



Pomiary zmiennych środowiskowych za pomocą przetwornika A/D

Sensory mierzące zmienne środowiskowe rzadko wyprowadzają sygnał wyjściowy, który można dołączyć wprost do wejścia przetwornika analogowo – cyfrowego. Typowo, ich sygnał wyjściowy wymaga wzmocnienia, odfiltrowania, przesunięcia poziomu oraz kondycjonowania. Przetwarzanie sygnału analogowego na cyfrowy jest wykonywane przez różne rodzaje scalonych przetworników A/D, z których każda ma unikalne cechy oraz wymagania odnośnie do aplikacji.

W artykule wyjaśniono zagadnienia związane z pasmem częstotliwościowym przetwarzanego sygnału w kontekście do rozdzielczości sygnałów analogowych uzyskiwanych na wyjściach sensorów różnych wielkości fizycznych. Mając na uwadze wspomniane cechy sygnałów dokonamy szybkiej oceny możliwości konwerterów A/D o różnej architekturze.

Parametry przetwarzanych wielkości

Zjawiska fizyczne, które mierzymy za pomocą różnych aplikacji, zachodzą w różnych zakresach częstotliwości. Na **rysunku 1** pokazano zakresu częstotliwości dla różnych

zjawisk fizycznych oraz rozdzielczość pomiarową wymaganą do ich zmierzenia.

Zjawiska fizyczne o wąskim paśmie niskich częstotliwości, takie jak temperatura i ciśnienie, powodują generowanie sygnałów analogowych o małym poziomie. W rezultacie ścieżki sygnałowe ich czujników wymagają przetworników o dużej rozdzielczości. Dodatkowo, temperatura i ciśnienie zmieniają się z małą prędkością, więc przetwornik A/D służący do ich zamiany na wartość cyfrową może mieć małą częstotliwość próbkowania.

Typowymi sensorami służącymi do pomiaru temperatury są czujniki rezystancyjne RTD, termopary, termistory, diody półprzewodnikowe oraz czujniki krzemowe. Typowo

czujnik ciśnienia jest wykonywany w układzie mostkowym i jest złożony z czterech elementów rezystancyjnych. Dodatkowo, systemy służące do pomiaru ciśnienia często wymagają zastosowania dodatkowych czujników wspomagających uzyskanie dokładnego wyniku pomiaru. Typowo z wymienionymi czujnikami są używane przetworniki A/D o topologii SAR lub delta-sigma.

Współcześnie również czujniki przepływu są wykonywane jako mierzące pośrednio, a u podstaw zasady ich działania leży użycie czujnika temperatury, ciśnienia lub sensora akustycznego (mikrofonu). W związku z tym, że zmiany fizyczne zachodzące w przemieszczającym się gazie są stosunkowo wolne, wymagania odnośnie do szerokości pasma pomiarowego są również niewielkie.

W miarę przemieszczania się w stronę pasm o większej szerokości na rys. 1, w stronę aplikacji czujników przemieszczenia, odległości oraz światła, maleją wymagania odnośnie do precyzji pomiaru. Czujniki, których zasada działania opiera się na wykorzystaniu światła wymagają przetworników o wyższej częstotliwości próbkowania, to jest SAR lub szybkich

przetworników delta-sigma. Przy dalszym wzroście częstotliwości, przy konstruowaniu sensorów obrazu i dla pomiarów testowych, wymagania odnośnie do precyzji pomiaru (rozdzielczości przetwornika) są jeszcze mniejsze. Dlatego do tych aplikacji najlepiej nadają się przetworniki SAR lub pipeline.

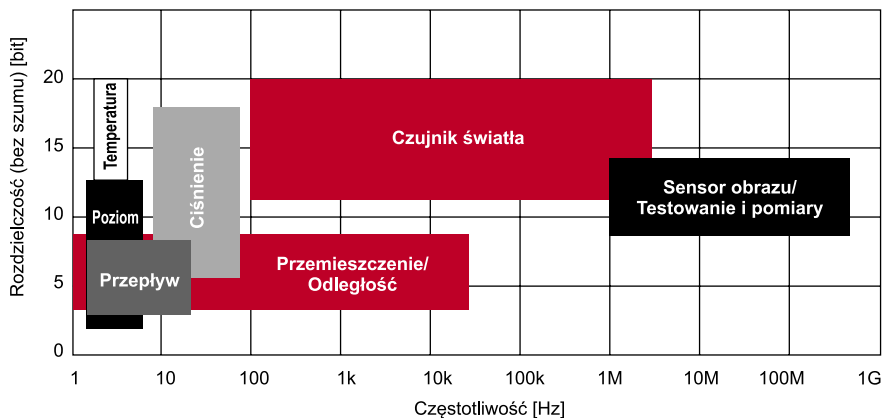
Współcześnie w handlu, oprócz przetworników o architekturze SAR, sigma-delta oraz pipeline, jest dostępnych wiele przetworników A/D o innej architekturze. Typowo przetworniki SAR i sigma-delta pracują przy sygnale wejściowym o zakresie częstotliwości od prądu stałego do małej częstotliwości, gdy dokładność jest znacznie ważniejsza niż prędkość przetwarzania. Przetworniki pipeline są bardziej odpowiednie do aplikacji o dużych wymaganiach odnośnie do szybkości.

Przetworniki delta-sigma wyznaczają wartość cyfrową przez nadpróbkowanie sygnału analogowego. Umieszczony na wejściu blok modulatora delta-sigma przetwarza wejściowy sygnał analogowy na 1-bitowy ciąg danych. Włączony za nim filtr cyfrowy gromadzi dane pochodzące z 1-bitowego strumienia i przetwarza je na wielobitowe słowo wyjściowe. Rozdzielczość wyjściowa przetwornika sigma-delta typowo mieści się w zakresie 16...24 bitów.

W odróżnieniu od przetwornika sigma-delta, przetwornik SAR pobiera wartości chwilowe analogowego sygnału wejściowego. Po pobraniu próbki, przetwornik za pomocą wewnętrznego procesu iteracyjnego ostatecznie określa cyfrowy ekwiwalent sygnału wejściowego. Rozdzielczość przetworników SAR typowo mieści się w zakresie 8...18 bitów.

Prędkość próbkowania przetworników pipeline pozwala na podpróbkowanie. W systemach podpróbkujących środek pasma sygnału wejściowego leży w obszarze o wyższej częstotliwości, niż częstotliwość próbkowania samego przetwornika. Przy użyciu przetwornika pipeline konwersja jest wykonywana z użyciem drabinki próbkująco – wzmacniającej. Wewnątrz samego przetwornika jest wiele stopni, co powoduje wydłużenie czasu latencji (*latency time*).

W przetworniku analogowo-cyfrowym czas latencji odpowiada liczbie kompletnych



Rysunek 1. Zjawiska zachodzące w świecie rzeczywistym – wymagania odnośnie do rozdzielczości pomiarowej (wolnej od zaburzeń) oraz pasma

cykli (kroków) przetwarzania sygnału pomiędzy zainicjowaniem konwersji, a dostępnością danych na wyjściu przetwornika. Jednostką pomiaru zgodną z tą definicją czasu opóźnienia jest całkowita liczba cykli. Często czas latencji podaje się również w jednostkach czasu – wówczas to informuje on użytkownika, jak szybko może być wykonany cały proces konwersji, od jej zainicjowania do gotowości danych na wyjściu.

Odwzorowanie świata rzeczywistego za pomocą przetwornika A/D

Na rysunku 2 pokazano zależność prędkości próbkowania oraz rozdzielczości przetwornika od jego architektury. Ogólnie, przetworniki delta-sigma są używane do obróbki sygnałów o małych częstotliwościach i o dużych wymaganiach odnośnie do rozdzielczości. Do zalet tych przetworników należą: energooszczędność, wysoka rozdzielczość oraz dobra stabilność przy jednocześnie niskiej cenie zakupu. Te zalety przetwornika mają wpływ przede wszystkim na część cyfrową systemu. Natomiast do wad przetworników tego typu należą mała prędkość oraz to, że niektóre z nich mają pewną liczbę cykli latencji.

Przetworniki delta-sigma mają możliwość generowania słowa danych o długości od 16 do 24 bitów, co samo w sobie robi wrażenie. Zmniejsza to liczbę układów analogowych wymaganych do obróbki sygnału, zanim ten trafi na wejście przetwornika. Dlatego ten rodzaj przetworników znajduje

zastosowanie w wielu aplikacjach współpracujących z sensorami o dużej dokładności.

Współczesne, nowoczesne przetworniki o topologii delta-sigma pracują z coraz to wyższą rozdzielczością, równie dobrze z małą, jak i z dużą prędkością próbkowania. Nadpróbkowanie leżące u podstaw zasady działania przetwornika delta-sigma pozwala na uzyskanie większej dokładności przy wyższych prędkościach próbkowania i jednocześnie zmniejszenie liczby komponentów włączonych przed przetwornikiem, oszczędzając w ten sposób czas konstruktora niezbędny na przetestowanie aplikacji oraz usunięcie błędów. Co oczywiste, zmniejsza się też przestrzeń zajmowana na płycie drukowanej oraz zostają zaoszczędzone pieniądze.

Przetworniki SAR są używane dla sygnałów wymagających średniej prędkości próbkowania, w zastosowaniach wymagających średniej lub dużej rozdzielczości. Są one stosowane przede wszystkim w aplikacjach ogólnego przeznaczenia, wymagających konwersji sygnału analogowego na cyfrowy. Ogólnie, rozdzielczość uzyskiwana przez ten typ przetwornika jest niższa niż przez delta-sigma, ale w odróżnieniu od niego, ma zero-wy cykl latencji (lub pojedynczy cykl ustalania wartości), gdy pracuje przy dużych prędkościach próbkowania. Przetworniki SAR są używane w wielu aplikacjach gromadzących dane, takich jak pętle sprzężenia zwrotnego, monitoring mocy oraz analiza sygnałów o niskiej lub średniej częstotliwości.

Zalety przetwornika SAR obejmują zero-wy cykl opóźnienia, dużą dokładność przy pomiarach DC i AC. Typowo, można je stosować w aplikacjach o niskim poborze energii, ponieważ gdy nie są używane, to automatycznie wyłączają się. Wadą przetworników SAR jest to, że górna granica częstotliwości próbkowania wynosi 5 MHz. Mimo tego, ten konwerter wypełnia lukę rozdzielczości i prędkości pomiędzy przetwornikami delta-sigma oraz pipeline.

Przetworniki pipeline są bardzo szybkie i często są używane w aplikacjach wykorzystujących technikę podpróbkowania (patrz

Tabela 1. Podstawowe parametry przetworników SAR, delta-sigma, pipeline: prędkość próbkowania, rozdzielczość i moc wymagana do zasilania			
Topologia przetwornika A/D	Prędkość próbkowania	Rozdzielczość	Uwagi
SAR	<5 Ms/s	Do 18 bitów	Nieskomplikowana zasada działania, niski koszt, mały pobór mocy.
Delta – sigma	< 625 ks/s	Do 24 bitów	Mała prędkość próbkowania, średnia cena.
	<10 Ms/s	Do 16 – 18 bitów	
Pipeline	< 500 Ms/s	Do 16 bitów	Szybka prędkość próbkowania, drogi, duża moc zasilania.

ramka). Ogólnie rzecz ujmując, przetworniki o topologii pipeline mają mniejszą rozdzielczość niż SAR lub delta-sigma. Wymagają też większej mocy do zasilania oraz nie mają zerowego czasu latencji. Jednak w większości aplikacji, w których jest używany konwerter pipeline, ten czas opóźnienia nie ma wpływu na pracę całego systemu.

Wybierając przetwornik A/D do aplikacji, dobrze jest zacząć poszukiwania od określenia architektury przetwornika. Pomocna w tym może być tabela 1. Umieszczono w niej podstawowe parametry trzech głównych architektur przetworników: SAR, delta-sigma oraz pipeline.

Jak wspomniano, przetwornik o topologii SAR jest doskonałym układem ogólnego zastosowania. Pozwala użytkownikowi na niemal dowolne wyzwalanie przetwarzania oraz wyłączenie w celu ograniczenia poboru energii. A przy tym jest tani i łatwy w użyciu. Przetworniki delta-sigma mają o wiele wyższą rozdzielczość niż SAR i wymagają nieskomplikowanej ścieżki sygnału. Przy bardzo dużej rozdzielczości (rzędu 24 bitów), przetwornik delta-sigma jest jedynym rozsądnym wyborem (przy prędkości próbkowania <625 Hz). Przetwornik pipeline jest bardzo szybki, ale za to dość kosztowny i pozwala na uzyskanie rozdzielczości co najwyżej do 16 bitów.

W tabeli 2 umieszczono miejsce w rankingu pod względem przepustowości, rozdzielczości, czasu opóźnienia oraz zapotrzebowania na moc zasilającą. Jako że technologia wytwarzania układów scalonych ulega poprawie, obszary aplikacji poszczególnych rodzajów przetworników nakładają się na siebie, a konstruktorzy mają możliwość wybierania pomiędzy nimi z uwzględnieniem priorytetów aplikacji, takich jak: moc zasilania, czas opóźnienia, dokładność pomiaru i cena.

Podsumowanie

Konstruktor zaangażowany do projektowania urządzeń wykonujących pomiary wielkości środowiskowych może wybrać konwerter SAR, delta-sigma lub pipeline. Celem tego artykułu było dostarczenie porcji wiedzy na temat tego, który przetwornik najlepiej nadaje się do projektowanej aplikacji oraz objaśnienie związków pomiędzy wymaganiami odnośnie do pasma przenoszenia i rozdzielczości konwertera sygnału analogowego. Jeśli zostały określone wymagania aplikacji odnośnie do zakresu częstotliwości i rozdzielczości, można użyć informacji zawartych w tym artykule do szybkiego rozszereżenia, która architektura przetwornika ana-

Nadpróbkowanie

W uzasadnionych przypadkach jest celowe, aby częstotliwość próbkowania była znacznie wyższa, niż to wynika z pasma sygnału. Dzięki temu jest łatwiej uniknąć zniekształceń aliasingowych, stosując relatywnie prosty antyaliasingowy filtr analogowy oraz niemal idealny filtr cyfrowy. Powód, dla którego preferuje się proste filtry analogowe jest taki, że filtry cyfrowe nie podlegają żadnym zmianom i ich odpowiedź na zadany sygnał wiernie odpowiada projektowi, co jest zadaniem trudnym do osiągnięcia w filtrach analogowych z uwagi na rozrzut parametrów i zależność od warunków środowiskowych komponentów, z których są one zbudowane. Technologia ta jest również stosowana w celu programowego zwiększenia rozdzielczości przetwornika analogowo-cyfrowego.

Podpróbkowanie

Możliwe są przypadki w których jest stosowana częstotliwość próbkowania niższa, niż częstotliwość wynikająca z kryterium Nyquista. Dla sygnałów dolnopasmowych (zawierających częstotliwości od 0 Hz do szerokości pasma), metoda ta wprowadza zniekształcenia aliasingowe, jednak dla sygnałów środkowopasmowych, w których nie ma składowych o niskich częstotliwościach, które wprowadzałyby zniekształcenia w próbkowanym sygnale o wysokiej częstotliwości (ale o wąskim paśmie), jest możliwe stosowanie niższej częstotliwości próbkowania, niż to wynika z twierdzenia o próbkowaniu.

logowo – cyfrowego jest najlepsza do opracowywanej aplikacji.

Bonnie C. Baker
Senior Applications Engineer, Texas Instruments

Bibliografia:

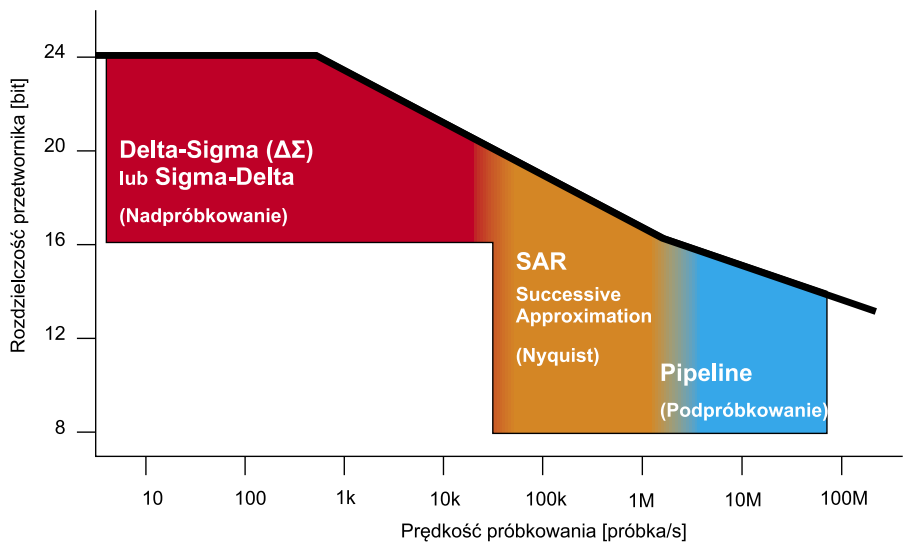
Baker, B. "A Glossary of Analog-to-Digital Specifications and Performance Characteristics," Application Report (SBAA147B), Texas Instruments, October 2011.

Linnenbrink, T.E.; Tilden, S.J.; Miller. "ADC testing with IEEE Std 1241-2000," M.T. Instrumentation and Measurement Technology Conference, 2001.

"Understanding data converters. Application report," Application Report (SLAA013), Texas Instruments, 1995.

Baker, B. A Baker's Dozen: "Real analog solutions for digital designers." Burlington, MA: Elsevier/Newnes, 2005.

www.wikipedia.org



Rysunek 2. Porównanie rozdzielczości i prędkości próbkowania przetworników delta – sigma, SAR i pipeline

Tabela 2. Ranking parametrów przetworników o architekturach pipeline, SAR i sigma – delta

Parametr	Przetwornik pipeline	Przetwornik SAR	Przetwornik sigma – delta
Prędkość konwersji	1	2	3
Rozdzielczość (ENOB)	3	2	1
Czas latencji	2	1	3
Możliwość konwersji nieperiodycznych sygnałów złożonych	2	1	3
Pobór mocy	Stały	Rośnie z częstotliwością próbkowania	Stały