

Czy dla przetworników A/C wysoka rozdzielczość oznacza wysoką precyzję?

Zastosowania pomiarowe zazwyczaj wymuszają na użytkownikach wybór przetwornika analogowo-cyfrowego spośród wielu modeli dostępnych na rynku. Wybór będzie oparty na kilku podstawowych kwestiach dotyczących techniki, której chcą użyć oraz tego, czy przetwornik A/C powinien być zintegrowany z mikrokontrolerem lub układem FPGA, czy też dołączony jako samodzielne urządzenie.

W technice półprzewodnikowej, proces przetwarzania jest zdominowany przez trzy rozwiązania: przetworniki z kompensacją wagową SAR (ang. *Successive Approximation Registers*), przetworniki delta-sigma oraz przetworniki typu Flash. Poza wspomnianymi są dostępne inne techniki, wśród których godne uwagi są potokowe przetworniki A/C, w których zakres pasma przenoszenia pokrywa częstotliwości próbkowania od pojedynczych MHz do ponad 100 MHz, a także przetworniki całkujące, zwykle używane w multimetrach cyfrowych i zaprojektowane do pracy z sygnałami statycznymi oraz bardzo wolnozmiennymi.

Wybór technologii będzie zależał od licznych czynników, włączając to, jak szybko system powinien dostarczać dane i jaka rozdzielczość przetwarzania powinna zostać osiągnięta, innymi słowy – jak mały powinien być krok pomiędzy mierzonymi wartościami.

Przetworniki delta-sigma są zdolne do zapewnienia wysokiego poziomu rozdzielczości i łatwo mogą osiągać rozdzielczość 24 bitów, co odpowiada 16,78 milionów kroków. Pracują one z dużym nadpróbkowaniem, po którym następuje filtracja cyfrowa, ale dostępne pasmo przenoszenia rzadko przekracza 100 kHz. W odróżnieniu od nich, przetworniki SAR są dostępne z rozdzielczością 8...16 bitów i są znacznie szybsze, ponieważ mogą przetwarzać sygnały do częstotliwości kilku MHz. Ich największą zaletą jest niewielka wartość współczynnika kształtu oraz niskie zużycie energii. Dla szybszych sygnałów lepszym wyborem są przetworniki równoległe typu Flash, jako że zapewniają rozdzielczość 8...12 bitów.

W celu wybrania odpowiednich przetworników A/C, firmy powinny określić, jak dokładnie system musi odwzorowywać mierzone wielkości analogowe oraz największą częstotliwość wejściową pomiaru. Odpowiedź na te pytania ułatwi wybór odpowiedniej tech-

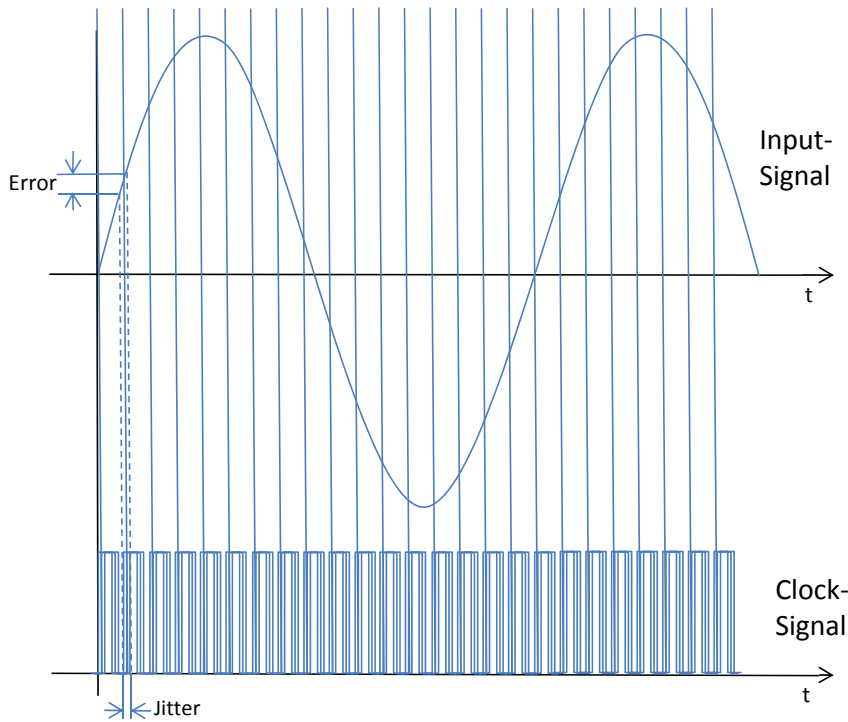
niki przetwarzania. Wymagana rozdzielczość będzie określona przez dokładność systemu. Im większa będzie ta rozdzielczość, tym większa praca będzie musiała zostać wykonana, aby umożliwić systemowi wykazywanie wybranej rozdzielczości w znaczący sposób. Aby osiągnąć najwyższy poziom dokładności, inżynierowie powinni przyrzeć się elementom bezpośrednio w ścieżce sygnału, takim jak czujniki, wzmacniacze oraz przetworniki A/C oraz elementom, których przetworniki A/C potrzebują do spełniania swoich zadań. Czynniki takie, jak jakość zasilacza, napięcie odniesienia i szybkość taktowania zegara mają znacznie większy wpływ na dokładność przetwornika, niż mogłoby się to wydawać na pierwszy rzut oka.

Szczęśliwie, współczesne przetworniki A/C są dobrze projektowane z punktu widzenia ich odporności na zakłócenia związane z napięciem zasilania. W rezultacie, źródło zasilania nie ma większego wpływu na wyniki pomiarów tak długie, jak tętnienia zasilacza pozostają w zakresie od 10 mV do 20 mV. Dla przykładu, jeśli dobry 24-bitowy przetwornik delta-sigma (jak np. CS5531) ma współczynnik tłumienia wpływu zasilania PSRR (ang. *Power Supply Rejection Ratio*) na poziomie -115 dB, to tętnienia o napięciu 20 mV spowodują powstanie efektywnego napięcia zakłócającego o wartości około 35 nV. Jest to mniej, niż wynosi wartość jednego najmniej znaczącego bitu LSB (ang. *Least Significant Bit*), która jest równa 149 nV przy maksymalnym zakresie napięcia 2,5 V. Zauważalny wpływ nastąpiłby dopiero wtedy, gdyby tętnienia przekroczyły 105 nV. Nawet PSRR wynoszący -68 dB w 16-bitowym przetworniku A/C jest wystarczający do utrzymania poziomu poniżej jednego LSB przy tętnieniach wynoszących 20 mV. Jeśli wyniki nie są satysfakcjonujące, inżynier powinien na wszelki wypadek skontrolować napięcie zasilania.

Następnym czynnikiem, któremu należy się przywrzeć, jest sygnał zegara. Pomocny w tym będzie **rysunek 1**. Załóżmy, że działanie przetwornika A/C jest niezakłócone przez błędy oraz że sygnał to idealna sinusoida, której amplituda steruje przetwornikiem w maksymalnym zakresie napięcia. Częstotliwość sinusoidy wynosi 1 MHz, a podstawę czasu ustalono tak, że wejściowy sygnał jest próbkowany 18 razy na okres. Innymi słowy, chwilowa wartość sygnału jest wychwytywana i przetwarzana w odstępie każdych 20 stopni. Teraz załóżmy, że chcemy zmieniać próbkowanie ze względu na odchylenia wygenerowane przez zegar i/lub odchylenia fazy. Tanie, bazujące na krzemie oscylatory mogą działać z okresem i odchyleniami fazowymi do 160 ps. W naszym wypadku, 18 MHz jest częstotliwością taktowania zegara, a odchylenia co 160 ps oznaczają, że próbkowanie bazujące na sygnale wejściowym zmienia się o kąt $0,057616^\circ$ lub $3,46''$. Różnica wartości sinusów kątów 1° i $0,057616^\circ$ implikuje zmianę o 0,001006, co odpowiada błędowi na poziomie 0,1%.

Jeśli spojrzymy na powyższą sytuację z innej strony, musielibyśmy uwzględnić błąd na poziomie 0,1% w wynikach - niezależnie od rozdzielczości przetwornika A/C (sygnał ulega największej zmianie wraz z osiągnięciem zeraowego napięcia, więc błąd z tym związany także mógłby być większy. W przypadku 8-bitowego przetwornika dającego 256 kroków, 1 LSB wyniósłby $1/256 = 0,39\%$. Wynik wyjściowy nie byłby przez to niedokładny. W przypadku przetwornika 12-bitowego rozdzielczość wynosi $1/4096$, więc 1 LSB wyniósłby 0,0244%, powodując powstawanie błędów wyniku na poziomie 4 LSB. Wraz ze wzrostem rozdzielczości przetwornika A/C, liczba LSB byłaby odpowiednio większa. Przykładowo, dla 24-bitowego przetwornika byłoby to 16,777 LSB.

Oscylatory na bazie kwarcu, jak np. Si510 firmy Silicon Laboratories, działają z odchyleniami okresu o wartości międzyszczytowej 11 ps. Korzystając z naszego przykładu, zmiana w stosunku do sygnału wejściowego wyniesie tylko $0,003961^\circ$ lub $14,26''$ sekund kątowych. Po wykonaniu obliczeń przedstawionych powyżej, w wyniku uzyskamy błąd na poziomie jedynie 0,0069%. To dowodzi, że inżynierowie powinni ostrożnie podchodzić



Rysunek 1. Jeśli próbkowanie zmienia się w niekontrolowany sposób (odchylenia), mierzone wartości również będą zmieniały się (powodując powstawanie błędów). Największy błąd będzie wytworzony przez punkt przejścia sinusoidy przez napięcie zerowe

do kwestii generowania sygnału czasowego, w celu otrzymania zadowalających rezultatów zwłaszcza, jeśli planują używanie przetworników SAR. Podczas stosowania przetworników delta-sigma błąd ten będzie zniwelowany dzięki wysokiemu poziomowi nadpróbkowania oraz filtracji, która po nim następuje.

We wszystkich tych technikach sygnał przetwornika A/C jest porównywany z napięciem odniesienia, które służy za wzorzec wyniku. Jako, że wpływa ono na wynik razem ze swoimi błędami, inżynierowie powinni patrzeć krytycznym okiem na napięcie odniesienia i upewnić się, że przeczytali wytyczne

producenta bardzo uważnie. Wiele przetworników A/C ma zintegrowane źródła napięcia odniesienia, ale należy przy nich zachować taką samą ostrożność, jak podczas pracy z zewnętrznymi źródłami (rysunek 2). W przykładzie zaprezentowanym poniżej zostanie wykorzystane zewnętrzne źródło napięcia odniesienia.

Przykład 1

Załóżmy, że napięcie odniesienia wzorca ma bezwzględną dokładność na poziomie $\pm 1\%$ i dryft wynoszący $100 \text{ ppm}/^\circ\text{C}$. Nasze napięcie wejściowe będzie przyrównywa-

ne do napięcia, które zmienia się o $\pm 1\%$ oraz zawiera błąd, mający wpływ na wynik. Błąd ten może być wyeliminowany przez inżynierów gotowych na wykonanie dodatkowej pracy, poprzez wykorzystanie trybów kalibracji przetwornika A/C. Jeśli taki tryb kalibracji nie jest dostępny, błąd może zostać wyeliminowany później przez mikrokontroler. Oczywiście, warunkiem jest dobrze dobrany poziom napięcia wejścia analogowego, które można wykorzystywać w kalibracji. Niekorzystne jest jednak to, że napięcie przy $100 \text{ ppm}/^\circ\text{C}$ może się zmieniać w zależności od kierunku i jest trudne do wcześniejszego określenia. Dla przykładu, w zastosowaniu przy temperaturze 60°C , występuje następująca nieznaną wartość: $(60^\circ\text{C} - 25^\circ\text{C}) = 35^\circ\text{C} \times 100 \text{ ppm}/^\circ\text{C} = 3500 \text{ ppm}$. Wraz z napięciem odniesienia $2,5 \text{ V}$ spowoduje to zmianę o $8,75 \text{ mV}$, a powstały błąd dla 12-bitowego przetwornika A/C wyniesie 14 LSB. Dla 24-bitowego przetwornika różnica ta wyniesie aż 58,72 LSB.

Kolejną ważną kwestią, która nie powinna zostać przeoczona, jest to, że przetwornik A/C wpływa na źródło odniesienia podczas trwania pomiaru. W efekcie inżynierowie muszą zadbać o zmiany napięcia wraz ze zmieniającymi się poziomami obciążenia, ponieważ będzie to miało wpływ na specyfikacje kontroli obciążenia źródła napięcia odniesienia. W tym wypadku, zmiany napięcia wynoszą maksymalnie $6,2 \mu\text{V}/\mu\text{A}$. Przetwornik A/C firmy Maxim, MAX1280/81, jest typowym 12-bitowym przetwornikiem wykorzystującym maksymalne obciążenie odniesienia $350 \mu\text{A}$ podczas procesu przetwarzania. Według specyfikacji spowoduje to zmianę napięcia odniesienia do $2,1 \text{ mV}$. Oznaczałoby to różnicę na poziomie około 3,4 LSB dla 12-bitowego przetwornika A/C. Biorąc pod uwagę jednocześnie zmiany tem-

REKLAMA

Z DUMĄ PREZENTUJEMY OFERTĘ INNOWACYJNYCH PRODUKTÓW DOPASOWANYCH DO TWOICH POTRZEB

Avnet Memec jest dystrybutorem specjalizującym się w najnowszych technologiach półprzewodnikowych. Koncentrujemy się na innowacyjnych rozwiązaniach. Doświadczony zespół inżynierów i specjalistów ds. sprzedaży, dysponujący rozległą wiedzą, znajomością rynku i różnorodnych zastosowań, pomoże w znalezieniu produktów dopasowanych do Twoich potrzeb. Zapewniamy ponadto pełną obsługę logistyczną oraz wsparcie techniczne.

Zapraszamy do współpracy z naszym biurom w Katowicach pod numerem tel. 32 337 56 20 lub katowice@avnet-memec.eu.

CREATE
INNOVATE
ACCELERATE
www.avnet-memec.eu





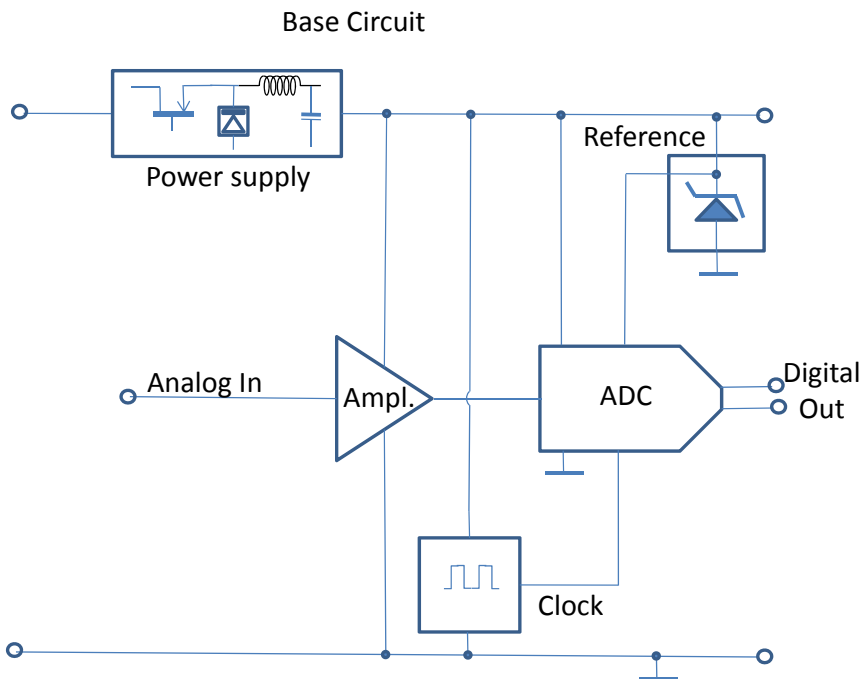
Karl-Heinz Willingshofer

peratury i obciążenia, poziom błęd wyniesie około 17 LSB w systemie 12-bitowym.

Przykład 2

W drugim przykładzie poprawimy bezwzględną dokładność do poziomu 0,08% oraz ustalimy dryf 1 ppm/°C (bazując na przetworniku MAX6325C). Błąd będzie teraz wyglądał w sposób następujący: przy temperaturze pracy na poziomie 60°C napięcie odniesienia będzie się zmieniać o 35 ppm lub 87,5 μV, jeśli wykonamy przeliczenia analogiczne do przeprowadzonych wcześniej. Dla 12-bitowego przetwornika w rezultacie da nam to 0,14 LSB; błąd ten jest pomijalny i nie ma wpływu na wynik. Dla 24-bitowego przetwornika różnica wyniesie jedynie 587 LSB, ale ciągle jest to wartość, która musi być brana pod uwagę w systemach o wysokiej precyzji. Regulacja obciążenia źródła odniesienia jest ustalona na maksymalnie 6 ppm/mA. Konkretnie rzecz ujmując, oznacza to, że przy obciążeniu 350 μA zmiana napięcia osiągnie poziom $2,5 \text{ V} \times 6 \times 10^{-6} = 15 \text{ μV}$, co nie spowoduje powstawania dodatkowych błędów w wynikach w przetworniku 12-bitowym.

Jednym z wielokrotnie omawianych źródeł błędów jest szum. Obejmuje to nie tylko szum własny przetwornika A/C, ale także szumy, które są wnoszone przez napięcie odniesienia, wzmacniacz oraz źródło zasilania. Dlatego tak ważne jest zwrócenie szczególnej uwagi na różne elementy wprowadzające szum, zwłaszcza podczas pracy z systemami wysokiej precyzji. We wspomnianym powyżej źródle napięcia odniesienia, MAX6325C, napięcie szumu to maksymalnie 2,8 μV RMS (ang. *Root Mean Square*) w zakresie od 10 Hz do 1 kHz. Rozważania związane z szumem powinny zawsze być powiązane z informacją o częstotliwości, w celu wykazania, że wyliczenia mają uzasadnienie. Każdy element może wytwarzać szum, włączając w to szum biały, którego rozkład jest równomierny we wszystkich częstotliwościach od zera do nieskończoności. Półprzewodniki wytwarzają także szum związany



Rysunek 2. Schemat blokowy przedstawiający zewnętrzne urządzenia peryferyjne, które mogą przyczynić się do powstawania błędów systemu

ze zniekształceniami powstającymi podczas przekraczania pewnych częstotliwości progowych. W praktyce rozkład częstotliwości jest ograniczony ze względu na warunki związane z elementami lub samym obwodem elektrycznym. Rozkład częstotliwości nie jest jednak równomierny i nie może być rozumiany jako wartość uniwersalna i ustalona. Z tego właśnie powodu dane dotyczące szumów powinny być dostarczane razem z informacją o tym, w jakim paśmie częstotliwości przeprowadzony był pomiar. Dobrze jest przeprowadzać te pomiary na poziomie systemu.

Z powodu wspomnianej powyżej specyfikacji napięcia szumów, na napięcie wyjściowe nałożone jest dodatkowe 2,8 μV RMS. Ponieważ RMS zależy od kształtu sygnału tak samo, jak i od częstotliwości, obliczenie wartości szczytowej nie jest łatwe. Nawet dla sinusoidy, przeliczenie wyniesie $U_p = U_{RMS} \times \sqrt{2}$, co da w wyniku około 3,95 μV w zakresie częstotliwości od 10 Hz do 1 kHz. Nie oznacza to, że poniżej 10 Hz oraz powyżej 1 kHz nie ma źródła szumu odniesienia. Znaczący to tylko tyle, że jego wartość nie została wyznaczona. Napięcie szumów na tym poziomie nie wpływa na wyniki systemów 12-bitowych, jako że jeden LSB będzie miał wartość 610,4 μV w pełnym zakresie napięcia wejściowego 2,5 V. W systemach 24-bitowych szczytowa wartość napięcia 3,95 μV osiągnie wartość 26 LSB.

Tak, jak zostało to przedstawione, wybór elementów zewnętrznych może mieć znaczący wpływ na dokładność i precyzję systemu pomiarowego. Niekoniecznie jednak wszystkie te błędy będą się sumować wytwarzając największe możliwe zmiany wyników. Statystycznie różne rodzaje błędów mogą wzajemnie osłabiać swoje efekty.

Na wszelki wypadek jednak, zawsze warto mieć na uwadze najgorszy możliwy przypadek.

Najważniejszymi elementami systemu przetwarzającego są: przetwornik A/C, wzmacniacz oraz czujnik. Oczywiście przetwornik A/C jest tutaj szczególnie ważny. Asortyment produktów jest niemal nieskończony i jednocześnie dezorientujący. Tak, jak wspomniano we wstępie artykułu, istnieje wiele różnych technik, z których każda ma swój własny zestaw parametrów.

Zazwyczaj dla wszystkich typów przetworników A/C dostawcy podają jasne specyfikacje odnośnie rozdzielczości, zakresu napięć wejściowych oraz maksymalnej szybkości próbkowania. Jednakże, jeśli chodzi o parametry takie jak pasmo przenoszenia częstotliwości, zakres dynamiczny, stosunek sygnału do szumów, błędy z powodu rozpraszania harmonicznej, SFDR (ang. *Spurious-Free Dynamic Range*), EOB (ang. *End Of Block*), informacje w notach katalogowych dostawców nie są podane w spójny sposób, co utrudnia bezpośrednie porównania pomiędzy różnymi modelami. Ta sama informacja jest często opisana przy użyciu innej nazwy, a konkretne opisy lub parametry trudno odnaleźć wśród przypisów lub tekstu noty katalogowej. Z pewnością w artykule tym nie ma miejsca na zawarcie pełnego spisu terminów – możemy tylko doradzić inżynierom bardzo ostrożne czytanie not katalogowych oraz dokładne sprawdzanie wszystkich danych w nich zawartych.

Karl-Heinz Willingshofer
Field Application Engineer
w firmie Avnet-Memec

Na podstawie dokumentacji firm Cirrus, Maxim oraz Silicon Labs