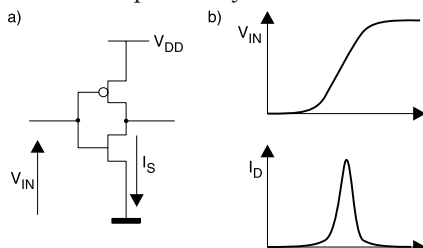


Zakłócenia elektromagnetyczne w projektach elektronicznych, część 1

Kompatybilność elektromagnetyczna - na samo hasło włos jeży się na głowie. To zupełnie jak z komarami, nie wiadomo właściwie po co są. O ile piękniejszy byłby świat bez nich. Niestety żadna czarodziejska różdżka nie zlikwiduje niepożądanych zakłóceń, trzeba z nimi walczyć samodzielnie i to dość solidnie.

Znak CE bez którego nie można zgodnie z literą prawa wprowadzić do sprzedaży żadnego produktu w Unii Europejskiej odnosi się do wielu parametrów towarów handlowych. Spotykamy go zarówno na dziecinnych pluszakach, jak i skomplikowanym sprzęcie elektronicznym. Jednymi z ważniejszych i jednocześnie chyba najtrudniejszymi do spełnienia są normy dotyczące tzw. kompatybilności elektromagnetycznej urządzeń elektronicznych. Określają one m.in. dopuszczalny poziom emisji zakłóceń elektromagnetycznych emitowanych przez każde urządzenie.

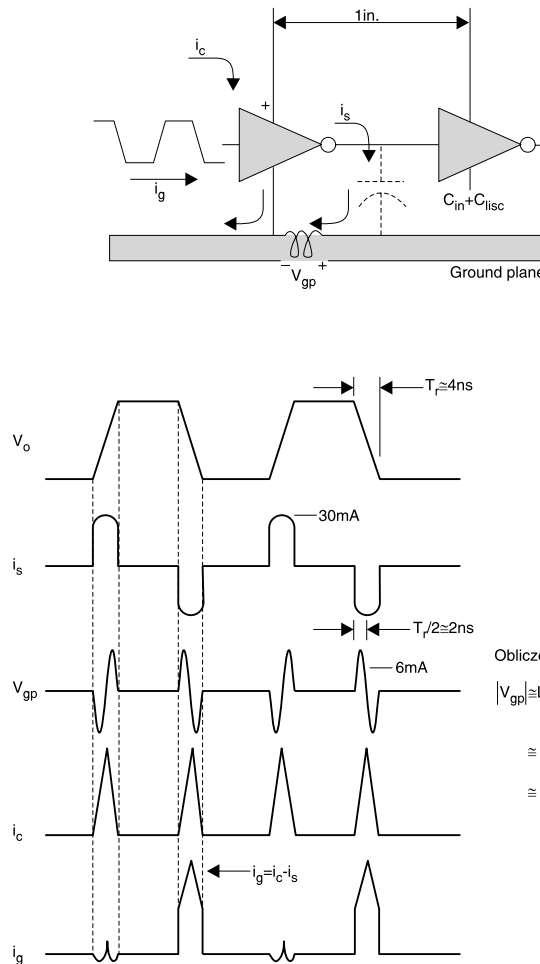
Można zaryzykować twierdzenie, że zjawisko EMI (*ElectroMagnetic Interference*) jeszcze do niedawna nie było dostatecznie rozpoznane. Narzucenie rygorystycznych wymagań na urządzenia elektroniczne spowodowało, że w ostatnich latach wiele instytutów naukowych wyraźnie zintensyfikowało prace badawcze w tej dziedzinie. Tymczasem jeszcze do lat 80. sądzono, że za emisję zakłóceń elektromagnetycznych odpowiadają jedynie przewody zewnętrzne dołączone do płytki z obwodem drukowanym, przez które „przepuszczane” są sygnały użytkowe występujące w układzie. Zakłócenia w ścieżkach uważano za pomijalne. Boom komputerowy końca lat 80.



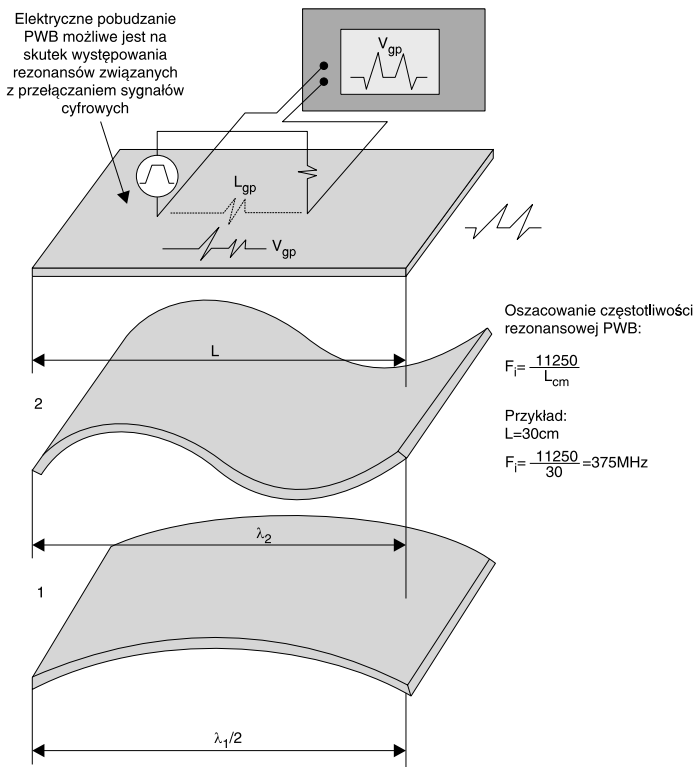
Rys. 1. Typowy stopień wyjściowy układu CMOS

spowodował, że stało się konieczne i jednocześnie możliwe opanowanie teorii EMI w stopniu pozwalającym modelować to zjawisko na komputerach. Dzięki temu odpowiednie procedury coraz częściej można znaleźć w programach CAD/CAM. To z kolei pozwoliło poprawić jakość projektowania obwodów drukowanych (PWB - *Printed*

Wiring Boards). Chyba nikogo nie trzeba przekonywać o korzyściach, jakie może przynieść symulacja pracy płytki na etapie prac projektowych, bez konieczności jej fizycznego montowania. Ze względu na duży koszt stosownego oprogramowania w dalszym ciągu nie wszyscy konstruktorzy korzystają jednak z tych dobrodziejstw, a projek-



Rys. 2. Zjawiska zachodzące podczas przełączania stanów w układzie cyfrowym umieszczonym na płytce drukowanej



Rys. 3. Model rezonansu płytki drukowanej

towanie obwodów drukowanych nadal często odbywa się metodą prób i błędów. Problem emisji zakłóceń elektromagnetycznych pozostaje w związku z tym dość powszechnie ignorowany przez projektantów.

Szum płaszczyzny masy

Wydawać by się mogło, że rozprowadzanie masy dużą, oblewającą wszystkie ścieżki powierzchnią jest rozwiązaniem idealnym i nie posiadającym z punktu widzenia zakłóceń żadnych wad. W świecie realnym nie ma jednak rzeczy idealnych, a przekonujemy się o tym najczęściej w sposób bardzo dla nas niemiły. Miedziana powierzchnia masy stanowiąca teoretycznie punkt odniesienia o jednakowym potencjale dla wszystkich sygnałów występujących na płytce drukowanej nie wykazuje w rzeczywistości idealnych, jednorodnych parametrów. Nawet z pozoru pomijalne wartości pasywnych rezystancji lub indukcyjności mogą spowodować, że powierzchnia ta będzie źródłem trudnych do opanowania zakłóceń. Przyczyną tego zjawiska jest szum, który można zaobserwować w poszczególnych punktach masy, mogący skutecznie wysterować dołączone do płytki przewody i w konsekwencji spowodować emisję zakłóceń. Szum ten jest wynikiem przepływu przez masę tzw. prądu współbieżnego.

Generalną, a przy tym dość intuicyjną zasadą dla projektanta PWB chcącego ograniczyć emisję zakłóceń, jest minimalizacja długości ścieżek sygnałowych oraz odpowiednie ich rozplanowanie na PWB. Na ostateczny poziom emisji zakłóceń do otoczenia ma również wpływ rodzaj obudowy. Jeśli zastosowano metalowe *chassis*, to należy pamiętać, aby było ono połączone z płaszczyzną masy PWB tylko w jednym punkcie. Lokalizacja tego punktu na płycie może mieć również wpływ na poziom emitowanych zakłóceń. W chwili obecnej optymalizację wszystkich powyższych parametrów daje się przeprowadzić metodami symulacji komputerowej, za pomocą odpowiedniego oprogramowania.

Drgająca płytka

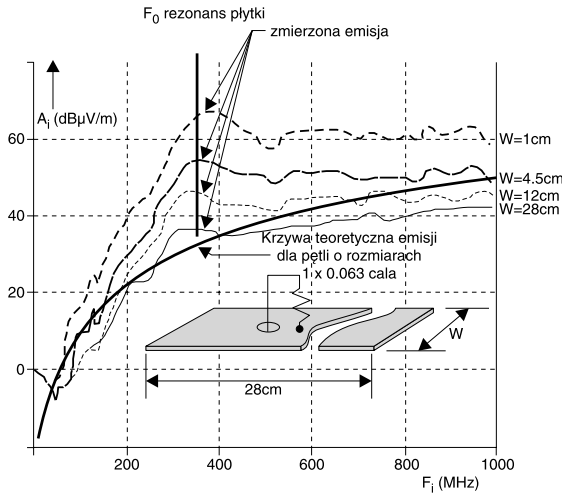
Nie chodzi rzecz jasna o drgania mechaniczne. Rozpatrujemy generowanie promieniowania elektromagnetycznego na skutek występowania rezonansów wewnętrznych wywołanych przez sygnały elektryczne występujące w ścieżkach obwodu drukowanego.

Zabrzmiało dość tajemniczo, o co więc chodzi? Każdą ścieżkę można rozpatrywać jako połączenie wielu elementarnych odcinków, z których każdy może być traktowany jako pewien rzeczywisty element o określonej rezystancji i indukcyjności. Na elementy te będą oddziaływały sygnały występują-

ce na płytce, szczególnie „niebezpieczne” będą impulsy szpilkowe powstałe w wyniku przełączania układów cyfrowych. Przyjrzyjmy się typowemu stopniowi wyjściowemu bramki logicznej CMOS (rys. 1a). Jest on zbudowany z dwóch komplementarnych tranzystorów MOS (jeden z kanałem typu „p”, drugi z kanałem typu „n”). Teoretycznie zawsze jeden tranzystor jest tu wyłączony, a drugi włączony. Taka budowa powoduje, że w układzie tym nigdy nie popłynie prąd (przy braku obciążenia lub jego nieskończonej rezystancji wyjściowej). Niestety, po raz kolejny okazuje się, że życie jest brutalne. W rzeczywistości tranzystory nie zmieniają swojego stanu w nieskończenie krótkim czasie, a w związku z tym istnieje pewna faza ich pracy, w której jeden tranzystor jeszcze się nie zdąży wyłączyć, a drugi włączyć. W takim stanie ze źródła zasilającego do masy popłynie krótki impuls prądowy (rys. 1b), który wytworzy na elementarnym odcinku ścieżki masowej szpilkę napięciową V_{gp} . Szpilki takie będą wytwarzane przez każdy z funkcyjnych logicznych znajdujących się na płytce (rys. 2). Na skutek niezerowej indukcyjności elementarnych odcinków ścieżek, szpilki te będą się indukowały na całej płaszczyźnie masy PWB. Mierząc różnicowe napięcie w wybranych punktach płytki zauważymy, że będzie się ono zmieniało w sposób zbliżony do przypadkowego (w rzeczywistości będzie wynikało z występowania dużej zawartości harmonicznych związanych z krótkimi szpilkami generowanymi podczas przełączania wszystkich

Prąd współbieżny I_{CM}

Common-mode Current - dla lepszego zrozumienia, jak powstaje ten prąd, wyobraźmy sobie urządzenie posiadające jeden sygnał wyjściowy, który należy wyprowadzić np. poprzez jakieś złącze. Złącze to będzie posiadało dwa wyprowadzenia - jedno dla przewodu sygnałowego („gorącego”), drugie dla sygnału powrotnego („ground”). W układzie idealnym, w każdym z przewodów dołączonych do tych wyprowadzeń prąd będzie płynął w przeciwnych kierunkach i będzie miał tę samą wartość. W układzie rzeczywistym, na skutek różnych zjawisk (np. niemożliwości jednoznacznego określenia punktu odniesienia, co wynika z nieidealnych parametrów płaszczyzny masy) występuje składowa prądu, która w obu przewodach płynie w tym samym kierunku. Składowa ta nazywana jest prądem współbieżnym. Prąd współbieżny stanowi jedną z ważniejszych przyczyn generowania niepożądanego promieniowania elektromagnetycznego w urządzeniach elektrycznych/elektronicznych.



Rys. 4. Zależność rezonansu płytki drukowanej od jej szerokości i długości

sygnałów cyfrowych występujących na płytce). Dokładna analiza zjawiska doprowadza nas do wniosku, że z sieci elementarnych indukcyjności i pojemności występujących na płytce można stworzyć jeden, zastępczy obwód rezonansowy, a to z kolei oznacza, że płytka może być wprowadzona w stan rezonansu. Wzbudzenie płytki możliwe jest przy tym na częstotliwościach odpowiadających wielokrotnościom połowy długości fali (1/2, 1, 3/2,...) mieszczącym się w długości płytki (rys. 3). Dla tych częstotliwości występuje rezonans główny, lecz gdy dokładniej przyjrzymy się „pracy” PWB, to okaże się że oprócz niego widoczne są również lokalne rezonanse, które nie wynikają już z wymiarów płytki (rys. 4). Na rys. 5 przedstawiono relacje empiryczne pomiędzy poziomem emisji zakłóceń i rozmiarami płytki (długością i szerokością). Jak widać, wymiar płytki liczony wzdłuż przebiegu sygnału elektrycznego, określany jako długość wpływa na częstotliwość rezonansową PWB, natomiast szerokość decyduje o poziomie emisji zakłóceń. Można zauważyć, że każde zmniejszenie szerokości płytki o połowę spowoduje przyrost emisji o 6 dB.

Spróbujmy teraz oszacować ilościowo skalę opisywanego zjawiska. Na rys. 2 przedstawiono dwie połączone ze sobą bramki logiczne, które zostaną poddane analizie. W tym przypadku konieczne jest uwzględnienie zarówno indukcyjności elementarnych odcinków płaszczyzny masy, jak i pojemności widocznych od strony wyjścia bramki. Założono, że bramka jest sterowana przebiegiem prostokątnym o zboczach charakteryzujących się czasami narastania i opadania równymi 4 ns. Na każdym zboczach sygnału wyj-

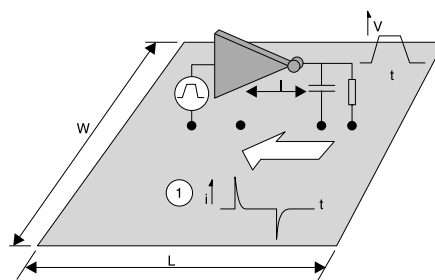
ściowego bramki następuje przeładowanie pojemności widocznej od strony jej wyjścia. Powoduje to powstanie dodatnich i ujemnych impulsów prądowych i_s o czasie trwania równym 4 ns. Obserwujemy również krótkie szpilki napięciowe V_{gp} zaindukowane na odcinkach ścieżek L_{gp} . Każda taka szpilka ma szerokość równą $t_i/2$. Przy założeniu, że indukcyjność połączenia jest równa 0,4 nH, amplituda szpilki została oszacowana na ok. 6 mV (peak). Szpilki takie będą występowały w każdym punkcie płytki, trudno rozpatrywać każdą z nich indywidualnie. Najlepszą metodą globalnej oceny zjawiska będzie oszacowanie napięcia różnicowego mierzonego np. w dwóch przeciwnych punktach obwodu drukowanego. W dostępnej literaturze po-

daje się, że napięcie to może przekraczać wartość 200 mV. Specjaliści oceniają, że uzyskanie napięć szczytowych rzędu 150...200 mV jest dobrym wynikiem. Na skutek przypadkowego charakteru zjawiska zaobserwujemy ciągłą fluktuację tego napięcia. Zjawisku temu nadano w związku z tym nazwę „board bounce” (drgająca płytka). Przypisanie efektowi drgającej płytki charakteru przypadkowości jest jak już wiemy pewnym uproszczeniem. W istocie „drżania” są przecież wywołane przebiegami cyfrowymi występującymi na PWB, a te w dużym stopniu zależą np. od częstotliwości stosowanego w konkretnym układzie synchronicznym przebiegu zegarowego. Swoją rolę wywierają również wszelkie sygnały asynchroniczne oraz harmoniczne każdego z przebiegów.

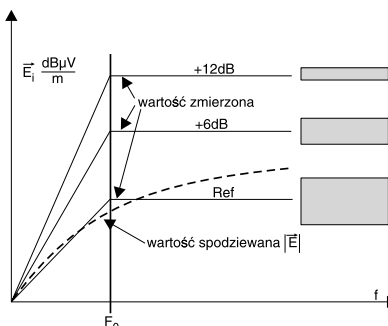
Jarosław Doliński, EP
jaroslaw.dolinski@ep.com.pl

Materiały źródłowe:

- ♦ <http://www.devicelink.com/mem/archive/98/10/007.html>
- ♦ <http://www.ewh.ieee.org/r5/denver/rockymountainemc/archive/2003/december/dec04/PartialInductance.pdf>
- ♦ <http://www.bogent.com/PDFs/PCDGndBounce.pdf>
- ♦ <http://www.murata.com/emc/knowhow/pdfs/te04ea-1/26to28e.pdf>
- ♦ <http://www.bolton.ac.uk/mind/corep/emissions/emissions.html>
- ♦ <http://www.bravelectro.com/html/stetnemt.html>
- ♦ <http://www.sss-mag.com/pdf/ad9.pdf>
- ♦ http://www.atmel.com/dyn/resources/prod_documents/doc4279.pdf



W - szerokość płytki. Zmniejszając W powodujemy wzrost emisji zakłóceń. Poziom emisji zależy od stosunku 20log(L/W).



L - długość płytki. Parametr ten narzuca częstotliwość rezonansową. Poprzez obecność licznych harmonicznych w widmie przełączanych sygnałów cyfrowych płytka może być łatwo pobudzona. Częstotliwość rezonansowa (F_0) jest wyrażona zależnością:

$$F_0 \text{ MHz} = \frac{11250}{L_{cm}}$$

Rys. 5. Model emisji zakłóceń przez PWB