

EMISJA ELEKTROMAGNETYCZNA Z UKŁADÓW SCALONYCH

Układy scalone mogą być źródłem zaburzeń elektromagnetycznych promieniowanych lub przewodzonych.

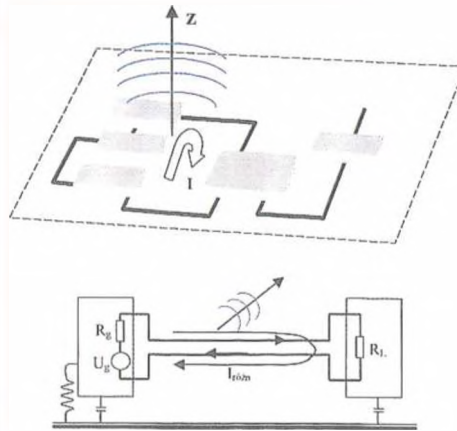
Konieczność uwzględnienia zasad kompatybilności elektromagnetycznej w projektowaniu, wykonawstwie i eksploatacji urządzeń i systemów elektronicznych nie budzi obecnie wątpliwości wśród zdecydowanej większości inżynierów i techników elektroników. Zajmowanie się jednak sprawą emisji elektromagnetycznej już na poziomie układów scalonych może jeszcze powodować pewne zdziwienie. Pomijając bowiem półprzewodnikowe przyrządy dużej mocy, w większości scalonych układów cyfrowych, płyną podczas ich funkcjonowania prądy nie przekraczające 1 A, np. rzędu dziesiątek lub setek miliamperów. Jak zatem układy scalone mogą stanowić źródło zaburzeń elektromagnetycznych – promieniowanych lub przewodzonych (konduktywnych), które byłyby w stanie zakłócić pracę innych elementów w układzie lub urządzeniu? Aby odpowiedzieć na to pytanie, weźmy na razie pod uwagę sytuację mającą miejsce w przypadku modułów (bloków funkcjonalnych, pakietów) elektronicznych na płytkach drukowanych.

Emisje elektromagnetyczne z płytek drukowanych

Obwody elektryczne na płytce drukowanej, utworzone przez zamontowane na niej układy scalone, współpracujące z nimi elementy bierne i ścieżki połączeń oraz przewody doprowadzające zasilanie, linie sygnałowe i wyprowadzenia sygnałów wyjściowych – mogą być źródłem emisji elektromagnetycznej. Jest to spowodowane aktywnością funkcjonalną układów scalonych i przepływem sygnałów elektrycznych zmiennych w czasie.

Główną przyczyną powstawania zaburzeń elektromagnetycznych o charakterze sygnałów różnicowych (symetrycznych) w systemach z przewodem dosyłowym i powrotnym (występowanie różnic potencjału między tymi przewodami), są w przypadku

plytek drukowanych pętle układowe z przepływającym w nich prądem (rys. 1). Pętla prądowa działa podobnie do małej anteny ramowej, wytwarzając w bliskim otoczeniu pole elektromagnetyczne z dominującą składową magnetyczną. Jako małą można uznać taką antenę pętlową, której rozmiary są mniejsze od 1/4 długości fali promieniowanego sygnału (ok. 100 cm przy 75 MHz i odpowiednio 10 cm przy 750 MHz).



Rys. 1. Schemat emisji zaburzeń elektromagnetycznych o charakterze sygnałów różnicowych z przewodem dosyłowym i powrotnym

Jeżeli powierzchnia pętli wynosiłaby około kilkunastu cm^2 , a przepływający prąd był rzędu dziesiątek miliamperów, to na częstotliwości powyżej 30 MHz poziomy zaburzeń mogą już być wyższe niż dopuszczalne w normie europejskiej EN 55022 dla urządzeń klasy B, przeznaczonych do użytku domowego. W takich przypadkach należałoby dążyć do zmniejszenia częstotliwości sygnału użytecznego i zmniejszenia wartości przepływających prądów oraz do ograniczenia powierzchni pętli prądowej. Jeżeli nie byłoby to możliwe, np. ze względów konstrukcyjnych, należałoby rozważyć zastosowanie ekranowania.

Z kolei zaburzenia o charakterze sygnałów wspólnych (wzdłużnych, niesymetrycznych), powstające w systemach zawierających kable i przewody, stanowiące drogę dosyłową sygnału, oraz płaszczyznę odniesienia (masę), przez którą przepływają sygnały powrotne, są wywołane przez wystąpienie w układzie niepożądanych spadków

napięć. Mogą one być związane np. z różnicą napięć między płaszczyzną odniesienia (lokalną masą) a masą układu lub urządzenia (rys. 2). Zaburzenia wspólne o większych częstotliwościach są wypromieniowywane ze źródła, przy czym nie przez samą płytkę, lecz przez dołączone do niej przewody i kable, które można traktować jako anteny prętowe. Częstotliwości emitowanych zaburzeń mają związek z rezonansami własnymi kabli, występującymi powyżej kilkudziesięciu megaherców. Drogi przepływu prądów wspólnych w układach są trudne do przewidzenia i mogą się zamykać do masy przez elementy pasożytnicze, głównie pojemnościowe. Mogą one indukować w pewnej odległości od układu scalonego podobne natężenia pola co i prądy różnicowe, ale nawet przy znacznie mniejszych wartościach (np. aż ponad tysiąc-krotnie mniejszych) niż w poprzedniej sytuacji, związanej z występowaniem prądów różnicowych.

Emisje z układów scalonych

Opracowanie i zastosowanie w praktyce tak złożonych układów scalonych jak mikroprocesory, mikrokontrolery, cyfrowe procesory sygnałów i różnorodnie specjalizowane układy scalone (ASIC), które działają z dużą szybkością i pobierają przejściowo znaczne prądy zasilania spowodowało, że układy takie trzeba traktować pod względem emisji zakłóceń podobnie jak poprzednio płytki drukowane z modułami elektronicznymi. Zaburzenia wytwarzane wewnątrz układów scalonych pochodzą zwykle od odbić sygnałów na indukcyjnych i pojemnościowych nieciągłościach i zakończeniach wewnętrznych linii transmisji sygnałów, od sprzężeń między sąsiednimi obwodami lub ścieżkami połączeń, a także od przetężeń obwodów. Te przyczyny, a zwłaszcza szybkie zmiany napięć i prądów w wewnętrznych obwodach układu scalonego, w których występują pętle prądowe, powodują właśnie bezpośrednią emisję sygnałów elektromagnetycznych ze struktury – przez przewodzenie i wypromieniowanie tych sygnałów poza obudowę układu scalonego. Podobnie jak w przypadku płytek drukowanych, występuje tu także emisja wynikająca z promieniowania przewodów i kabli dołączonych do

układu scalonego, a w zasadzie do jego portów wejściowo-wyjściowych i współpracujących zewnętrznych obwodów peryferyjnych. Może ona być związana z fluktuacją różnicy napięć między płaszczyzną odniesienia (masą) na płytce drukowanej a potencjałem odniesienia U_{SS} i zasilaniem U_{DD} w układzie scalonym (*ground and supply bounce*), rys. 3.

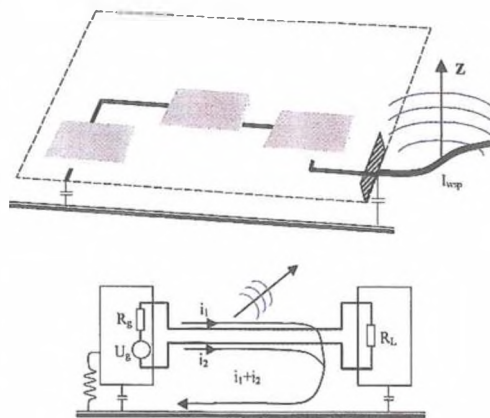
Poziomy mocy przenoszona przez falę elektromagnetyczną wypromieniowaną z układu scalonego i jego połączeń mogą być na tyle duże, żeby w przewodach łączących z innymi obwodami lub układami zaindukować napięcia zakłócające ich pracę. W przypadku dobrej jakości mikrokontrolerów obserwowane były poziomy mocy promieniowania w granicach od -110 dBm (ok. 1 pW) do -75 dBm (ok. 70 μ W), występujące w paśmie $1 \div 1000$ MHz. Trzeba jeszcze dodać – co jest dość oczywiste, że wartości te są znacznie różnicowane w odniesieniu do różnych rodzajów układów. Mniej oczywiste jest natomiast występowanie różnic i to nawet 30 dB (1000 -krotnie w jednostkach mocy), w zależności od producenta i zastosowanych procesów technologicznych dla funkcjonalnie takich samych układów scalonych, pracujących w tych samych warunkach.

Poziomy emisji są najwyższe w pobliżu kwarcu i generatora zegarowego oraz buforów wyjściowych. Praktycznym zaleceniem jest więc nie instalowanie w pobliżu tych obwodów lub ponad nimi szczególnie wrażliwych innych podzespołów elektronicznych. Zaleca się także stosowanie elementów odsprężających - zwykle w formie kondensatorów tantalowych i ceramicznych umieszczanych jak najbliżej "odszumianego" układu scalonego.

Jak mierzy się emisje układów scalonych?

Podczas pomiarów emisji elektromagnetycznej układy scalone powinny pracować w warunkach zbliżonych do tych, które się przewiduje w praktycznych zastosowaniach. W przypadku układów programowalnych może to spowodować potrzebę napisania specjalnych programów wykonywanych w pętli, aby zapewnić powtarzalne warunki badań. Ilustrację kierunków pola magnetycznego i elektrycznego, wytwarzanych przez wyprowadzenia pracującego układu scalonego przedstawiono na rys. 4.

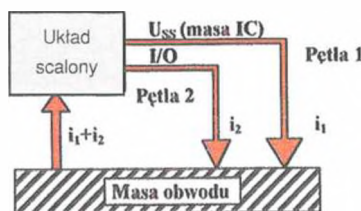
Za stosunkowo najbardziej dokładne, ale też i drogie, uznać można metody elektrooptyczne. Stosuje się tu spójną wiązkę promieniowania laserowego i kształtki materiałów, odchylające tę wiązkę o kąt proporcjonal-



Rys. 2. Schemat emisji zaburzeń o charakterze sygnałów wspólnych z obwodów zawierających kable i przewody stanowiące drogę dosytną sygnału oraz płaszczyznę odniesienia (masę) będącą drogą sygnałów powrotnych.

ny do natężenia składowej elektrycznej lub magnetycznej pola elektromagnetycznego. Natomiast wśród metod stosowanych w technice bierze się pod uwagę następujące:

1. Metoda z wykorzystaniem komory TEM lub GTEM (z poprzecznym polem elektromagnetycznym, wytworzonym w objętości powstałej z rozwinięcia przewodu współosiowego do obiektu o przekroju kwadratowym lub prostokątnym o znacznych rozmiarach geometrycznych); pomiary szerokopasmowe (np. od 150 kHz do 1000 MHz) obu składowych pola, odczyt wartości przy użyciu analizatora widma.
2. Metoda z wykorzystaniem sondy pętlowej (jako anteny ramowej) o niewielkich rozmiarach; pomiar składowej magnetycznej w paśmie od 1 do 1000 MHz.
3. Metoda z wykorzystaniem sondy o dużej impedancji (z tranzystorem polowym na wejściu) i płaszczyzny przewodzącej sprzężonej pojemnościowo z badanym układem scalonym; pomiar składowej elektrycznej. Dla ułatwienia pomiarów, zmierzone wartości przelicza się zwykle na uniwersalny wskaźnik natężenia pola, np. moment dipola elektrycznego i lub magnetycznego. Spośród podanych trzech metod pomiaru emisji elektromagnetycznej promieniowanej



Rys. 3. Przykładowe pętle prądu w.cz. zamykające się przez obwód masy obwodu elektrycznego

z układów scalonych, pierwsze dwie są rekomendowane przez Międzynarodową Komisję Elektrotechniczną IEC.

Odrębną sprawą jest pomiar zaburzeń generowanych przez układ scalony, które przez port wejściowy, wyjściowy i związany z liniami zasilania rozchodzą się drogą przewodzenia jako prądy w.cz. w obwodach związanych z poszczególnymi jego wyprowadzeniami.

W przypadku pomiarów zaburzeń rozchodzących się przewodami, praktyczne znaczenie mają – również zalecane przez IEC – metody polegające na pomiarze prądów w.cz. w obwodach połączonych z poszczególnymi wyprowadzeniami układu scalonego, bardzo często na liniach zasilania. Pomiary takie prowadzi się mierząc spadek napięcia na wtrąconym w obwód małym rezystorze (1 Ω) lub stosując sondę magnetyczną umieszczoną nad danym wyprowadzeniem lub ścieżką na płytce drukowanej. Zaburzenia przewodzone można także zmierzyć w tzw. małej klatce Faraday'a, mającej formę metalowej skrzynki o wymiarach $500 \times 300 \times 150$ mm, wyposażonej w odpowiednie przepusty, filtry i elementy dopasowujące. We wszystkich tych trzech metodach, z sondami i czujnikami pola, współpracują analizatory widma i oscyloskopy.

Wnioski praktyczne dla projektujących układy elektroniczne

Znajomość natury oraz przyczyn powstawania zaburzeń elektromagnetycznych pozwala zrozumieć zjawiska zachodzące w pracującym obwodzie elektrycznym i wyeliminować te, które są niekorzystne. Dlatego właśnie w celu opracowania obwodu elektrycznego, który nie będzie zaburzał pracy innych elementów na płytce drukowanej lub podzespołów, należy już na etapie projektowania przyjąć kilka podstawowych zasad konstrukcyjnych i konsekwentnie je przestrzegać:

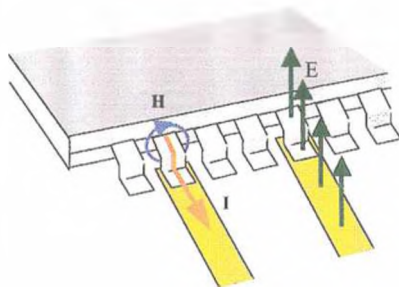
□ Na etapie wstępnego projektowania urządzenia należy wybierać takie układy scalone, o których wiadomo, że emitują najmniejsze zakłócenia przy podobnych parametrach funkcjonalnych – wybór właściwej rodziny układów scalonych. Jeżeli nie ma wiarygodnych danych, należy zdecydować się na wyroby takiego producenta, który jest znany z tego, że wprowadza do swoich wyrobów zmiany technologiczne obniżające poziom emitowanych zakłóceń i oferuje specjalnie opracowane serie układów o małej emisji i zwiększonej odporności na zakłócenia.

❑ Urządzenie powinno być tak zaprojektowane, żeby żaden z jego elementów nie pracował z większą prędkością (częstotliwością) niż jest to konieczne.

❑ Impulsy wytwarzane w obwodzie elektrycznym powinny charakteryzować się możliwie długim czasem narastania i opadania oraz łagodnym przebiegiem zboczy.

❑ System połączeń na płycie drukowanej powinien być tak zaprojektowany, żeby ścieżki lub przecięcia z liniami o dużych sygnałach zaburzających były jak najdalej odsunięte od pozostałych ścieżek i elementów tego obwodu elektrycznego. Jeżeli jest to konieczne, należy zastosować ekranowanie takich ścieżek.

❑ Masy lokalne poszczególnych modułów np. analogowych, cyfrowych lub dużej mocy, podobnie jak i same moduły, powinny być oddzielone od siebie, dzięki czemu ogranicza się rozptył zaburzeń przewodzonych po całym urządzeniu; w zakresie



Rys. 4. Kierunek pól (magnetycznego H i elektrycznego E) generowanych przez pracujący układ scalony

w.c.z. zaleca się stosowanie uziemienia wielopunktowego.

❑ Przewody dosyłowe i powrotne powinny być jak najbliżej siebie, dzięki czemu emitowane zakłócenia przez każdy z nich wzajemnie się kompensują.

❑ Wiązki prowadzące przewody dosyło-

we i powrotne różnych modułów powinny być możliwie jak najdalej od siebie, a jeżeli jest to konieczne, nawet ekranowane.

❑ Układy scalone należy odsprzęgać dla zakłócających sygnałów w.c.z. przez równoległe połączenie kondensatorów tantalowych i ceramicznych.

❑ Przydatne może być zastosowanie rozwiązań sprzętowo-programowych, np. układów monitorujących typu *watch-dog*.

❑ Po wykonaniu prototypu projektowanego urządzenia lub złożonego układu scalonego, należy przeprowadzić badania poziomu emitowanych zaburzeń, np. jedną z wyżej przedstawionych metod. Jeżeli poziom zakłóceń jest zbyt duży, należy spróbować ustalić przyczyny i zaproponować poprawki lub ewentualnie zasięgnąć opinii specjalistów. ■

**Jerzy F. Kołodziejcki,
Juliusz Szczęsny**