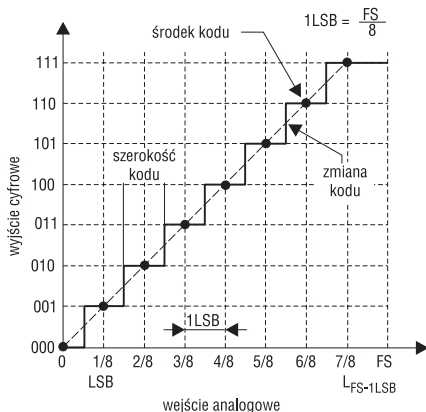


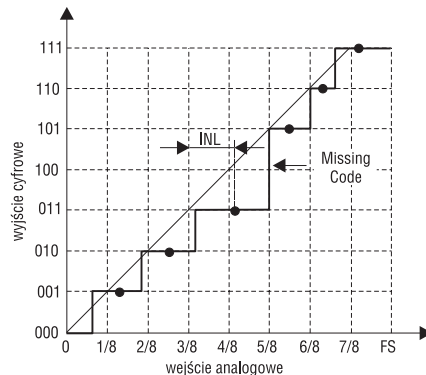
# Warto spróbkować, część 3

Implementowanie przetworników analogowo-cyfrowych i cyfrowo-analogowych w popularnych mikrokontrolerach stało się już na tyle powszechne, że próby sprawdzenia się w dziedzinie cyfrowego przetwarzania sygnałów coraz częściej są podejmowane przez zwykłych składaczy kitów (z całym szacunkiem dla składaczy). Często nie dysponują oni odpowiednimi podstawami teoretycznych. Robią więc to na wycucie lub „na słuch”. Tymczasem wiedza na ten temat jest nie mała, zawiera sporą dawkę elementów matematyki wyższej.

Schemat blokowy typowego systemu przetwarzania analogowo-cyfrowego poznaliśmy w pierwszej części kursu (rys. 5). Trudno jest rozstrzygnąć o tym, który z widocznych na schemacie blokowym elementów jest najważniejszy. Zdążyliśmy się już chyba przekonać, że każdemu z nich zostały „przydzielone” ważne zadania. Nie można jednak odmówić szczególnego znaczenia samemu przetwornikowi analogowo-cyfrowemu, wszak to on właśnie realizuje podstawowe operacje, jakimi są: próbkowanie i kwantyzacja. W tej części kursu



Rys. 14. Charakterystyka przetwarzania idealnego, 3-bitowego przetwornika A/C



Rys. 15. Charakterystyka nieidealnego przetwornika A/C

przyjrzymy się więc parametrom przetworników A/C i C/A. Zdobyta wiedza może w przyszłości ułatwić podejmowanie ewentualnych decyzji o zastosowaniu takiego, czy innego przetwornika w projektowanych urządzeniach.

## Parametry statyczne przetworników A/C

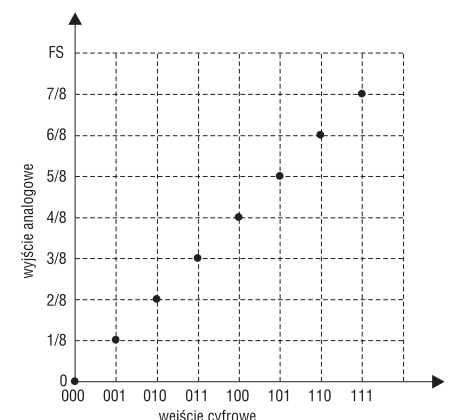
Gdybyśmy się spytali jakiegoś konstruktora, jakiego przetwornika użył w swoim projekcie, najczęściej z pierwszych słów dowiedzielibyśmy się o jego rozdzielczości i szybkości pracy. Te dwa parametry faktycznie mają duże znaczenie, ale o sukcesie lub porażce projektu mogą decydować często i inne cechy przetworników. Ogólnie parametry przetworników możemy podzielić na statyczne i dynamiczne. Tymi pierwszymi zajmujemy się obecnie.

Na rys. 14 przedstawiono charakterystykę przetwarzania idealnego, 3-bitowego przetwornika A/C. Przyrost napięcia wejściowego (oś pozioma) wywołuje skokowe zmiany wyniku konwersji. Różnica napięć wejściowych, dla których stan przetwornika pozostaje bez zmiany jest nazywana **szerokością kodu**. W idealnym przetworniku szerokość kodu jest równa **1 LSB** (*Last Significant Bit*), w praktyce jednak szerokości sąsiadujących ze sobą kodów na ogół różnią się między sobą. Wartość 1 LSB wynika z podzielenia pełnego zakresu przetwarzania ( $FS - Full Scale$ ) przez liczbę przetwornika. Odchylenia szerokości poszczególnych kodów od war-

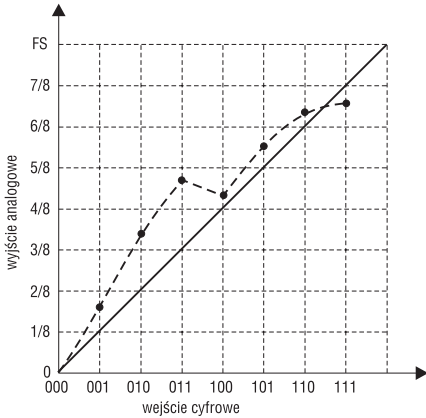
tości 1 LSB określane są jako **nie liniowość różnicowa** (*DNL - Differential Nonlinearity*). Na rys. 15 przedstawiono charakterystykę nieidealnego przetwornika A/C. Uwagę zwraca brak kodu 100. Taki kod nazywamy w związku z tym **kodem utraconym** (*missing code*). Podobne przypadki występują, gdy DNL związany z tym kodem jest bardzo duży. Kod utracony nie pozostaje bez wpływu na działanie przetwornika A/C. W wyniku jego istnienia mogą powstawać oscylacje dyskwalifikujące nawet dany przetwornik do zastosowania w konkretnym przypadku. Oprócz nieliniowości różnicowej do oceny przetwornika stosuje się również inny parametr określający jakość próbkowania przetwornika. Jest to **nieliniowość całkowita** (*INL - Integral Non-Linearity*). Do jej wyznaczenia należy określić prostą przechodzącą przez teoretyczne punkty środkowe wszystkich kodów. Wartość parametru INL ustala się jako największą odchyłkę rzeczywistych środków kodów od tej prostej (rys. 15).

## Parametry statyczne przetworników C/A

Charakterystyka idealnego, 3-bitowego przetwornika C/A jest przedstawiona na rys. 16. Na osi odciętych mamy cyfrową reprezentację sygnału wejściowego, natomiast na osi rzędnych odpowiadające jej analogowe napięcie wyjściowe. W tym przypadku, w odróżnieniu od przetwornika A/C, charakterystyka jest dyskretna. **Nieliniowość różnicową** (*DNL*) defi-



Rys. 16. Charakterystyka idealnego, 3-bitowego przetwornika C/A



Rys. 17. Utrata monotoniczności przetwornika C/A na skutek zbyt dużej wartości DNL przetwornika

niuje się jako maksymalną różnicę napięć odpowiadających dwóm sąsiadującym ze sobą stanom w stosunku do 1 LSB. Zbyt duża wartość DNL przetwornika C/A może skutkować utratą monotoniczności charakterystyki (rys. 17). Jeśli wystąpi taki przypadek, to w zakresie przetwarzania pojawiają się takie punkty (jeden lub wiele), w których zwiększaniu stanu przetwornika będzie towarzyszyło zmniejszanie napięcia wyjściowego. O przetworniku będziemy mówili, że jest monotoniczny, jeśli nachylenie jego charakterystyki przetwarzania będzie miało taki sam znak w całym zakresie. W niektórych aplikacjach niemonotoniczny przetwornik C/A może wprowadzać niepożądane oscylacje sygnału. Dla przetworników C/A również definiuje się **nie-liniowość całkową**. Odpowiada jej największa odchyłka rzeczywistej charakterystyki przetwarzania od

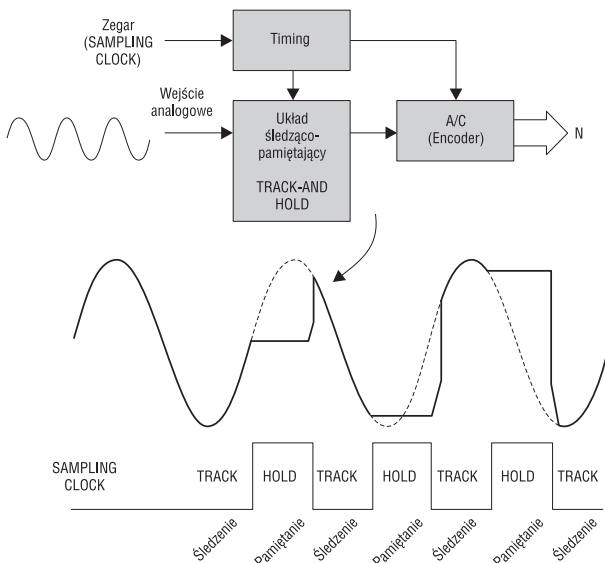
idealnej linii prostej przechodzącej przez końce zakresu. W odróżnieniu od przetworników A/C, w przetwornikach C/A nie występują błędy *missing code*.

**Parametry dynamiczne przetworników A/C**

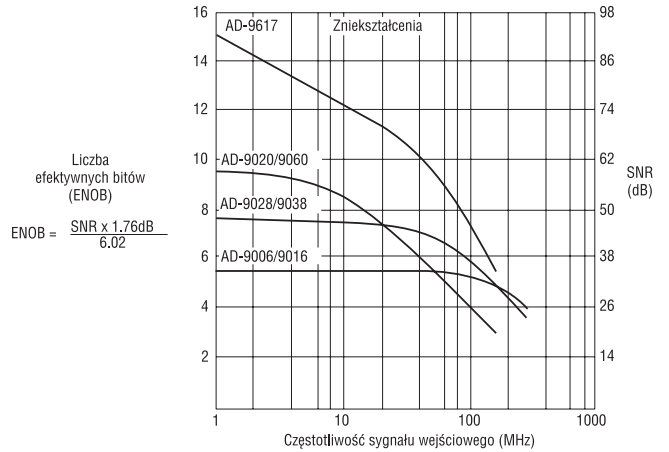
Już z samej definicji wynika, że parametry, którymi zajmiemy się teraz nie będą tak łatwe do zmierzenia, jak omawiane wcześniej parametry statyczne. Mają one jednak równie istotny wpływ na jakość sygnału otrzymanego w wyniku konwersji.

Właściwości dynamiczne przetwornika A/C zależą od kilku czynników. Jednym z nich jest technologia wykonania, innym, nie mniej istotnym są przyjęte rozwiązania układowe. W praktyce stosuje się ich wiele, więc dobierając przetwornik do konkretnej aplikacji zawsze trzeba się zastanowić nad jego najbardziej odpowiednim typem.

Typowy układ akwizycji danych został przedstawiony na rys. 18. Jednym z elementów składających jest układ śledząco-pamiętający (*track-and-hold*), dzięki któremu możliwe jest zapamiętanie wartości



Rys. 18. Typowy układ akwizycji danych

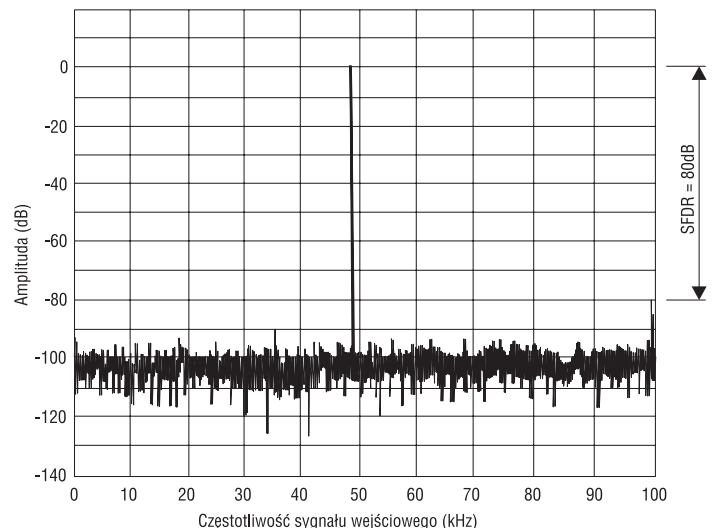


Przetworniki A/C typu Flash	Rozdzielczość	Szybkość próbkowania
AD9020	10 BITS	40 MSPS
AD9060	10 BITS	60 MSPS
AD9028/9038	8 BITS	250 MSPS
AD9006/9016	6 BITS	400 MSPS

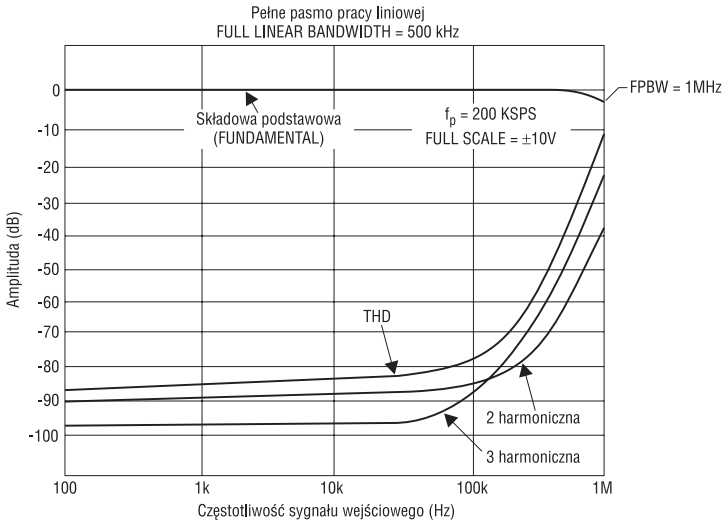
Rys. 19. Charakterystyki S/(N+D) wybranych przetworników A/C

chwilowej przebiegu w momencie rozpoczynania cyklu konwersji. Zabieg taki jest konieczny ze względu na to, że w układzie rzeczywistym czas przetwarzania jest niezerowy. Gdyby dopuścić do zmian przebiegu w czasie trwania konwersji, wynik zostałby przekłamany. Uwaga ta nie dotyczy przetworników typu flash i sigma-delta ze względu na ich zasadę działania.

Parametry dynamiczne układu SHA-ADC (wzmacniacz próbkujący-pamiętający – przetwornik A/C) w dużym stopniu rzutują na parametry całego układu przetwarzającego. W wymagających aplikacjach (np. DSP) blok ten musi być zaimplementowany w jednej strukturze, w przeciwnym razie, mimo



Rys. 20. Zniekształcenia SFDR widmowej charakterystyki przetwarzania



Rys. 21. Charakterystyka THD dla układu AD678

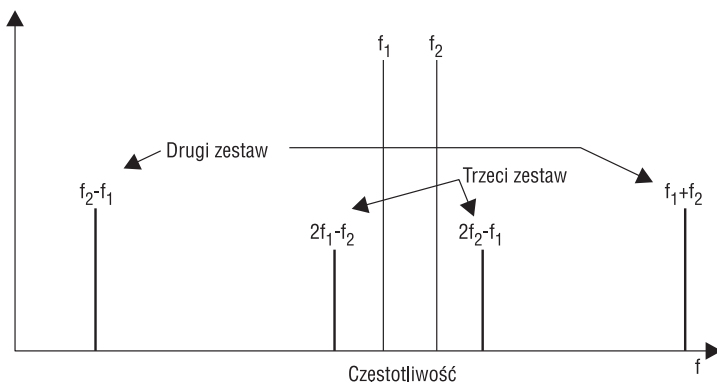
dobrych parametrów każdego bloku z osobna, parametry całości będą dużo gorsze, niż można by oczekiwać.

**Odstęp sygnału od szumu, efektywna rozdzielczość** – Wiemy już, że w praktyce stosuje się parametr  $S/(N+D)$ , który jest zdefiniowany jako stosunek wartości skutecznej (RMS) sygnału wejściowego, do sumy wartości RMS wszystkich składników widma leżących poniżej częstotliwości Nyquista. Uwzględniane są harmoniczne, ale bez składowej stałej (DC). Typowe charakterystyki  $S/(N+D)$  kilku przetworników A/C przedstawiono na rys. 19. Wśród nich jest charakterystyka przetwornika AD-9617, w którym zastosowano prądowe sprzężenie zwrotne. Jak już wiemy, parametr  $S/(N+D)$  ma swój odpowiednik w postaci efektywnej liczby bitów przetwornika (ENOB). Jest on uwzględniony na wykresach z rys. 19.

**Miejscowe zafałszowania widma (Peak Harmonic Content)** – Obserwując widmo przetworzone-

nieć (rys. 20). Maksymalne zafałszowanie widma określone jest przez poziom największej składowej widma bez składowej stałej (DC) nie należącej do samego sygnału. Wartość ta jest wyrażana w dB w stosunku do wartości skutecznej sygnału (RMS) dla pełnego zakresu. Na rys. 20 przedstawiającym charakterystykę układu AD678 takie zafałszowanie widma widzimy dla częstotliwości ok. 100 kHz. Falszywe składowe widma zmniejszają faktyczny zakres dynamiki układu i dlatego wprowadzono parametr określający zakres dynamiki wolny od zafałszowań – **SFDR (Spurious Free Dynamic Range)**.

**Całkowite zniekształcenia harmoniczne (THD – Total Harmonic Distortion)** – Całkowite zniekształcenia harmoniczne (THD) definiowane są jako stosunek zsumowanych wartości skutecznych RMS pierwszych sześciu harmonicznych do wartości RMS wszystkich składowych widma sygnału. Parametr THD jest wyrażany w dB lub procentach. Zwróćmy uwagę na to, że



Rys. 22. Zniekształcenia intermodulacyjne (IMD)

go sygnału monochromatycznego (zawierającego tylko jedną częstotliwość) dostrzegamy oprócz wyraźnego prążka składowej podstawowej sygnału także *Spurious Peak*, których istnienie trudno jest czasami uzasad-

nić. Układu AD678 jest przedstawiona na rys. 21.

**Pasma przetwarzania (FPBW – Full Power Bandwidth)** – Parametr ten definiuje się jako częstotliwość wejściową, dla której zrekonstruowana za pomocą FFT składowa podstawowa (*fundamental*) jest zmniejszona o 3 dB w stosunku do pełnego widma. Z rys. 21 można odczytać, że dla układu AD-678 wartość FPBW jest równa ok. 100 MHz. Należy pamiętać, aby używając parametru FPBW w kontekście oceny przydatności przetwornika A/C do realizacji projektu zawsze łączyć go z SNR, ENOB i THD. Dopiero taki zestaw danych daje w miarę pełne wyobrażenie o przetworniku.

**Pasmo dla zakresu liniowego** – Pasmo dla pełnego zakresu liniowego przetwornika A/C jest wyznaczone przez częstotliwość sygnału wejściowego, od której zrekonstruowany po przetworzeniu przebieg sinusoidalny zmniejsza się o 0,1 dB. Poza pasmem zakresu liniowego znacząco wzrastają zniekształcenia próbkowanego sygnału.

**Zniekształcenia intermodulacyjne (IMD – Intermodulation Distortion)** – Zniekształcenia intermodulacyjne występują zawsze wtedy, gdy sygnał wejściowy zawiera dwie składowe o częstotliwościach  $f_1$  i  $f_2$ . Jeśli tak się zdarzy, to wskutek występowania jakichkolwiek nieliniowości w torze obróbki sygnału, zostaną wytworzone zniekształcenia, których produkty będą sumami i różnicami wielokrotności  $f_1$  i  $f_2$ . Składowe intermodulacyjne można opisać formułą:  $f_i = m f_1 \pm n f_2$ , gdzie  $m, n = 0, 1, 2, 3, \dots$ . W całym widmie sygnału można dostrzec pogrupowane składowe intermodulacyjne (zestawy) zależne od współczynników  $m$  i  $n$ . Przykładowo: drugi zestaw, to dwie składowe o częstotliwościach równych  $f_1 + f_2$  i  $f_1 - f_2$ , trzeci zestaw, to cztery składowe:  $2f_1 + f_2$ ,  $2f_1 - f_2$ ,  $f_1 + 2f_2$  i  $f_1 - 2f_2$  (rys. 22). Zniekształcenia intermodulacyjne są wyrażane w dB jako stosunek sumy wartości RMS próbkowanego sygnału wejściowego, do sumy wartości RMS wszystkich składowych widma będących produktami zniekształceń intermodulacyjnych.

**Jarosław Doliński, EP**  
[jaroslaw.dolinski@ep.com.pl](mailto:jaroslaw.dolinski@ep.com.pl)