

# „Masa” problemów z obwodami zasilania na płytках PCB

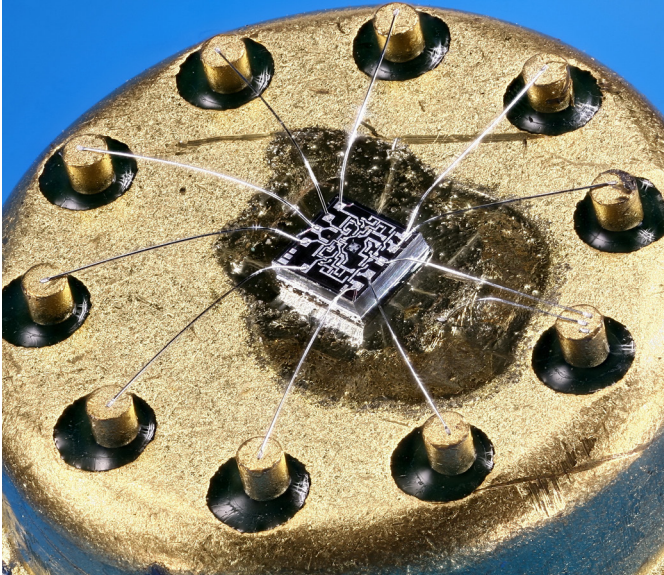
## Prawidłowe prowadzenie obwodu masy na płytках PCB układów cyfrowo-analogowych

*Nieskomplikowane układy, realizujące proste funkcje, nie stawiają dużych wymagań przed projektantem obwodu PCB i będą działały po wykonaniu wszystkich połączeń między elementami. Jednak już takie układy, jak wzmacniacz audio czy przetwornica impulsowa, mogą przysporzyć wielu problemów związanych z prowadzeniem ścieżek na PCB. Prawidłowe projektowanie płytek drukowanych od zawsze miało w sobie element sztuki. Obecnie sytuacja się nie zmieniła, szczególnie w odniesieniu do coraz mniejszych systemów, gdzie w ramach jednej płytki integrowane są obwody zasilania, analogowe i cyfrowe.*

Obwód masy jest jednym z kluczowych potencjałów na płytce drukowanej, chociaż niewiele może na to wskazywać. Napięcie definiowane jest jako różnica potencjałów elektrycznych pomiędzy dwoma punktami – w przypadku systemów elektronicznych domyślnie przyjmuje się masę za jeden z nich. Poziom ten oznaczamy GND i jest on odniesieniem dla wszystkich napięć w systemie. Dlatego istotne jest, aby masa była stabilna, pozbawiona zakłóceń i o możliwie niskiej impedancji (tzw. powrocie), dla prawidłowego dostarczania zasilania.

Spełnienie wszystkich założeń nie jest łatwe, a komplikuje się jeszcze bardziej, gdy mamy do czynienia z układami scalonymi, które mają dwa (lub więcej) osobne wyprowadzenia masy. Najczęściej są one określane jako masa cyfrowa DGND (*Digital GND*) oraz analogowa AGND (*Analog GND*), ale można spotkać inne określenia, jak i systemy, które mają jeszcze większą liczbę domen masy.



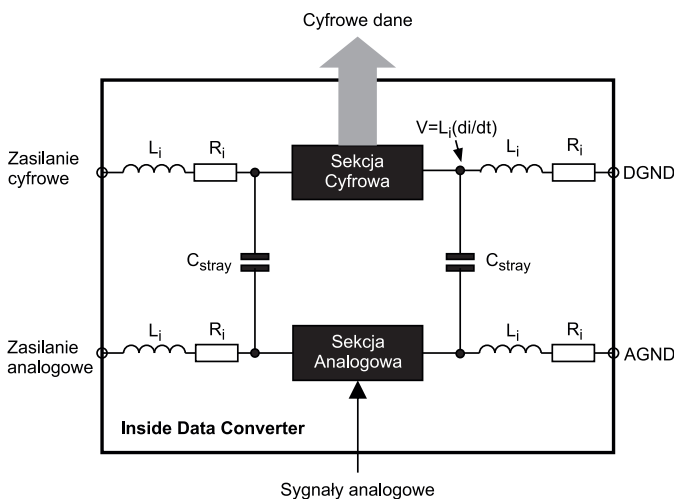


Fotografia 1. Wnętrze układu scalonego (<https://bit.ly/3niSjEz>)

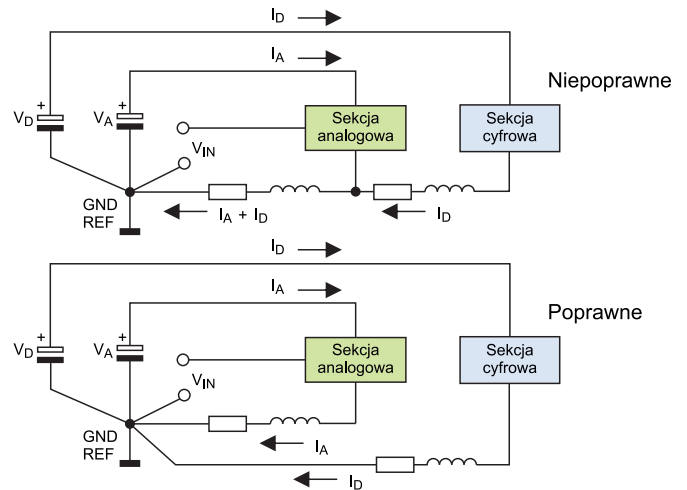
W poniższym artykule spróbujemy odpowiedzieć na pytanie, jak radzić sobie z obwodem zasilania dla elementów, które mają więcej niż jedną domenę masy.

### Dlaczego układy mają dwie domeny masy?

Układ scalony złożony jest, w dużym uproszczeniu, ze struktury półprzewodnikowej umieszczonej na specjalnej ramce i obudowy, w której zamknięta jest cała konstrukcja. Na **fotografii 1** pokazano układ scalony (tutaj w metalowej obudowie TO) przed zamknięciem w obudowie. Widoczne są cienkie druczki łączące pola na strukturze krzemowej z nóżkami układu. Niemalże każdy element półprzewodnikowy wykonany jest w ten sposób. Cienkie połączenia, łączące piny zewnętrzne układu z polami na strukturze krzemowej, mają relatywnie wysoką rezystancję, więc przy przepływie dużych prądów może wytwarzać się na nich istotny spadek napięcia. W przypadku systemów cyfrowych, szczególnie logiki TTL czy CMOS, gdzie impulsowy pobór prądu może mieć znaczne wartości, powoduje to powstawanie zakłóceń, tzw. szumu, w systemie – ponieważ na potencjale masy występuje dodatkowe napięcie (wynikające ze spadku napięcia na doprowadzeniu do układu). Taki sam spadek dotyczy wszystkich napięć, które są mierzone względem tego potencjału masy. Dodatkowo sprawę pogarsza fakt, że druczki tworzące połączenia w układzie mają też swoją indukcyjność, co jeszcze bardziej zwiększa spadki napięcia dla prądów impulsowych.



Rysunek 1. Model sieci zasilania we wnętrzu scalonego układu mieszane, np. przetwornika analogowo-cyfrowego (<https://bit.ly/3a5s9Bx>)



Rysunek 2. Schemat ideowy systemu mieszane z dwoma osobnymi masami, cyfrową i analogową, połączonymi w zasilaczu; u góry rozwiązanie niepoprawne, poniżej poprawne (<https://bit.ly/3qLQ4f4>)

Układy logiczne, z setkami miliwoltów odstępu pomiędzy dwoma dyskretnymi stanami logicznymi, są odporne na zakłócenia. Z drugiej strony, obwody analogowe są dość podatne na zakłócenia, zarówno na szynach zasilających, jak i w potencjale masy. Dlatego też rozdziela się masy analogowe i cyfrowe w układach scalonych. Powołała to uniknąć przenikania do czułych sekcji analogowych zakłóceń, wytwarzanych przez systemy cyfrowe. Model sekcji zasilania układu mieszane, uwzględniający pasożytnicze wartości, pokazano na **rysunku 1**, gdzie  $L_i$  to indukcyjność doprowadzenia,  $R_i$  to rezystancja doprowadzenia, a  $C_{stray}$  to pojemność pasożytnicza, sprzęgająca ze sobą domeny cyfrową i analogową.

Jeśli system mieszane (analogowo-cyfrowy) o dużej dokładności ma zapewnić wygórowane parametry, konieczne jest zastosowanie w nim oddzielnych linii dla analogowych i cyfrowych mas oraz oddzielnych zasilaczy (problem w przypadku linii zasilania jest analogiczny do przypadku masy).

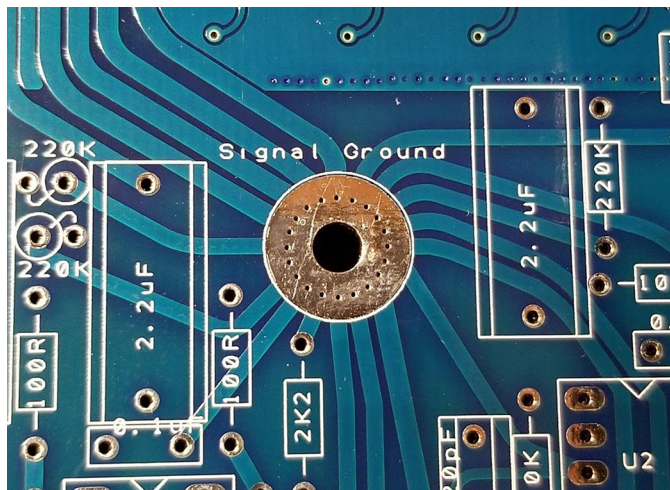
Masy analogowe i cyfrowe muszą w pewnym momencie zostać połączone, aby umożliwić odniesienie sygnałów do wspólnego potencjału. Ten punkt wspólny musi być starannie dobrany, aby nie wprowadzać prądów cyfrowych do masy części analogowej. Często najwygodniej jest dokonać takiego połączenia w sekcji zasilania. Przykład takiego systemu pokazano na **rysunku 2**.

### Wylewki masy

Istnieje wiele topologii, stosowanych do prowadzenia ścieżek masy w układach elektronicznych. Ich dobór jest zależny od wielkości i poziomu skomplikowania PCB, a także od rodzaju systemu, dla jakiego projektowana jest płytki. Układy analogowe wymagają dużo większej dbałości o prowadzenie masy, w porównaniu do elementów cyfrowych.

W idealnym przypadku powinno się stosować tzw. masę gwiazdzistą (**fotografia 2**). Jest to układ, w którym wszystkie ścieżki masy od poszczególnych elementów spotykają się w jednym punkcie. Filozofia uziemienia w tej topologii opiera się na założeniu, że wszystkie napięcia w obwodzie odnoszone są do pojedynczego punktu masy, znanego jako środek gwiazdy. Analogia wizualna do gwiazdy jest tutaj w pełni zasadna – wiele ścieżek rozciągających się promieniście od wspólnego punktu masy przypomina kształtem gwiazdę.

Praktyka pokazuje, że w większości systemów elektronicznych stosowanie dyskretnych ścieżek masy dla każdego punktu w systemie jest wysoce niepraktyczne, jeśli nie wręcz niemożliwe. Na przykład, jeśli zaprojektujemy system uziemienia w gwiazdę, wytyczając wszystkie ścieżki sygnałowe, aby zminimalizować interakcje sygnałów między sobą oraz zapewnić niską impedancję ścieżek masy,

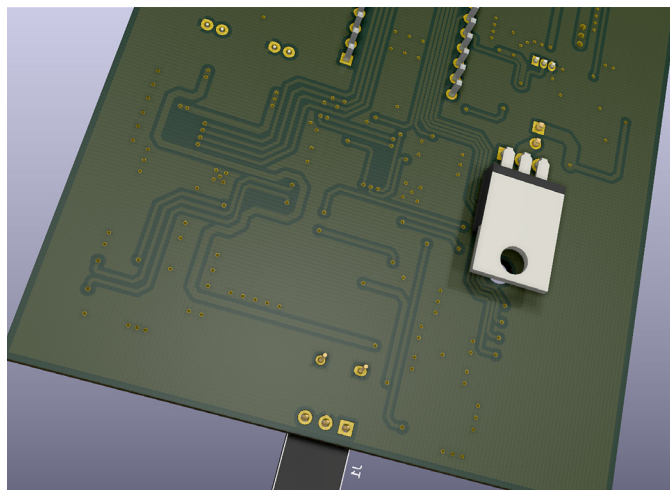


Fotografia 2. Przykład płytki drukowanej zaprojektowanej z masą połączoną w topologii gwiazdy (<https://bit.ly/2WcS6GZ>)

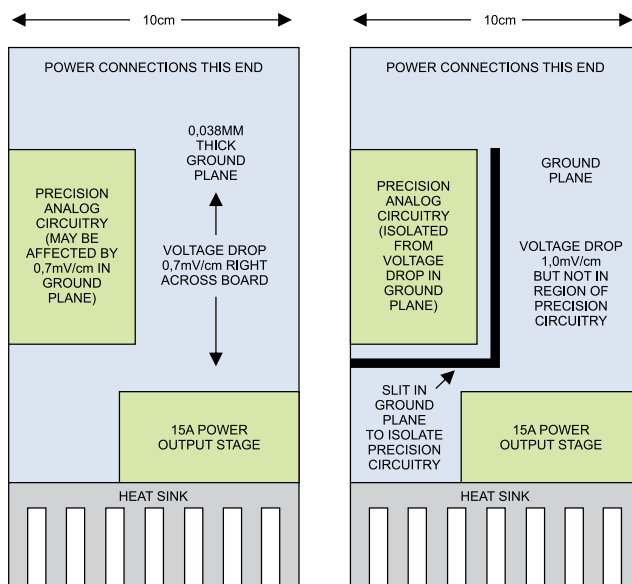
to może się okazać, że taka płytka PCB jest trudna do zaprojektowania, niepotrzebnie duża i skomplikowana. Oczywiście należy pamiętać o tym paradygmacie, projektując układy i starać się go częściowo wdrażać tam, gdzie jest to uzasadnione konstrukcyjnie i możliwe technicznie – na przykład na poziomie integracji poszczególnych modułów w systemie, których wszystkie masy powinny spotykać się w bloku zasilacza.

Wylewka masy jest pewnym usprawnieniem i realniejszą implementacją topologii gwiazdy. Aby zastosować wylewkę masy, jedna strona dwustronnej płytki drukowanej (lub jedna z warstw wielowarstwowej płytki drukowanej) jest realizowana jako ciągła warstwa miedzi i służy jako masa dla całego układu. Teoria mówi, że duża ilość metalu będzie miała możliwie najmniejszy opór elektryczny. Ze względu na duży, spłaszczony kształt tego przewodnika będzie on miał również możliwie najmniejszą indukcyjność. Dzięki temu wylewka masy minimalizuje powstawanie pozornych napięć różnicowych (powstałych na skutek lokalnego poboru prądu itp.) i zapewnia możliwie najlepsze przewodzenie powrotu dla prądu.

Koncepcja płaszczyzny masy może również zostać rozszerzona o płaszczyznę napięcia zasilania. Wylewka zasilania ma zalety podobne do płaszczyzny uziemienia (przewodnik o bardzo małej impedancji), ale jest przeznaczona dla jednego z napięć zasilania systemu. Projektowany system może mieć więcej niż jedną wylewkę napięcia, a także płaszczyznę uziemienia (szczególnie w przypadku stosowania płytek wielowarstwowych). Wylewki nie wymagają osobnej warstwy na płytce PCB, chociaż jest to najlepszym rozwiązaniem. Wylewka masy może elastycznie otaczać inne ścieżki na PCB, tak jak pokazano na płytce drukowanej na **rysunku 3**.



Rysunek 3. Render płytki drukowanej z widoczną wylewką



Rysunek 4. Schematyczny rysunek PCB z układami mocy i precyzyjną elektroniką analogową, gdzie spadek napięcia na wylewce powoduje powstanie offsetu (po lewej) i rozwiązanie tego problemu (po prawej) (<https://bit.ly/3qLQ4f4>)

Wylewka masy o małej impedancji i dużym obszarze ma kluczowe znaczenie dla obwodów analogowych. Płaszczyzna ta nie tylko działa jako ścieżka powrotna o małej impedancji dla prądów o wysokiej częstotliwości (spowodowanych układami cyfrowymi), ale także minimalizuje emisję zakłóceń elektromagnetycznych. Ze względu na ekranujące działanie wylewki podatność obwodu na zewnętrzne zakłócenia elektromagnetyczne jest również zmniejszona.

### Systemy wysokoprądowe a wylewki

Szczególnym przypadkiem stosowania wylewek masy są układy, w których na jednej płytce znajdują się czułe układy analogowe i elementy mocy o znacznym poborze prądu. Na **rysunku 4** pokazano uproszczony przykład takiej konstrukcji. Na jednej płytce znajdują się czuła elektronika analogowa (po lewej) oraz stopień mocy (po prawej stronie), natomiast w górnej części znajdują się złącza zasilania. Dla płytki o szerokości 10 cm, przy miedzi o grubości 35 μm i poborze prądu przez stopień mocy, wynoszącym 15 A, spadek napięcia na wylewce masy będzie wynosił około 0,7 mV/cm. To wystarczy, żeby zakłócić działanie precyzyjnych układów analogowych. Spadek napięcia może mieć wpływ np. na offset napięciowy w sygnałach analogowych – przy układach zasilanych napięciem 5 V i odległości np. 10 cm oznacza to offset –58 dB, czyli znacznie powyżej typowego poziomu szumu precyzyjnych układów analogowych. Co więcej, jeśli prąd ten nie będzie pobierany w sposób stały, to i offset będzie się zmieniał, co przełoży się na zwiększenie poziomu szumów o wyznaczoną wartość.

Rozwiązaniem tego problemu jest przecięcie wylewki masy izolującą szczeliną w sposób pokazany na rysunku 4 po prawej stronie. W ten sposób wylewka masy dzielona jest na dwie sekcje – dla czułych układów i dla elementów mocy. Spadek napięcia dla układów mocy rośnie do 1 mV/cm, ale jest to w pełni akceptowalna wartość dla tego rodzaju układów. Przez masę pod sekcją precyzyjną natomiast nie płynie duży prąd powodujący powstawanie istotnych spadków napięcia.

### Wylewki masy w systemach wysokiej częstotliwości

Zupełnie osobną kwestią jest analiza ścieżek i wylewek masy w systemach wysokiej częstotliwości. Po pierwsze, wylewka masy jest kluczowym elementem linii paskowych, czyli rodzaju ścieżek dla sygnałów o wysokiej częstotliwości, które z punktu widzenia sygnału są liniami



długimi. Drugim istotnym aspektem jest fakt, że dla systemów wysokiej częstotliwości prąd nie zawsze płynie w wylewce masy najkrótszą geometrycznie drogą a ścieżką o najniższej impedancji.

Linia długa to linia transmisyjna, przenosząca sygnały o długości porównywalnej z długością fali sygnału elektrycznego, rozchodzącego się w linii. Dla każdego pasma częstotliwości można skonstruować linię długą, jednak

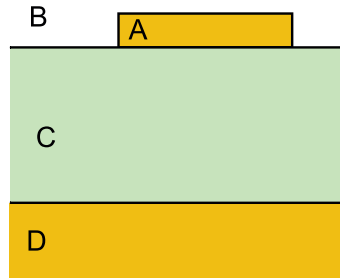
zwykle mówi się o niej dla wysokich częstotliwości. Na płytkach PCB ścieżki mają długości sięgające na ogół kilkudziesięciu centymetrów. Przy częstotliwości 300 MHz długość fali w miedzi wynosi ok. 1 metra. Przyjmuje się, że ścieżki na PCB traktuje się jako linie długie dla częstotliwości powyżej 300 MHz. Najważniejszym parametrem, opisującym linię długą, jest impedancja falowa (nie bez powodu mówi się o PCB z kontrolowaną impedancją).

Istnieje wiele rodzajów linii długich – koncentryczne, dwuprzewodowe itp. Na płytkach PCB najprościej realizuje się tzw. linie paskowe. Przekrój przez PCB z linią paskową pokazano na **rysunku 5**. Linia taka składa się ze ścieżki (A) otoczonej powietrzem (B) na jednej warstwie i wylewki masy (D), znajdującej się na kolejnej warstwie. Pomiędzy nimi znajduje się dielektryk płytki drukowanej (C). Wyliczanie impedancji charakterystycznej linii paskowej jest rzeczą dosyć skomplikowaną i wykracza poza ramy tego artykułu. Impedancja ta jest funkcją stałej dielektrycznej laminatu płytki drukowanej, szerokości ścieżki i odległości pomiędzy ścieżką a wylewką masy (grubością laminatu).

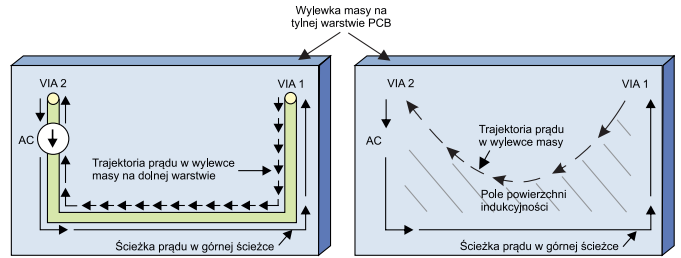
Z uwagi na to, że wylewka masy jest istotnym elementem linii paskowej, musi ona biec pod całą ścieżką wysokiej częstotliwości. W związku z tym nie można przerwać w żadnym miejscu takiej wylewki, ponieważ tamtędy powraca prąd. Dokładna analiza pokazuje, że prąd powrotny w wylewce masy rozkłada się nawet na większą szerokość, niż ma ścieżka. Jest to szczególnie widoczne w miejscach, gdzie linia transmisyjna zakręca.

Rozważmy linię długą w kształcie litery U, która transmituje prąd zmienny i jest zwarta na obu końcach do wylewki masy poprzez przelotki VIA 1 i VIA 2 (**rysunek 6**). W tej ścieżce prąd oczywiście biegnie po jej trajektorii, natomiast w wylewce masy prąd wraca trajektorią pokazaną na rysunku 6 po prawej stronie. Jest to wypadkowa dwóch efektów. Z jednej strony pole magnetyczne indukowane przez górną ścieżkę stara się wymusić przepływ prądu pod ścieżką (zgodnie z zasadą prawej dłoni – prąd w ścieżce wymusza prąd w wylewce masy, płynący w odwrotnym kierunku), a z drugiej strony niezerowa impedancja wylewki powoduje, że prąd wybiera możliwie krótką ścieżkę. Kształt, jaki przybiera trajektoria, po której płynie prąd, wynika z faktu, że im większe pole pomiędzy ścieżką a trajektorią powrotną, tym większa jest indukcyjność. Oznacza to, że im wyższa jest częstotliwość, tym bliżej ścieżki płynie prąd w wylewce masy.

O kierunku rozchodzenia się prądu w wylewce masy należy pamiętać podczas projektowania płytki drukowanej. Na ogół nie jest



**Rysunek 5. Przekrój linii paskowej na płytce drukowanej. A – ścieżka, B – powietrze, C – dielektryk laminatu, D – wylewka masy (<https://bit.ly/3qRoZai>)**



**Rysunek 6. Trajektoria powrotu prądu przez wylewkę masy w układzie wysokiej częstotliwości**

możliwe wykorzystanie całej warstwy PCB dla wylewki masy. Często zachodzi konieczność poprzecznania jej innymi ścieżkami. Robiąc to, pamiętajmy o trajektoriach przepływu prądu w wylewce pod ścieżkami o wysokiej częstotliwości.

## DGND i AGND – razem, ale osobno

Masy sygnałów cyfrowych i analogowych rozdzielane są w układach elektronicznych z wielu powodów. Istotne jest, aby zadbać o ich separację, żeby zakłócenia z sekcji cyfrowej nie przenikały do czułych układów analogowych. Z drugiej strony trzeba pamiętać, że muszą być one połączone ze sobą dla zapewnienia wszystkim układom elektronicznym tego samego stabilnego punktu odniesienia dla całego systemu.

Istnieje kilka strategii łączenia ze sobą masy cyfrowej i analogowej. Jedną z nich zakłada połączenie obu w jednym punkcie, przy układzie mieszanym, tj. tym, który wymaga podłączenia i masy cyfrowej, analogowej. Można to zrealizować albo łącząc masy po prostu ze sobą, albo też łącząc je poprzez element blokujący przenikanie zakłóceń, np. koralik ferrytowy, który dzięki swojej indukcyjności blokuje sygnały o wysokiej częstotliwości, a dla prądu stałego (DC) jest zwarciem. Inną strategią jest rozdzielenie masy cyfrowej i analogowej od siebie dla całego urządzenia i połączenie jej w sekcji zasilania urządzenia. Wybór konkretnej strategii prowadzenia masy w systemie uzależniony jest od możliwości prowadzenia ścieżek, liczby ścieżek w poszczególnych domenach zasilania, liczby warstw PCB itp. Tutaj niestety zdać trzeba się na doświadczenie i wyczucie projektanta PCB oraz, bardzo często, eksperymenty związane z zastosowaniem różnych topologii.

**Nikodem Czechowski, EP**

Źródła:

1. Hank Zumbahlen „Staying well grounded”, Analog Dialogue, czerwiec 2012.
2. Sanjay Pithadia, Shridhar More, „Grounding in mixed-signal systems demystified part 1”. TI Analog Applications Journal 1Q 2013.
3. Sanjay Pithadia, Shridhar More, „Grounding in mixed-signal systems demystified part 2”. TI Analog Applications Journal 2Q 2013.
4. Mark Fortunato, „Successful PCB grounding with mixed-signal chips – follow the path of least impedance”, Maxim Tutorials 5440, 15 października 2012.
5. Walt Kester, James Bryant, Mike Byrne, „Grounding Data Converters and Solving the Mystery of AGND and DGND”, Analog Devices tutorial MT-031.

**Chcesz czytać nasze najnowsze artykuły jeszcze przed wydrukowaniem w EP?**

Zajrzyj na

**[www.ep.com.pl/EPwtoku](http://www.ep.com.pl/EPwtoku)**