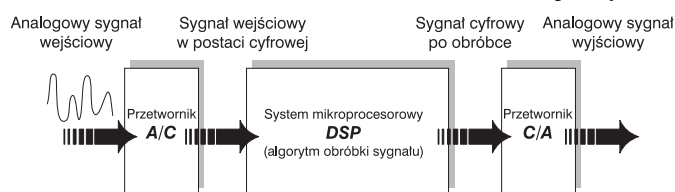


Cyfrowe przetwarzanie sygnałów

Przetwarzanie cyfrowe sygnałów analogowych ma wiele zalet, m.in. zapewnia dużą stałość parametrów urządzenia niezależną od czasu, zmian temperatury i innych czynników zewnętrznych oraz pozwala na łatwą realizację różnych funkcji bez zmian struktury układu, jedynie poprzez modyfikację programu (algorytmu) przetwarzania.

W artykule przedstawiamy skrótowo najważniejsze zagadnienia związane z przetwarzaniem cyfrowym sygnałów analogowych.



Rys. 1. Schemat blokowy układu przetwarzania cyfrowego sygnałów analogowych.

Przetwarzanie cyfrowe ma także wady, np. wprowadza zniekształcenia wynikające z przekształcania sygnału analogowego na cyfrowy, konieczna jest dodatkowa filtracja sygnałów przetwarzanych.

Przetworniki analogowo-cyfrowe (A/C) i cyfrowo-analogowe (C/A) stanowią łącznik pomiędzy światami sygnałów analogowych i cyfrowych (rys.1). Zadaniem przetworników A/C jest przekształcanie sygnału analogowego na równoważny mu dyskretny sygnał cyfrowy. Sygnały analogowe, które poddaje się konwersji na postać cyfrową mogą pochodzić z różnorodnych czujników, które zamieniają np. temperaturę, ciśnienie, prędkość, dźwięk czy obraz na sygnał elektryczny. Po konwersji na sygnał cyfrowy może on być użyty do dalszego przetwarzania zmieniającego cechy sygnału wejściowego. Najczęściej stosowane w DSP sposoby obrabiania sygnałów to: fil-

tracja, korekcja nieliniowości przetwornika wejściowego czy też eliminacja zakłóceń. Otrzymane w wyniku takiej obróbki sygnały cyfrowe muszą być często przetwarzane z powrotem na sygnał analogowy, służący do np. sterowania silnikiem, wyświetlenia obrazu na ekranie czy też odtworzenia dźwięku. Do tego celu służą przetworniki C/A.

Przetwarzanie ciągłego sygnału analogowego na sygnał cyfrowy polega na dyskretyzacji sygnału w czasie, czyli jego próbkowaniu lub dyskretyzacji wartości sygnału (kwantowaniu) oraz na kodowaniu cyfrowym uzyskanej wartości sygnału dyskretnego.

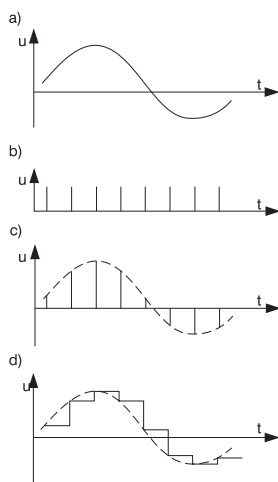
Próbkowanie polega na pobieraniu w określonych odstępach czasu próbek wartości sygnału analogowego w taki sposób, aby ciąg próbek umożliwiał jak najwierniejsze odtworzenie tego sygnału (rys.2).

Tu dochodzimy do pytania, jak często badać poziom sygnału, aby potem można było go poprawnie odtworzyć na podstawie pobranych próbek. Według fundamentalnego prawa próbkowania Shannona-Kotelnikowa, próbki powinny być pobierane z częstotliwością co najmniej dwukrotnie większą od maksymalnej częstotliwości występującej w widmie próbkowanego przebiegu. Jeśli nie spełnimy tego warunku, segmenty widma będą zachodziły na siebie (rys.3). W tej sytuacji odtwarzany przebieg będzie zniekształcony w porównaniu z oryginalnym. Zjawisko to jest nazywane w nomenklaturze technicznej „aliasing”.

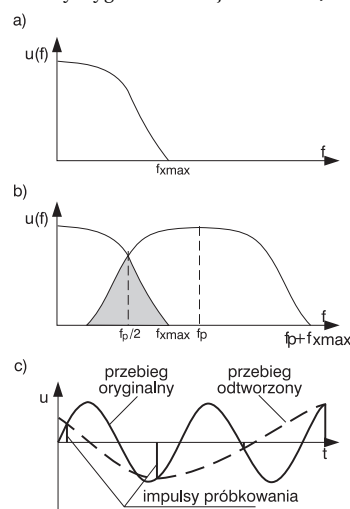
W praktyce nie można ograniczyć się do próbkowania z częstotliwością dwukrotnie większą od maksymalnej. Byłoby to możliwe, gdyby pobieranie informacji trwało nieskończenie krótko, czego w rzeczywistych układach nie da się uzyskać. W rzeczywistości impulsy próbkujące charakteryzują się pewnym czasem trwania, co wymusza zwiększenie częstotliwości próbkowania.

Dobrym przykładem jest standard CD Audio, w którym dla pasma 20Hz..20kHz stosuje się próbkowanie z częstotliwością 44,1kHz, pomimo iż teoretycznie wystarczyłoby 40kHz. Ponadto, jest to praktyczne potwierdzenie wspomnianego wcześniej prawa próbkowania, gdyż sami w domu możemy się przekonać o doskonałej jakości odtwarzanego dźwięku.

Ze względu na skończony czas potrzebny na wykonanie konwersji przez przetwornik A/C, przetwarzana wartość sygnału analogowego nie powinna w czasie konwersji ulegać zmianie. W wielu zastosowaniach szybkość zmian przetwarzanego sygnału jest tak duża, że spełnienie tego warunku nie jest możliwe bez zastosowania układów pomocniczych, które zapewniają zapamiętanie chwilowej wartości sygnału analogowego na czas przetwarzania. Funkcję tę spełniają układy próbkująco-pamiętające. W działaniu takiego układu można wyróżnić dwie fazy: fazę próbkowania i fazę pamiętania. W fazie próbkowania układ zapewnia śledzenie sygnału analogowego tak, aby w chwili przejścia do fazy pamiętania możliwe było zapamiętanie chwilowej wartości napięcia przetwarzanego. Chwile przejścia od fazy próbkowania do fazy pamiętania i odwrotnie określane są przez układ sterujący. Zależnie od sposobu sterowania istnieją dwa różne tryby pracy układów próbkująco-pamiętających. W pierwszym z nich czas, w którym układ jest w fazie próbkowania, jest bardzo krótki. W pozostałym czasie układ pamięta wartość sygnału analogowego pobraną w czasie ostatniego próbkowania. W drugim trybie układ jest w stanie próbkowania przez możliwie najdłuższy czas i śledzi sygnał analogowy (sygnał wyjściowy równy sygnałowi wejściowemu). Różni-



Rys. 2. Próbkowanie przebiegu: a) przebieg próbkowany, b) impulsy próbkujące, c) przebieg po próbkowaniu w przypadku naturalnego próbkowania punktowego, d) przebieg po próbkowaniu z zapamiętywaniem.



Rys. 3. Zniekształcenie przebiegu odtwarzanego:

a) widno sygnału przed próbkowaniem, b) nakładanie się widm po próbkowaniu (aliasing), c) niewłaściwe odtworzenie sygnału przy zbyt małej wartości częstotliwości próbkowania f_p .

Tabela 1.

Ilość bitów	Elementarne przedziały kwantowania	Dynamika [dB]	Rozdzielczość
4	15	24	62,5mV
6	63	36	15,6mV
8	255	48	3,9mV
10	1 023	60	0,98mV
12	4 095	72	240µV
14	16 383	84	61µV
16	65 535	96	15µV
18	262 143	108	3,8µV
20	1 048 575	120	0,95µV

ce kształtu przebiegu wynikające z zastosowanego rodzaju pracy przedstawia rys.4.

Kwantowanie polega na przyporządkowaniu każdej wartości sygnału pewnej skwantowanej wartości dyskretnej. Cały zakres przetwarzania dzielony jest na 2^N elementarnych przedziałów kwantowania (dla kwantowania równomiernego i sygnału wyjściowego w kodzie binarnym), gdzie N oznacza liczbę bitów słowa cyfrowego reprezentującego sygnał analogowy.

Dla przykładu - przetwornik 12-bitowy ma wartość elementarnego przedziału q równą 1/4096 zakresu przetwarzania. W procesie konwersji sygnału analogowego na sygnał cyfrowy powstają więc nieuniknione błędy przetwarzania sygnału, związane z dyskretyzacją sygnału analogowego w amplitudzie. Ich miarą jest błąd kwantyzacji, którego wartość maksymalna dla idealnego przetwornika A/C jest równa połowie wartości przedziału q (rys.5). Wartość elementarnego przedziału kwantowania jest najmniejszą wartością sygnału wejściowego rozróżnialną przez układ kwantujący czyli rozdzielczością układu. Ważnym parametrem systemu cyfrowego przetwarzania sygnałów jest dynamika przetwarzania, określona stosunkiem największej i najmniejszej wartości sygnału, jakie mogą być reprezentowane w postaci sygnału cyfrowego. Duża dynamika jest związana z dużą rozdzielczością przetwornika oraz dużą liczbą poziomów kwantyzacji. Jeżeli liczba wyjściowa przetwornika A/C ma postać N-bitowej liczby binarnej to dynamikę przetwarzania analogowego sygnału na sygnał cyfrowy możemy określić ze wzoru:

$$N_i = 20 \log(2^N - 1).$$

Tab. 1 przedstawia liczbę elementarnych przedziałów kwantowania, dynamikę oraz rozdzielczość układu dla zakresu przetwarzania równego 1V.

Wymagana minimalna rozdzielczość (lub dynamika) jest różna w zależności od zastosowania. Dla

przedstawienia sygnałów wizyjnych wystarcza rozdzielczość przetwornika 8-bitowego, w odtwarzaczach kompaktowych stosuje się zwykle przetworniki 16-bitowe, a w wolto-mierzach cyfrowych najwyższej klasy są używane przetworniki o rozdzielczości 26..28 bitów. Przy okazji należałoby zaznaczyć, że rozdzielczość nie jest równoważna z dokładnością przetwornika. Dokładność jest określana jako największa różnica między rzeczywistą, a przewidywaną wartością sygnału analogowego, dla danej wartości cyfrowej. W praktyce dla porównania różnych przetworników między sobą używa się definicji dokładności względnej A przetwornika, którą można przedstawić wzorem

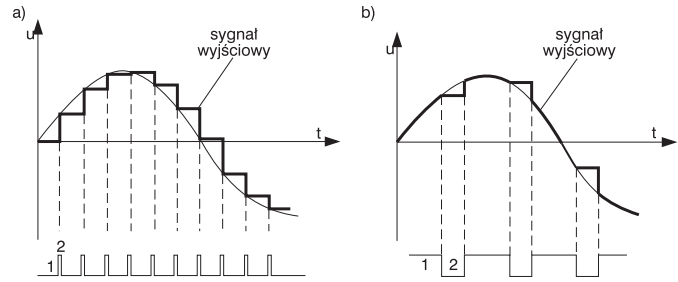
$$A = \frac{U_{wy}(rzeczywiste) - U_{wy}(oczekiwane)}{q}$$

gdzie q jest rozdzielczością przetwornika. Istnieje ścisły związek między dokładnością i rozdzielczością przetworników A/C, natomiast nie ma takiego związku dla przetworników C/A. Dokładność przetwarzania zależy, poza rozdzielczością, od błędów przesunięcia zera, wzmocnienia i nieliniowości.

Zarówno błąd zera jak i błąd wzmocnienia mogą być na ogół wyeliminowane przez regulację przetwornika za pomocą zewnętrznych potencjometrów. Polega to na doprowadzeniu do sytuacji, przy której zmiana słowa kodowego będzie występowała dla danej wartości napięcia wejściowego. Trzeci rodzaj błędów, objawiający się zniekształceniami charakterystyki przejściowej przetwornika w stosunku do charakterystyki idealnej, nie podlega eliminacji. Praktycznie istnieje tylko jedna metoda zmniejszenia błędów liniowości - użycie przetwornika o większej rozdzielczości (liczbie bitów) niż niezbędne minimum. Większość przetworników ma liniowość nie gorszą niż $\pm 0,5q$. Załóżmy, że potrzebny jest przetwornik 8-bitowy o bardzo dobrej liniowości. Jeśli użyjemy przetwornik 12-bitowy, to używając jedynie 8 spośród 12 bitów otrzymamy liniowość $\pm 1/32q$ w odniesieniu do 8 bitów. Parametry dynamiczne, w porównaniu z przedstawionymi wcześniej głównymi parametrami statycznymi, opisują właściwości i pewne efekty związane z szybkością pracy przetworników.

Czas przełączania (*switching time*) określa czas zmiany napięcia wyjściowego przetwornika C/A od wartości początkowej do 90% zakresu zmiany napięcia wyjściowego.

Czas ustalania (*setting time*) lub czas konwersji przetwornika C/A jest to czas, po którym sygnał wyjściowy przetwornika ustali się z dokładnością lepszą niż 0,5LSB. Czas ten zależy od tego czy sygnałem wyjściowym



Rys. 4. Tryby pracy układów pamiętających:

a) próbkująco-pamiętającego, b) śledząco-pamiętającego. 1 - faza pamiętania, 2 - faza próbkowania.

wym przetwornika jest prąd czy napięcie i jest znacznie krótszy dla wyjścia prądowego. Przetworniki z wyjściem napięciowym mają w stopniu wyjściowym wzmacniacz operacyjny, który ogranicza znacznie szybkość zmian napięcia wyjściowego i zwiększa czas ustalania.

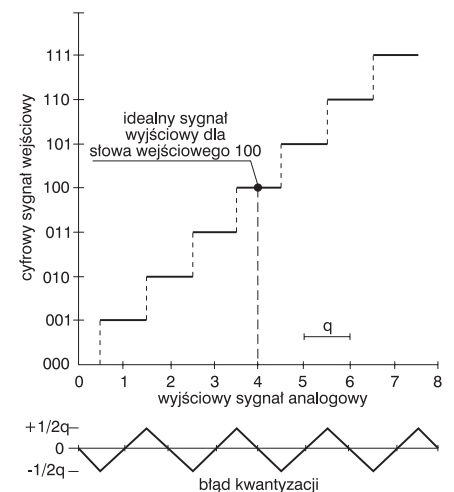
Maksymalna częstotliwość przetwarzania (*update rate, conversion rate*) określa maksymalną liczbę konwersji na sekundę przetwornika C/A, przy których są zachowane gwarantowane parametry przetwornika. Parametr ten jest podawany w MHz lub w liczbie przetworzeń na sekundę tj. MSPS (*mega samples per second*). Przy przełączaniu przetwornika C/A na jego wyjściu mogą się pojawić szpilki napięcia związane z przenikaniem przez pojemności pasozytnicze cyfrowych sygnałów przełączających klucze analogowe oraz z nierównoczesnym przełączaniem przez te klucze prądów wewnątrz przetwornika.

Czas konwersji przetwornika A/C jest czasem potrzebnym do jednego całkowitego przetworzenia sygnału analogowego na wartość cyfrową z pełną założoną dokładnością.

Krzysztof Różyć, AVT
Ryszard Szymaniak, AVT

Zainteresowanych szczegółami budowy i zasadą działania poszczególnych przetworników namawiamy do skorzystania z dostępnej literatury, m.in.:

1. Z. Kulka, A. Libura, M. Nadachowski „Przetworniki analogowo-cyfrowe i cyfrowo-analogowe“
2. M. Łakomy, J. Zabrodzki „Scalone przetworniki analogowo-cyfrowe i cyfrowo-analogowe“



Rys. 5. Błąd kwantyzacji na przykładzie przetwarzania C/A.