

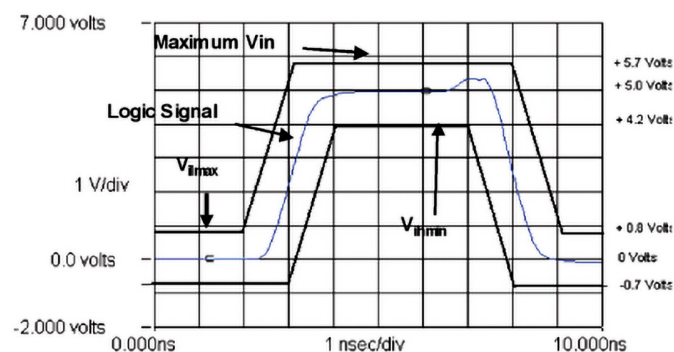
Signal Integrity – co to takiego i dlaczego inżynier elektronik powinien zainteresować się tematem?

Jeśli kiedykolwiek długość ścieżki zaczyna być porównywalna z długością fali najszybszego sygnału, musisz zacząć interesować się tematem „high speed design”, który bynajmniej nie oznacza szybkiego projektowania, ale specjalistyczną wiedzę w zakresie ścieżek wiodących szybkozmienne sygnały.

Projektowanie obwodów, czy płytek drukowanych (PBC) zawierających układy scalone zawsze wymagało wielu kompetencji. Często zaangażowania doświadczonych osób, ekspertów z wielu dziedzin, m.in.:

- Schemat – działanie funkcjonalne.
- Layout – wykonanie fizyczne.
- Oprogramowanie (EDA) – odpowiednie.
- Układy logiczne – jak działają, czego potrzebują.
- Transfer ciepła – wymagania temperaturowe.
- Mechanika – obudowa, złącza, materiały.
- Produkcja – przygotowanie zamówienia, plików, punktów testowych, etc.
- Analiza niezawodności, bezpieczeństwo.

a na koniec – analiza wymagań i ocena zgodności. Teraz, gdy systemy elektroniki cyfrowej wychodzą daleko ponad barierę 1 GHz (dość popularne systemy komunikacji, zarówno kablowe jak i bezprzewodowe), wszystko zamykamy w coraz mniejszych obudowach, tych kompetencji potrzeba jeszcze więcej. Coraz częściej mile widziane są kompetencje tzw. high speed design, czyli związanych



Rysunek 1. Co oznacza, że sygnał ma dobrą jakość? Przykład odpowiedni akceptowalnych wartości dla 5 V logiki CMOS. Źródło „Right the first time a practical handbook on high speed PCB and system design”, Lee W. Ritchey

Więcej informacji:

Signal Integrity – High Speed Design w Akademii EMC <http://bit.ly/2MYOd5I>



z integralnością sygnałów, dostarczeniem zasilania (Signal and Power Integrity, SI, PDN) czy kompatybilności elektromagnetycznej. To współgra z fizyką zjawisk wysokiej częstotliwości, zrozumieniem impedancji i coraz większej precyzji wykonania poszczególnych obwodów. W skrócie, można powiedzieć, że w Signal Integrity, czy w High Speed Design chodzi nam o to aby odebrać właściwe dane, we właściwym miejscu i czasie, a cały system był kompatybilny elektromagnetycznie.

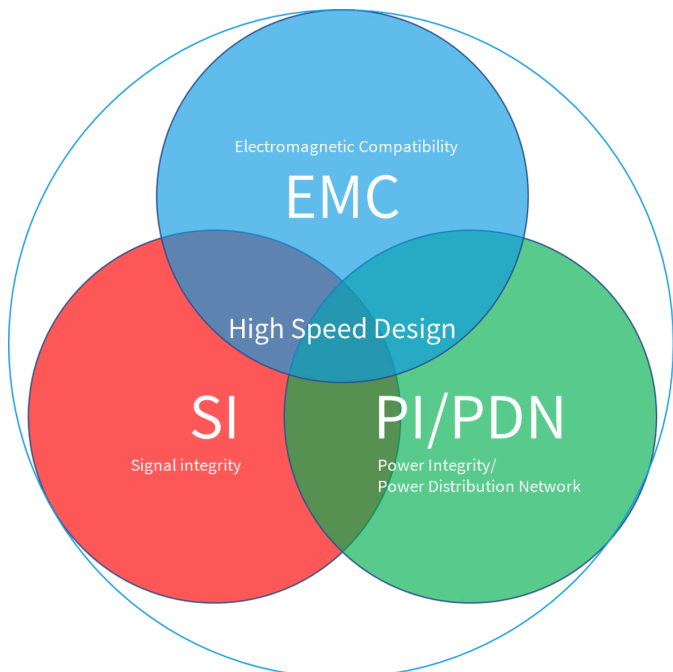
Podstawowe założenie: **Zależy nam na tym aby odbiornik otrzymał tą samą informację jaką nadaliśmy, w odpowiednim czasie.** Czyli sygnał powinien dotrzeć od źródła, poprzez linię transmisyjną, do odbiornika. Bez nadmiernych zniekształceń (rysunek 1).

Na krótkie odległości i przy niskiej prędkości transmisji (bitrate), większość połączeń pozwoli na uzyskanie odpowiedniej jakości połączeń. Jednak gdy rośnie częstotliwość czy odległości (w porównaniu do długości fali), to zaczynają pojawiać się problemy z detekcją sygnałów i stabilnym działaniem systemu.

Signal Integrity obejmuje zjawiska mocno związane z EMC (kompatybilnością elektromagnetyczną) i jest częścią kompatybilności wewnętrznej systemu (rysunek 2). Poznanie związanych z nią zagadnień pomoże zrozumieć wpływ projektu (wielu aspektów) na właściwości sygnałów, czyli jakość naszych połączeń. Dodatkowo, ułatwi współpracę w zespole projektowym. Na to wszystko nakłada się pryzmat kosztów, większej funkcjonalności i jeszcze krótszy czas wprowadzania produktu na rynek (time to market). Coraz częściej spotykamy podejście zaprojektuj od razu dobrze (design right first time). Opiera się ono na wykorzystywaniu przewidywań, obliczeń, symulacji czy rzetelnych notach aplikacyjnych, zasadach projektowych, weryfikacji pomiarami i dużej dyscyplinie.

Drogą do poprawnego użycia tych narzędzi w projekcie jest dokładne (fundamentalne) zrozumienie zjawisk – przyczyn i źródeł problemów oraz wpływu poszczególnych elementów na zachowanie sygnałów (w tym ich integralność – Signal Integrity).

Signal integrity, w skrócie **SI** – Integralność sygnałów to zbiór metryk opisujących jakość sygnału elektrycznego. Każdy sygnał tzw. cyfrowy, jest sygnałem analogowym, który jest zmiennym przebiegiem napięcia (lub prądu) w funkcji czasu. Zera i jedynki są reprezentowane przez poziom niski i wysoki. Dodatkowo, sygnał zawiera



Rysunek 2. Wiele aspektów spotyka się przy projektowaniu urządzenia z sygnałami szubkocziennymi

informacje o charakterze zmian tego napięcia (prądu) w czasie. Pojawiają się pojęcia czasów narastania, czasów opadania. Oczywiście, ważny jest też charakter tych zmian, bo kształt „zbozca” może być różny.

Signal integrity odpowiada za to, aby:

- Jakość sygnału była akceptowalna na drodze od źródła do odbiornika (driver to receiver).
- Interferencje (zakłócenia, wpływ wzajemny) różnych sygnałów ich nie degradował.
- Sygnały nie zakłócają innych urządzeń czy systemów (EMC).
- Mamy dobrze zaprojektowane dostarczenie zasilania (PDN – Power Distribution Network).
- Mamy zachowane odpowiednie marginesy czasowe (synchronizacja).

Jakość sygnału to także aspekty EMC, EMI, czyli wpływ sygnałów zewnętrznych (zaburzeń) na detekcję odbiornika, a także wpływ sygnałów na świat zewnętrzny. Często pojawia się emisja spowodowana przesyłaniem szybkich sygnałów, torami nie optymalnymi pod kątem niskiej emisyjności i odpowiedniej impedancji (**rysunek 3**).

Dlaczego Signal Integrity jest ważne? Na odpowiedź składają się następujące zagadnienia:

- Coraz mniejsze napięcia driverów.
- Coraz większa gęstość upakowania układów i systemów.
- Coraz szybsze czasy narostów (strome zbocza, <math>< 1\text{ ns}</math>).
- Coraz większe szybkości transmisji danych i częstotliwości taktowania zegarów.
- Dłuższe połączenia, ścieżki sygnałów.

Podstawowym pojęciem dla osób zaczynających pracę z wysokimi częstotliwościami (też czasami narostów) są:

- Linia transmisyjna (impedancja linii w zależności od częstotliwości).
- Efekty pasożytnicze (pojemność indukcyjność) – praca z komponentami rzeczywistymi, a nie teoretycznymi.
- Brak ciągłości impedancji i wpływ na zniekształcenia czy opóźnienia sygnałów.
- Straty i tłumienia połączeń, etc.
- Szumy.
- Przerzuty (overshoots, undershoot).
- Przesłuchy (crosstalk).
- Pomiar sygnałów w dziedzinie czasu (w odpowiednim paśmie).

Zacznijmy więc poznanie naszego warsztatu, otwierając skrzynkę narzędziową. Inżynier w swojej podręcznej skrzynce narzędziowej ma cztery podstawowe zestawy:

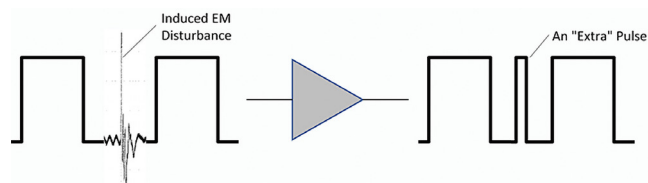
- Reguły „na oko” (ang. rules of thumb).
- Obliczenia przybliżone, szacunki.
- Symulacje numeryczne.
- Pomiar fizyczny (weryfikacja z symulacjami).

Ważne jest zachowanie równowagi pomiędzy dokładnością, a poświęconym czasem, wysiłkiem włożonym w analizy. Im większą dokładność chcemy uzyskać, tym więcej wysiłku musimy włożyć. Ważne by nie bagatelizować analiz, ale nie popadać w skrajności i odkładanie wykonania fizycznej płytki (prototypu) aż do ukończenia wszystkich analiz.

Każde z tych narzędzi ma swoje ograniczenia i odpowiedni czas do zastosowania. Tak, weźmy regułę „na oko”, która świetnie sprawdzi się przy określaniu przyczyn problemu, budowaniu wstępnych założeń. Obliczenia w oparciu o równania to kolejne przybliżenia, optymalizacja i sprawdzanie różnych rozwiązań. Symulacje są świetne, jednak tylko tak dokładne jak dokładne są modele. Do tego czasochłonne i dość drogie. Ale mogą dość dokładnie przewidzieć efekty naszych założeń. Pomiar fizyczny – super, jednak pamiętajmy, że każdy pomiar ma wpływ na obiekt badany. Sondy, otoczenie się zmienia. Czyli poznanie narzędzi i nauka ich obsługi, wraz z ograniczeniami wydaje się kluczowa (**rysunek 4**).

Postanowiłem przywołać 10 zasad Signal Integrity, które w swojej świetnej książce „Signal and power integrity simplified” podaje Eric Bogatin.

1. Kluczem do efektywnego projektowania szybkich układów (high-speed) jest zaangażowanie narzędzi analitycznych, które pozwalają na dość dokładne przewidzenie właściwości urządzenia. Użycie pomiarów to sposób do potwierdzenia, sprawdzenia projektu, redukcji ryzyka oraz wzmocnienie pewności w użyciu narzędzi analitycznych.
2. Jedyną drogą do oddzielenia mitów od rzeczywistości jest użycie liczb, założeń na oko, przybliżeń, symulacji numerycznych albo pomiarów. Jest to kluczowe w działaniach inżyniera.
3. Każde połączenie jest linią transmisyjną, z linią nadawczą i ścieżką powrotną prądu. Niezależnie od jej długości, kształtu czy czasu narostu sygnału. Sygnał widzi lokalną impedancję na każdym etapie drogi przez dane połączenie. Jakość tego sygnału dramatycznie się podnosi, jeśli lokalna (chwilowa) impedancja jest stała (mamy wtedy ciągłość), tak jak w linii transmisyjnej o jednakowym przekroju.
4. Zapomnij, wyrzuć ze słownika słowo „uziemiaenie” (ground)! Przynosi to więcej problemów, niż daje rozwiązań. Każdy sygnał musi mieć ścieżkę powrotu. Myśl „ścieżka powrotu” i ćwicz swój umysł, intuicję w patrzeniu na układ, pod kątem właściwej ścieżki powrotu i dbaj o nią bardzo uważnie.
5. Prądy płyną przez kondensatory (pojemności) zawsze gdy następuje zmiana napięcia. Dla szybkich zboczy, nawet szczelina powietrzna pomiędzy płytką, a wiszącym kablem, może stanowić niską impedancję poprzez pojemność krawędziową pola.



Rysunek 3. Detekcja zaburzenia, które wnikało w tor, jako dodatkowy impuls przebiegu prostokątnego (błędny odbiór sygnału), źródło: <http://bit.ly/2MDKRp8>



Rysunek 4. Zwiększanie dokładności poprzez stosowanie bardziej precyzyjnych narzędzi

6. Indukcyjność jest zasadniczo związana z liczbą pierścieni linii sił pola magnetycznego otaczające płynący prąd. Jeśli liczba pierścieni linii pola kiedykolwiek się zmienia, z jakiegokolwiek powodu, zostanie wytworzone napięcie wzdłuż przewodu. To jest początek, źródło potencjalnego szumu z odbić, przesłuchów, szumu przełączenia, „pływania” potencjału odniesienia (ground bounce) i zakłóceń elektromagnetycznych (EMI).
7. „Pływanie” potencjału odniesienia, („ziemi, masy”, ground bounce) to napięcie powstające na przewodzie powrotnym masy (ziemi, ground), z powodu zmian prądów poprzez całkowitą indukcyjność ścieżki powrotu. To jest podstawa przyczyna szumów przełączenia i problemów EMI (EMC).
8. Szerokość pasma sygnału wyznacza najwyższa częstotliwość składowej fali sinusoidalnej składającej się na sygnał prostokątny. Ta szerokość modelu jest najwyższą częstotliwością przy której model nadal dokładnie pozwala przewidzieć właściwości połączeń. Nigdy nie używaj modelu w aplikacjach, gdzie szerokość sygnału jest wyższa niż szerokość pasma modelu. (red.: Model ma swoje ograniczenia, m.in. szerokość pasma, najwyższą częstotliwość dla której jest poprawny. Możemy go użyć tylko do analizy sygnałów mieszczących się w tych granicach).
9. Nigdy nie zapominaj (po za kilkoma wyjątkami) że każda formuła (wzór, zasada) używana w sygnal integrity jest albo definicją, albo aproksymacją (przybliżeniem). Jeśli dokładność jest kluczowa, nie używaj przybliżeń.
10. Problemem spowodowanym przez stratną linię transmisyjną jest zniekształcenie czasu narostu (zbrocza narastającego sygnału). Te straty rosną wraz z częstotliwością z powodu głębokości wnikania, efektu naskórkowości (skin depth) i strat dielektryka. Jeśli straty byłyby stałe w funkcji częstotliwości, czas narostu nie zmieniłby się i straty w linii były by tylko niewielką niedogodnością.

Najdroższą zasadą jest: problemy z sygnal integrity (też EMC) opóźniają wprowadzenie produktu na rynek (dostarczenie produktu).

Kiedy powinniśmy przejmować się Signal integrity i zacząć uwzględniać powyższe zasady?

Gdy pracujemy z sygnałami o częstotliwości powyżej 100 MHz (taktowanie) lub czasy narostów stają się krótsze niż 1 ns. To oznacza, że w urządzeniu czy systemie połączenia, ścieżki nie są obojętne, neutralne (przezroczyste) dla sygnałów. Wpływają na ich kształt, poziom i opóźnienia. A to prędzej czy później przyniesie jeden z trzech typów problemu:

1. Synchronizacja czasowa (czas, Timing).
2. Szumy, przesłuchy (Noise, crosstalk).
3. Zaburzenia i zakłócenia elektromagnetyczne (EMI).

Wszystkie problemy w High Speed design możemy zakwalifikować do czterech grup:

1. Jakość sygnałów:
 - Odbicia, zniekształcenia wynikające z nieciągłości impedancji.
 - Opóźnienia.
 - Tłumienie sygnału.
 - Dzwonienie, wzbudzenie.
2. Przesłuchy pomiędzy różnymi połączeniami:
 - Pojemność wzajemna.
 - Indukcyjność wzajemna.
 - Brak idealnej ścieżki powrotu.
3. Emisja promieniowana i przewodzona (EMI).
4. Problemy z dostarczeniem zasilania do komponentów (PDN – Power Distribution Network).

Problemy z wszystkich grup nasilają się gdy czas narostu staje się coraz krótszy. Czyli rośnie nam współczynnik dI/dt , czy dV/dt (Zmiana prądu w czasie; zmiana napięcia w czasie).

Były to ogólne wskazówki i wskazanie obszarów. Aby przejść do szczegółów trzeba by pokazać więcej fizyki zjawisk i wpływ poszczególnych struktur na impedancję układu. Jest to ważne aby móc zastosować zalecenia w swoich projektach. Jednak dla niecierpliwych, podam kilka zaleceń dotyczących layoutu, aby pokazać z czym możemy mieć styczność projektując układy w.cz.

Dla ścieżek zegarowych, poprawimy właściwości postępując zgodnie z następującymi wskazówkami:

- Utrzymuj ścieżki zegara na tyle proste jak się da.
- Używaj zaokrąglonych zmian kierunku (łuk, zamiast kąta prostego).
- Staraj się nie przechodzić sygnałem zegarowym przez różne warstwy.
- Unikaj przelotek (via) i linii zegara, ponieważ powodują one zmianę impedancji i odbicia.
- Umieść płaszczyznę referencyjną (ground plane) przy ścieżce z sygnałami (blisko). Jeśli prowadzisz wewnątrz PCB, użyj kanapki, umieszczając płaszczyzny po obu stronach.
- Stosuj terminowanie linii, co ograniczy odbicia.

Podsumowanie

Był to zaledwie wstęp do zagadnień związanych z projektowaniem układów pod kątem szybkich sygnałów, często wysokiej częstotliwości. Techniki stają się coraz bardziej wyrafinowane, a narzędzia coraz dokładniejsze. Główny wniosek jest prosty – im szybciej i dokładniej analizujemy, uwzględniamy zagadnienia Signal i Power integrity, tym większa szansa, że nasz produkt będzie działał poprawnie i spełni wymagania EMC już za pierwszym razem. Korzyści z uwzględnienia Signal Integrity od początku projektu są następujące:

- Krótszy i bardziej przewidywalny czas projektowania produktu.
- Skrócenie czasu prototypowania, testowania i ponownych iteracji.
- Zmniejszenie problemów z EMC.

Więcej informacji na konferencji i odbywających się w trakcie jej trwania warsztatach, w terminie od 11 do 12 października. Szczegółowe informacje dostępne są na stronie www.emc4b.com.

Tomasz Utkowski
Inżynier EMC, Konsultant Trener

Warto zajrzeć:

„Right the first time a practical handbook on high speed PCB and system design”, Lee W. Ritchey

- <http://bit.ly/2P7Xx4o>
- <http://bit.ly/2PLMLSu>
- <http://bit.ly/2oknSAR>
- <http://bit.ly/2NpV9FY>