

Projektowanie płytek obwodów drukowanych zgodnie z wymaganiami EMC i ESD

W poprzednim artykule opublikowanym w EP 4/2013 opisałem zagadnienia teoretyczne związane z powstawaniem interferencji elektromagnetycznych. Teraz skupię się na kolejnej strategii eliminowania problemów z EMC: podziale projektowanego urządzenia na podsystemy i ich optymalnym rozmieszczeniu na płycie obwodu drukowanego.

Na podstawie tych rozważań opisanych w poprzednim artykule wysnułem wniosek, że podstawowymi źródłami problemu z kompatybilnością elektromagnetyczną są silne pole elektromagnetyczne oraz pętle prądowe utworzone w obrębie PCB i działające podobnie do anten. W dalszej części zaprezentowałem podstawowe źródła promieniowania elektromagnetycznego oraz potencjalne elementy projektowanego systemu elektronicznego, które będą odbierały z otoczenia szum elektromagnetyczny.

Bardzo ważne przy projektowaniu układu elektronicznego spełniającego założenia kompatybilności elektromagnetycznej jest właściwe wykonanie i umieszczenie masy oraz zasilania systemu. Jakikolwiek zaniedbania na tych polach mogą skończyć się poważnymi i trudnymi do usunięcia usterkami. Istotne jest zarówno poprawne wykonanie mozaiki połączeń na płycie obwodów drukowanych, jak i uważne dobranie komponentów pod kątem zadań, które będą spełniały w projektowanym systemie. Po wskazówce jak do tego się zabrać odsyłam do wcześniejszego artykułu. Teraz skupię się na kolejnej strategii eliminacji problemów z EMC: podziale projektowanego urządzenia na podsystemy, i ich optymalnym rozmieszczeniu na płycie obwodów drukowanych.

Podzielenie urządzenia na podsystemy

Znalezienie wszystkich potencjalnych przyczyn problemów z kompatybilnością elektromagnetyczną dla projektowanego urządzenia elektronicznego, traktowanego jako niepodzielna całość, jest zadaniem szalenie złożonym. Trudno jest precyzyjnie określić wszystkie krytyczne miejsca w układzie (mowa tu zarówno o generatorach zakłóceń pola elektromagnetycznego, potencjalnych antenach zbierających zakłócenia ze środowiska ze-

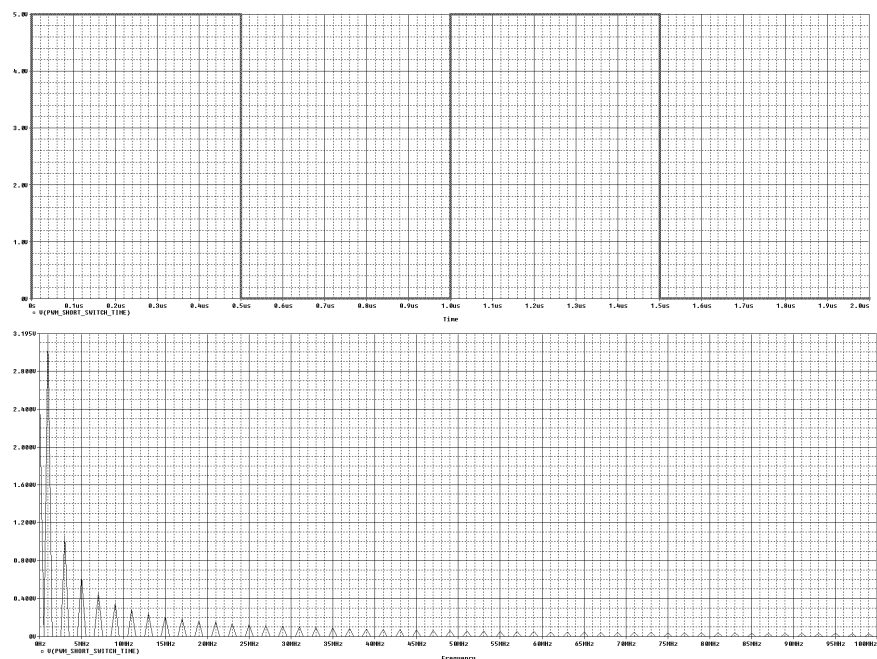
wnętrznego, jak i wrażliwych na szum sekcjach systemu). Podobnie ma się sprawa z późniejszą analizą gotowego urządzenia pod kątem kompatybilności elektromagnetycznej i próbą usunięcia wykrytych usterek.

Zdecydowanym ułatwieniem jest podzielenie projektu urządzenia na grupy funkcjonalne. Znacznie prościej jest zdefiniować możliwe źródła problemów dla mniejszego podsystemu, który spełnia jedno, ściśle sprecyzowane zadanie. Jasne określenie źródeł szumów i miejsc wrażliwych w podsystemie sprawi, że możliwe będzie należyte odfiltrowane zakłóceń i zapewnienie odpowiedniej ochrony. Ważne, aby szum nie przenosił się pomiędzy podsystemami. Wykonanie kompletnego urządzenia elektronicznego poprzez połączenie ściśle

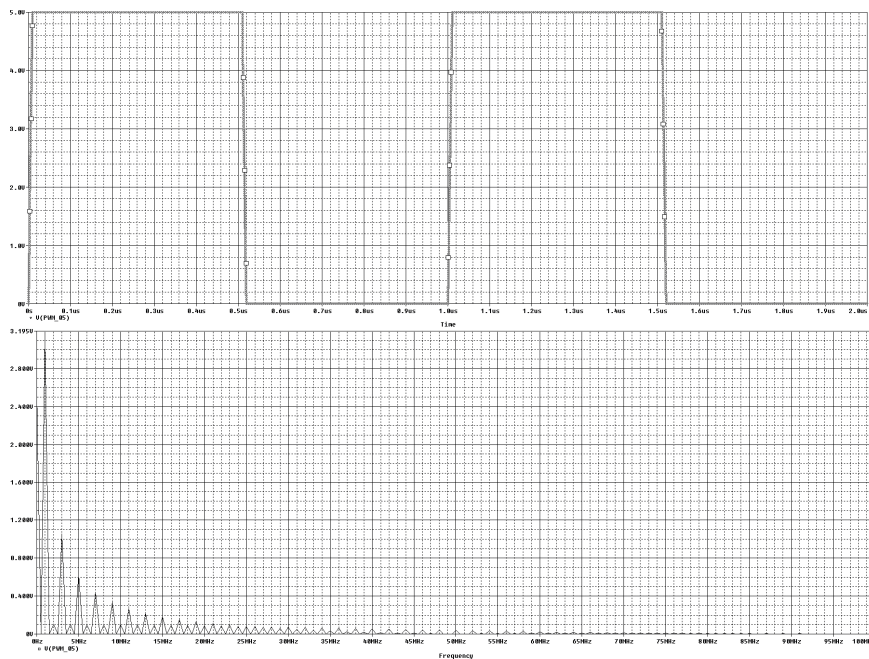
opisanych bloków funkcjonalnych umożliwia stosunkowo szybką identyfikację przyczyn niepożądanego zachowania oraz łatwą i skuteczną eliminację usterki. Pisząc „ściśle opisany” mam na myśli podsystem, który:

- ma jednoznacznie określone zadanie, jakie ma spełniać w urządzeniu,
- znany jest sposób przetwarzania sygnałów wejściowych na wyjściowe, jeżeli taki zachodzi,
- jest określony zbiór wartości, które będą przyjmowały sygnały wchodzące i wychodzące.

Podzielenie całego projektu na szereg mniejszych podsystemów jest więc zabiegiem bardzo korzystnym. Warto wprowadzić ten podział już na etapie wykonywania schematu połączeń elektrycznych. Może to wyglądać w ten sposób, że na pierwszym arkuszu zostaną zaprezentowane w sposób symboliczny poszczególne grupy funkcjonalne i połączenia pomiędzy nimi, a na kolejnych znajdują się schematy elektryczne kolejnych podsystemów. W sposób czytelny i jednoznaczny muszą zostać przedstawione (i nazwane) linie wej-



Rysunek 1: Przebieg prostokątny o częstotliwości podstawowej 1 MHz, wypełnieniu 50%, amplitudzie 5 V, czasie narastania/opadania zboczy 100 ps. Poniżej umieszczono widmo częstotliwościowe sygnału



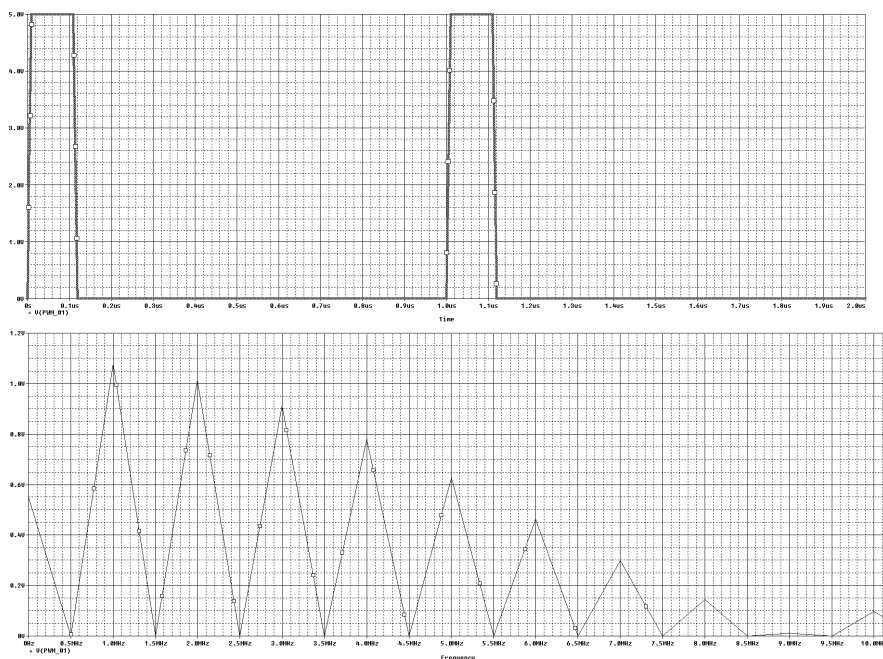
Rysunek 2: Przebieg prostokątny o częstotliwości podstawowej 1 MHz, wypełnieniu 50%, amplitudzie 5 V, czasie narastania/opadania zboczy 10 ns. Poniżej umieszczono widmo częstotliwościowe sygnału

ściowe/wyjściowe każdego z podsystemów. Dobrze jest rozróżnić typ sygnału przewodzonego poszczególnymi liniami (np. wejściowy, wyjściowy, zegarowy, cyfrowy, analogowy etc.) za pomocą odpowiednich symboli graficznych. Zwiększy to czytelność schematu. Dodatkowo, warto nadać sygnałom opuszczającym/wchodzącym do podsystemu nazwy nawiązujące do ich zadania. Bardzo pomocne przy późniejszym rozmieszczaniu elementów na płycie obwodów drukowanych będzie dodanie do nazw

komponentów etykiet wskazujących, do której grupy przynależą.

Klasyfikacja poszczególnych podsystemów powinna odbyć się pod kątem ilości generowanego szumu oraz wrażliwości na zakłócenia elektromagnetyczne. Najczęściej wyróżnia się następujące podsystemy:

- **Wysokoczęstotliwościowe\cyfrowe.** Jest to grupa generująca znaczne ilości szumu elektromagnetycznego. Główną przyczyną takiego stanu rzeczy są przebiegi prostokąt-



Rysunek 3: Przebieg prostokątny o częstotliwości podstawowej 1 MHz, wypełnieniu 10%, amplitudzie 5 V, czasie narastania/opadania zboczy: 10ns. Poniżej umieszczono widmo częstotliwościowe sygnału

ne o wysokiej częstotliwości i krótkim czasie narastu i opadania zboczy (**rysunek 1** i **rysunek 2**). Modyfikacja wypełnienia sygnału prostokątnego przyczynia się do zmiany mocy kolejnych harmonicznych (**rysunek 3** i **rysunek 4**), więc należy dążyć, aby systemy cyfrowe pracowały z jak najniższą częstotliwością, a czas zmiany stanu na danej linii był jak najdłuższy. Drugą przyczyną znacznego stopnia generowanych zakłóceń przez ten blok jest sposób pobierania energii przez układy cyfrowe. Odbywa się on w sposób impulsowy, w czasie wystąpienia zbocza zegarowego. Piki prądowe, które wtedy powstają, nie dość, że cechuje wysoka częstotliwość, to na dodatek są o znacznej wysokości (dobrze jest zadbać o wyłączenie niepotrzebnych peryferii w mikrokontrolerze w celu zminimalizowania poboru mocy). Jak już wspomniałem w poprzednim artykule, indukcja pola magnetycznego jest wprost proporcjonalna zarówno do częstotliwości sygnału jak i natężenia biegnącego prądu. Mówiąc bardziej obrazowo: indukcja pola magnetycznego jest wprost proporcjonalna do **iloczynu** (!) tych dwóch wartości. Czasami dodatkowo jest wyróżniana grupa szczególnie mocno szumiąca (np. procesor szybko wymieniający dane z pamięcią zewnętrzną).

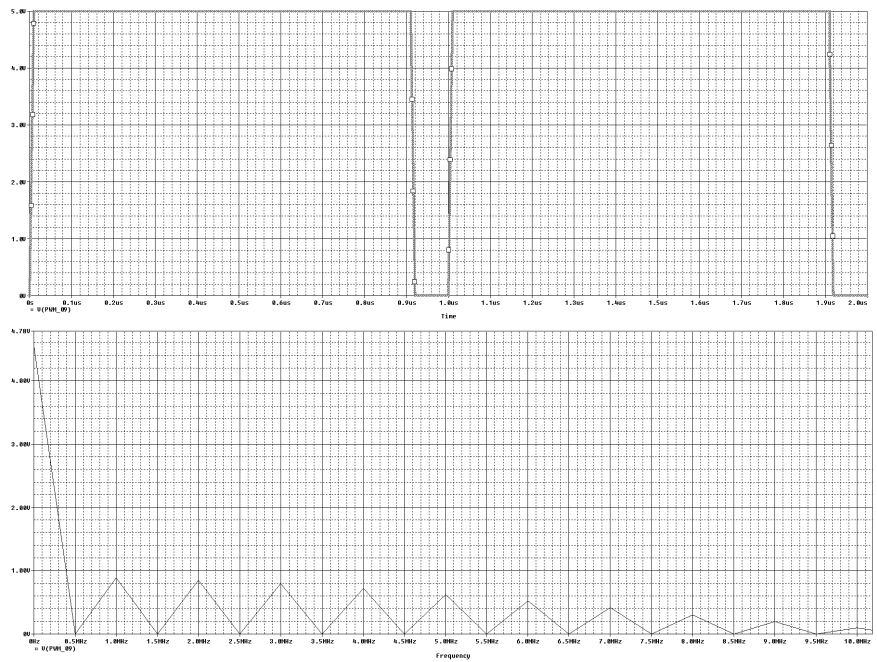
- **Niskoczęstotliwościowy\analogowy.** Jest to podsystem szczególnie wrażliwy na wszelki szum elektromagnetyczny. Bez względu musi być umieszczony z daleka od możliwych źródeł zaburzeń pola elektromagnetycznego, czy też od krawędzi i otworów w laminacie. Bardzo ważne jest dostarczenie stabilnego zasilania, pozbawionego jakichkolwiek pików. Warto, aby ta grupa, jeżeli będzie korzystała z portów I/O systemu, znajdowała się jak najbliżej strefy portów wejścia/wyjścia w celu zminimalizowania zniekształcenia danych analogowych. Analogicznie do układów wysokoczęstotliwościowych, czasami jest wyróżniana dodatkowa grupa, wyjątkowo wrażliwa na szum.
- **Strefa funkcjonalna portów wejścia/wyjścia.** Jak sugeruje nazwa, do tej grupy zaliczają się różne konektory, za pomocą których projektowany system elektroniczny wymienia informacje ze światem zewnętrznym. Najlepiej, aby ten podsystem znalazł się jak najbliżej krawędzi płytki obwodów drukowanych. Ze względu na możliwość odbierania i wysyłania zakłóceń elektromagnetycznych, a także podwyższone ryzyko wystąpienia przepięć (wywołanych np. przez wyładowania elektrostatyczne) bądź zwarć (spowodowanych

np. niepoprawnym ich użytkowaniem), należy ze szczególną pieczołowitością zadbać o zablokowanie tych niekorzystnych zjawisk w obrębie tego podsystemu. Propagacja ich na kolejne grupy funkcjonalne spowoduje ich niepoprawną pracę, bądź co gorsza, uszkodzenie całego urządzenia. Do filtrowania szumów wysokoczęstotliwościowych zwykle wystarczą cewki ferrytowe oraz kondensatory ceramiczne. W przypadku przepięć można radzić sobie z nimi przy pomocy odpowiednio dobranych diod Zenera (w tym miejscu odsyłam do poprzedniego artykułu, do porad na temat projektowania układu zasilania).

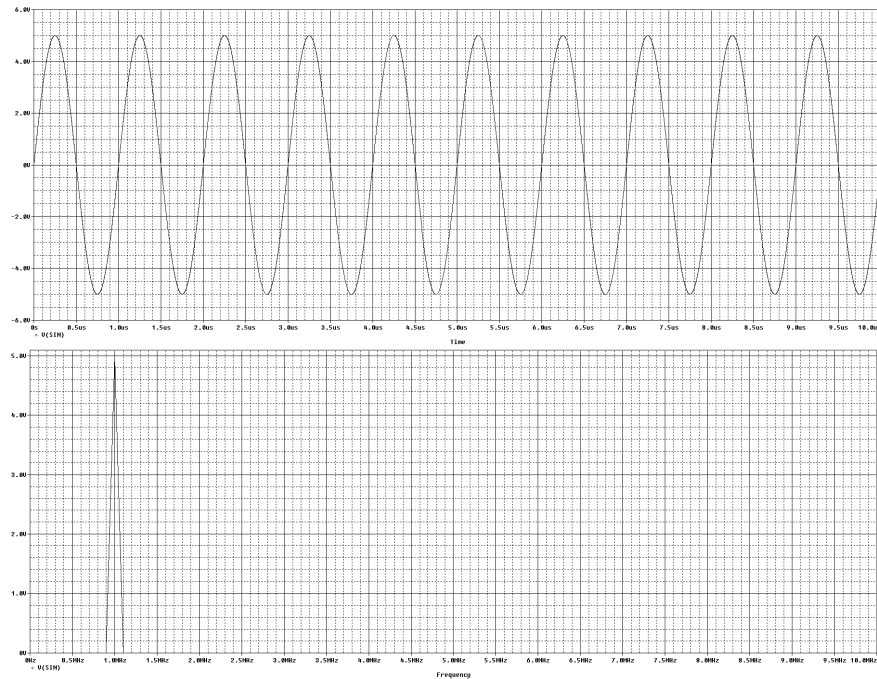
- **Układ zasilania.** Ta grupa funkcjonalna powinna być umieszczana jak najbliżej wejścia mocy do systemu i w pewnej odległości zarówno od szybkich układów cyfrowych jak i wrażliwych analogowych. Jest ona o tyle specyficzna, że zarówno generuje, jak i jest podatna na zakłócenia pola elektromagnetycznego. Przyczyną powstawania szumu są płynące w niej prądy o dużym natężeniu oraz pracujące z krótkimi czasami przełączania układy scalone (np. bardzo popularne w urządzeniach zasilanych bakteryjnie przetworniki DC-DC). Z drugiej strony bardzo istotne jest ograniczenie szumu docierającego z zewnątrz. Zaniedbanie problemu spowoduje powstanie zakłóceń na szynie zasilającej i w efekcie ich rozprzestrzenienia, niepoprawną pracę projektowanego urządzenia.

Po uporaniu się z zadaniem podzielenia całego systemu na mniejsze grupy, można przystąpić do rozplanowania ich rozmieszczenia na płycie PCB. W przypadku podsystemów wysokoszumnych trzeba zastanowić się czy będzie on potrzebował dostępu do strefy portów I/O systemu. Jeżeli tak, w celu doprowadzenia sygnałów cyfrowych jak najkrótszymi ścieżkami (zminimalizujemy wielkość pętli prądowych, a więc i ilość wypromieniowywanego pola elektromagnetycznego), to musi zostać umieszczony w sąsiedztwie podsystemu portów wejścia/wyjścia (rysunek 6). W przeciwnym razie, system wysokoszumny powinien znaleźć się z dala od strefy portów (rysunek 7). Dobrze, aby ta odległość wynosiła przynajmniej 50 mm. Zmniejszona zostanie w ten sposób ilość wypromieniowywanego pola elektromagnetycznego z budowanego systemu elektronicznego.

Stosowane są dwa wzorce rozkładania podsystemów na obszarze płytki obwodów drukowanych. Pierwszy z nich przewiduje, że bloki funkcjonalne są poukładane oddzielnie, z zachowaniem odpowiedniej odległości od siebie. Linie wchodzące i wychodzące z danego podsystemu są filtrowane. Zaletą jest duża



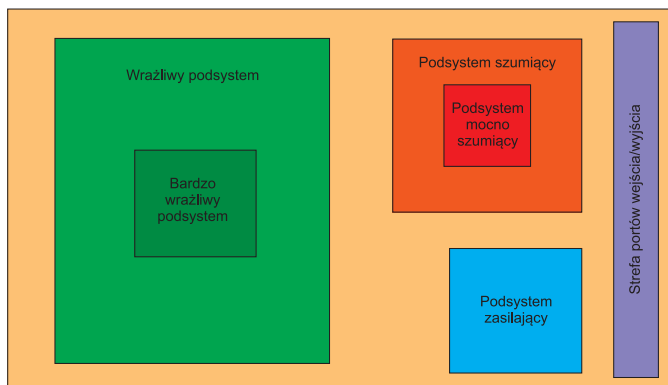
Rysunek 4: Przebieg prostokątny o częstotliwości podstawowej 1 MHz, wypełnieniu 90%, amplitudzie 5 V, czasie narastania/opadania zboczy 10 ns. Poniżej znajduje się widmo częstotliwościowe sygnału



Rysunek 5: Przebieg sinusoidalny o częstotliwości podstawowej 1 MHz, amplitudzie 5 V. Poniżej umieszczono widmo częstotliwościowe sygnału. W przeciwieństwie do innych typów przebiegów, jedyny pik w widmie częstotliwości występuje przy częstotliwości podstawowej

elastyczność przy późniejszych modyfikacjach urządzenia. Druga metoda przewiduje, że poszczególne podsystemy mogą się znajdować wewnątrz innych. Ma to jedną ogromną zaletę w porównaniu ze sposobem pierwszym: linie wchodzące i wychodzące z centralnego podsystemu będą przechodziły przez więcej niż jedną strefę filtrów. Przykładowo, w centralnej części naszego układu umieścimy bardzo wrażliwy układ analogowy, posiadający własny ekran.

Będzie on otoczony przez podsystem analogowy. Linie przechodzące z jednego systemu do drugiego będą przechodziły przez strefę filtrowania. Całość będzie zamknięta w ekranowanej obudowie, z filtrowanymi portami wejścia/wyjścia. Jak łatwo zauważyć, sygnały docierające do wrażliwej części układu ze środowiska zewnętrznego będą lepiej odfiltrowane, niż miałyby to miejsce, gdy blok szczególnie wrażliwy byłby umieszczony niezależnie.



Rysunek 6: Położenie poszczególnych podsystemów. Układ cyfrowy będzie korzystał z portów I/O

Zalety i wady dwóch wymienionych powyżej wzorców sprawiają, że w wielu układach są one stosowane jednocześnie. Ma to zazwyczaj miejsce, kiedy w obwodzie są wyróżnione dodatkowo bardzo szumne, bądź bardzo wrażliwe grupy funkcjonalne. Są one wtedy otaczane przez odpowiedni podsystem (analogowy albo cyfrowy).

Rozmieszczenie poszczególnych elementów elektronicznych na płycie obwodów drukowanych zgodnie z ich przynależnością do danego podsystemu sprawi, że uniknięty zostanie problem z przypadkowo utworzonymi pętlami prądowymi. Prądy zwrotne płynące w obrębie danej grupy funkcjonalnej nie będą zakłócały przepływu prądu w pozostałych. Skoro takie zjawisko nie będzie miało miejsca, to czy jest sens mu zapobiegać poprzez podzielenie płaszczyzny masy? Prądy zwrotne płynące pomiędzy poszczególnymi blokami pojawią się jedynie przy liniach je łączących, dlatego musimy zadbać o odpowiednie ich odfiltrowanie. W przypadku krytycznych (mocno szumiących, czy też wrażliwych) podsystemów należy zadbać, aby pomiędzy nimi, a pozostałymi przebiegała linia masy połączona przelotkami z płaszczyzną masy. Odległość między przelotkami nie powinna być większa niż $1/10$ długości najkrótszej, spodziewanej fali elektromagnetycznej.

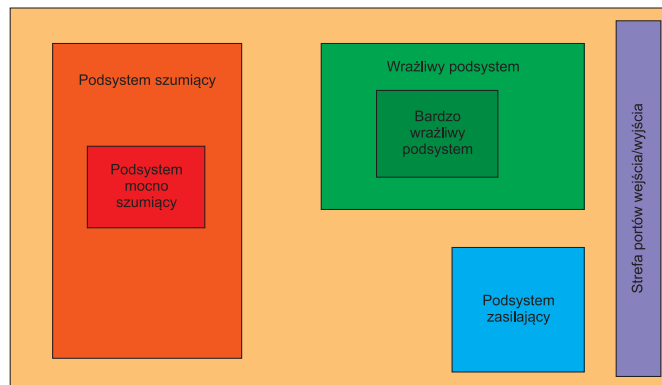
Prowadzenie ścieżek sygnałowych

Skoro już uporaliśmy się z zaprojektowaniem masy i zasilania, dokonaliśmy podziału projektowanego układu elektronicznego na grupy funkcjonalne, określiliśmy zjawiska niekorzystne (pod kątem kompatybilności elektromagnetycznej) w nich występują i podjęliśmy kroki ku ich wyeliminowaniu, a elementy elektroniczne zostały rozłożone na płycie obwodów drukowanych zgodnie z ich przynależnością do poszczególnych grup, możemy przystąpić do utworzenia połączeń sygnałowych wewnątrz i pomiędzy podgrupami. Nieocenioną pomocą okażą się naniesione na etapie tworzenia schematu połączeń elektrycz-

nych etykiety i symbole graficzne definiujące przynależność i typ danego sygnału.

Generalnie, ścieżki sygnałowe powinny być jak najkrótsze, w przypadku sygnałów szybkozmiennych warto zadbać, aby prowadzone były w obrębie jednej warstwy, sąsiadującej z płaszczyzną masy. Jeżeli musimy wykonać zagięcie, to powinno ono być wykonane pod jak najmniejszym kątem. W wielu przypadkach optymalne są zagięcia pod kątem 45° . Duże kąty zaginania ścieżek są szczególnie niekorzystne przy wysokich częstotliwościach. Część energii sygnału jest w takich liniach odbijana z powrotem do źródła. W ekstremalnym przypadku może dojść do odbicia całości wypromieniowanej z nadajnika energii i w efekcie jego zniszczenia. Mniej katastroficznym skutkiem będzie zwiększona emisja promieniowania elektromagnetycznego oraz skłonność do zbierania szumu EM z otoczenia. Podobnie, jak w przypadku ścieżek o zbyt dużym kącie zagięcia, zachowują się linie prowadzące donikąd. Powstają zazwyczaj podczas usuwania ze schematu połączeń, które już zostały naniesione w projekcie mozaiki połączeń PCB. Warto po takiej operacji uważnie obejrzeć projekt płytki.

Najmocniej szumiącymi ścieżkami będą te, którymi będzie transmitowany sygnał cyfrowy. Czas przełączania poziomów na tych liniach będzie determinował moc wyższych harmonicznych – im krótszy, tym ich amplituda będzie wyższa (rys. 1 i 2). Konieczne jest wydłużenie czasu narostu zboczy narastających i opadających do wartości jak najwyższych, umożliwiających spełnienie postawionych projektowanemu systemowi wymagań. Realizowane jest to najczęściej przez szeregowe wpięcie do linii oporników o małych wartościach rezystancji, typowo nieprzekraczającymi 70Ω . Moc przenoszona przez kolejne harmoniczne można również zmniejszyć poprzez dobranie odpowiedniego wypełnienia sygnału prostokątnego (rys. 3 i 4). Jest istotne, aby sygnały cyfrowe prowadzone były w bezpośrednim sąsiedztwie płaszczyzny masy.



Rysunek 7: Położenie poszczególnych podsystemów. Układ cyfrowy nie będzie korzystał z portów I/O

Warto też zadbać o biegnącą do nich równoległe ścieżkę masy oraz umieszczenie z dala od linii, którymi są rozprowadzone inne rodzaje sygnałów. Jeżeli w układach cyfrowych pozostają jakieś niewykorzystane wyprowadzenia, to trzeba je bezwzględnie dołączyć do masy przez rezystor ograniczający natężenie prądu. Uniknie się wtedy losowej zmiany poziomów na tych liniach wywołanej np. pobliskim zdarzeniem ESD.

W wypadku ścieżek, którymi rozprowadzone są sygnały analogowe, sprawa wygląda nieco inaczej. Tutaj raczej trzeba zadbać o wysoką odporność na zaburzenia pola elektromagnetycznego. W celu zmniejszenia oddziaływania z szumami pochodzącymi z podsystemu cyfrowego warto, aby sygnały analogowe biegły ścieżkami prostopadłymi do połączeń cyfrowych. Wejścia do podsystemu analogowego powinny być filtrowane za pomocą filtrów dolnoprzepustowych. Dodatkową ochronę linią prowadzącą sygnały analogowe zapewniają biegnące równoległe ścieżki masy (podobnie jak w wypadku ścieżek prowadzących sygnały cyfrowe – połączone przelotkami z płaszczyzną masy). W celu obniżenia impedancji pomiędzy nimi warto zastosować wielowarstwowe, ceramiczne kondensatory odprzegające. Użyteczne w przypadku połączeń o charakterze analogowym okażą się również cewki ferrytowe. Ich zadaniem będzie tłumienie wysokoczęstotliwościowych składowych sygnału. Takie składowe mogą pojawić się np. w przypadku przełączenia przekaźnika elektrycznego. Powinny być usytuowane jak najbliżej miejsca możliwego ich powstania.

Podsumowanie

To by było na tyle wskazówek na temat rozplanowania położenia poszczególnych elementów na obszarze płytki obwodów drukowanych. W kolejnym artykule opiszę, w jaki sposób zabrać się do zagadnienia ekranowania systemu oraz do zaprojektowania magistral i wyprowadzeń sygnałów.

Rafał Łaziński