, mianowicie zmniejszając prędkość transmisji, zmniejszamy też ilość przesłanej informacji w jednostce czasu, na co w dzisiejszych, zaawansowanych systemach często nie można sobie pozwolić.
- Zmniejszyć długości linii transmisyjnej. Niestety, w praktyce często jest to



Rys. 28.

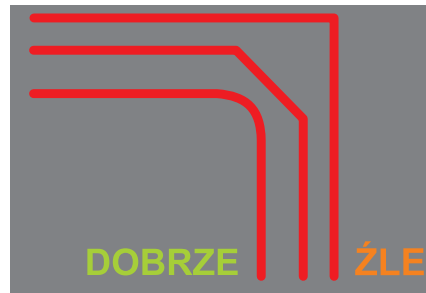
niemożliwe ze względu na już zdeterminowane rozmieszczenie na płytce drukowanej poszczególnych elementów systemu.

- Zastosować *obwody terminujące* włączane w linie transmisyjne. Układy takie zapewniają dopasowanie impedancji urządzeń i linii transmisyjnej. Schematy takich układów najczęściej znajdują się w dokumentacjach projektów referencyjnych urządzeń. Najczęściej są to układy złożone z rezystorów, takie jak na **rys. 27**.

Podstawowe zalecenia trasowania szybkich sygnałów

Z praktycznego punktu widzenia istotne jest spełnienie kilku podstawowych wymagań przedstawionych poniżej. Wskazówki te są istotne dla połączeń pracujących przy częstotliwości sięgającej 300 MHz i więcej.

- 1) Ważnym zadaniem jest prawidłowe filtrowanie zasilania układów cyfrowych. Każdy taki układ musi mieć właściwie podłączony kondensator odsprężający. Często początkujący projektanci lekceważą to zagadnienie, ustawiając taki kondensator w przypadkowym miejscu, gdzie z pewnością nie spełni on swojej funkcji. Przykład prawidłowo wykonanego połączenia przedstawiono na **rys. 28**.
- 2) Właściwe prowadzenie masy omówione szczegółowo w poprzednim artykule opublikowanym w EP 8/2009.
- 3) Prawidłowe prowadzenie połączeń. Należy unikać prowadzenia ścieżek pod kątem prostym, najczęściej należy je zaginać pod kątem 45° lub jeszcze lepiej (zwłaszcza przy wysokich częstotliwościach pracy) stosować łuki.
- 4) Stosowanie odpowiednich układów zabezpieczających przed wyładowaniami elektrostatycznymi ESD. Najczęściej używa się szybkich diod włączonych tak, jak na schemacie na **rys. 29**. Ograniczają one zbyt wysokie napięcia mogące



Rys. 29.

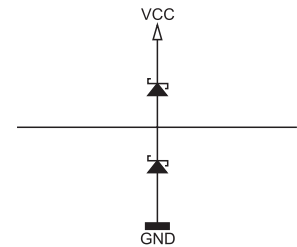
pojawić się na linii przesyłowej. Często przeszukując ofertę czołowych producentów, można znaleźć wiele ciekawych komponentów przeznaczonych do takich zastosowań, np. dwie diody w jednej obudowie SOT23.

- 5) Stosowanie kontroli impedancji w zależności od tego, czy mamy do czynienia z warstwą masy z jednej strony, czy też z obu stron połączenia, wyróżniamy odpowiednio:

- mikrolinie paskowe (microstrip)
- linie paskowe (stripline)

W zależności od rodzaju linii, szerokości połączenia, grubości miedzi, grubości dielektryka, odległości pomiędzy warstwami oraz stałej dielektrycznej materiału, należy z odpowiednich zależności wyznaczyć impedancję takiego połączenia. Na szczęście nowoczesne pakiety EDA wyręczają nas w tym, oferując taką funkcję wraz z odpowiednim symulatorem.

- 6) Wszelkie sygnały mocno zakłócające typu zegary powinny być trasowane ręcznie i umieszczane w pobliżu płaszczyzn referencyjnych masy, najlepiej odseparowane dwoma takimi warstwami od sygnałów wrażliwych, co zniweluje ewentualne przesłuchy. Analogicznie sygnały wrażliwe powinny fizycznie być odseparowane od sygnałów agresywnych. Na drodze kluczowych sygnałów nie powinno być żadnych przerw w strukturze masy. Połączenia najbardziej agresywne i najbardziej wrażliwe są kluczowe i powinny być tak krótkie, jak to tylko możliwe. Nie należy prowadzić połączeń w pobliżu krawędzi obwodu, szerzej o tym zagadnięciu wspomniałem w poprzednim artykule. Wszelkie przewody dołączane do obwodu muszą mieć taką samą impedancję jak wtyczka i ścieżki znajdujące się na płytce.
- 7) Stosowanie płytek elastycznych bądź formowanych wszędzie tam, gdzie można zapobiec łączeniu poszczególnych obwodów za pomocą złączy. Wszelkie



Rys. 30.

połączenia przewodowe kablowe równolegle muszą mieć odpowiednio wiele mas, ale i tak maksymalna wydajność takich interfejsów zamyka się w pobliżu 200 MHz. Aby uzyskać dobre parametry EMC, należy zwiększyć liczbę warstw masy w obwodzie. Inne rozwiązania, mimo iż mogą wydawać się bardziej korzystne z punktu widzenia ekonomicznego, na pewno nie przyniosą zadowalających rezultatów.

- 8) Umieszczanie wszelkich buforów danych w pobliżu złączy.
- 9) Stosowanie na interfejsach szeregowych filtrów usuwających wszelkie szumy, pozostawiających tylko informację prądową. Szczególnie istotne przy magistralach np. CAN AUTOBUS. Nie należy trasować połączeń o długości równej wielokrotności długości fali.
- 10) Stosowanie odpowiednich materiałów produkcyjnych np. firmy ROGERS. Produkuje ona tak zwane laminaty specjalne. Na stronie firmy można znaleźć szczegółowe informacje o dostępnych rodzinach oraz ich zastosowaniu.

Podsumowanie

Na zakończenie chciałbym wspomnieć o stosowaniu nowoczesnych aplikacji EDA. Zazwyczaj spotykamy się z taką sytuacją, iż w wielu firmach używane aplikacje są przestarzałe. Co prawda pozwalają one uzyskać model obwodu drukowanego, jednak pozbawione są nowoczesnych funkcji wspierających nowe techniki projektowania. W nowoczesnych EDA możemy przeprowadzać zaawansowaną symulację i kontrolę impedancji, dbać o zależności czasowe, uwzględniać mechanikę w projektach. W obecnych czasach kryzysu można wynegocjować stosunkowo dobre ceny takich aplikacji. A skoro elektronika ciągle się rozwija, to być może jest to dobry okres na taką inwestycję. Projektowanie coraz bardziej zaawansowanych urządzeń i spełnienie właściwych norm stanie się wtedy łatwiejsze.

inż. Tomasz Świontek
tomekfx@o2.pl