

Politechnika Łódzka
Instytut Systemów Inżynierii Elektrycznej

Instrukcja do ćwiczenia

Przetwarzanie analogowo-cyfrowe

1. Cel ćwiczenia

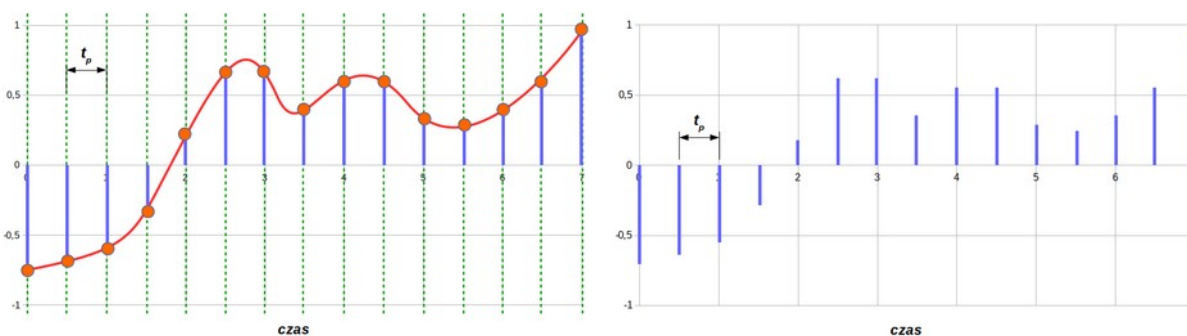
Cele ćwiczenia:

- poznanie etapów procesu przetwarzania sygnału analogowego do postaci cyfrowej,
- poznanie metod przetwarzania analogowo-cyfrowego,
- wyznaczenie podstawowych parametrów przetworników analogowo-cyfrowych.

2. Podstawy teoretyczne

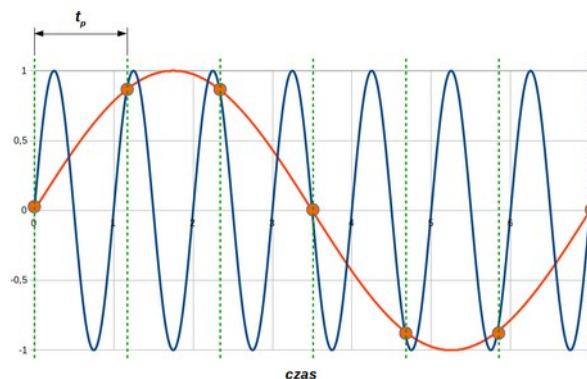
Przetwornik analogowo-cyfrowy (ang. ADC – Analog to Digital Converter) to urządzenie służące do zmiany sygnału analogowego na sygnał cyfrowy. Analogicznie urządzenie odtwarzające sygnał analogowy na podstawie informacji cyfrowej nazywa się przetwornikiem cyfrowo-analogowym (ang. DAC – Digital to Analog Converter). Oba rodzaje przetworników znajdują szerokie zastosowanie w systemach transmisyjnych, układach pomiarowych i praktycznie w każdym współczesnym sprzęcie elektronicznym, w którym zachodzi proces przetwarzania i obróbki sygnału (np. telewizja cyfrowa, telefonia komórkowa, urządzenia audio/video, sprzęt komputerowy itp.). Przetwarzanie sygnału analogowego do formy cyfrowej polega na jego uproszczeniu z postaci ciągłej do postaci skwantowanej (dyskretnej), przy czym proces ten zachodzi przy skończonej dokładności odwzorowania. Przetwarzanie analogowo-cyfrowe składa się z trzech etapów: próbkowania, kwantyzacji i kodowania.

Próbkowanie to zamiana sygnału ciągłego o czasie ciągłym na ciąg próbek odpowiadających wartościom sygnału ciągłego pobranych w określonych chwilach. Oznacza to, że sygnał ciągły jest obserwowany w określonych chwilach, najczęściej w jednakowych odstępach czasu i tylko w tych chwilach rejestrowana jest jego wartość (rys. 1). Istotną rolę w procesie próbkowania odgrywa dobór odstępu czasu t_p między próbkami (częstotliwości próbkowania $f_s = 1/t_p$). Przyjęcie zbyt krótkiego czasu t_p (duża częstotliwość próbkowania) oznacza dobre odwzorowanie dynamiki sygnału, jednak wiąże się ze znacznym nadmiarem i silną korelacją próbek, co znacząco komplikuje proces obliczeniowy i generuje większe koszty. Zbyt długi czas próbkowania (niska częstotliwość próbkowania) wiąże się z niejednoznacznością w interpretacji składowych o małej i dużej częstotliwości sygnału próbkowanego. Zjawisko to określa się jako aliasing i może ono stanowić źródło błędów w procesie przetwarzania cyfrowego sygnałów. Wystąpienie ewentualnego błędów jest następstwem niejednoznaczności w interpretacji uzyskanych próbek.



Rys. 1. Próbkowanie.

Na rysunku 2 przedstawiono ciąg wartości o czasie dyskretnym próbkowanych w odstępach t_p oraz dwa przebiegi sinusoidalne o różnej częstotliwości przechodzące przez punkty tego dyskretnego ciągu. Należy zauważyć, że jeśli ciąg próbek reprezentuje przebieg sinusoidalny, to niemożliwe jest bez niejednoznaczności określenie częstotliwości przebiegu sinusoidalnego jedynie na podstawie wartości próbek.



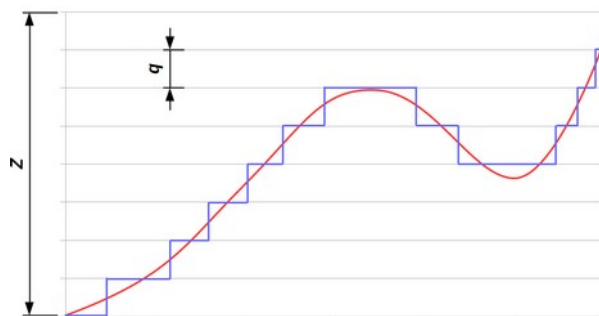
Rys.2. Aliasing.

Jeśli zatem ciąg $x(n)$ próbek reprezentuje sinusoidę o częstotliwości f_0 Hz, to również reprezentuje wszystkie przebiegi sinusoidalne o częstotliwości $(f_0 + kf_s)$ Hz, gdzie k jest dowolną liczbą całkowitą, a f_s jest częstotliwością próbkowania. W celu wyznaczenia składnika częstotliwościowego próbkowanego sygnału analogowego wymagane są co najmniej dwie próbki w ciągu okresu, gdyż co najmniej dwa punkty jednego okresu określają jedną falę. Oznacza to, że częstotliwość próbkowania musi być co najmniej dwa razy wyższa od maksymalnej częstotliwości obserwowanego sygnału. Bardzo często przed procesem próbkowania sygnał analogowy poddaje się filtracji w celu wyeliminowania składowych o częstotliwościach wyższych od maksymalnej. Dobranie częstotliwości próbkowania dwa razy wyższej od maksymalnej składowej odfiltrowanego sygnału analogowego gwarantuje dokładność wyników dla wszystkich składowych o częstotliwościach niższych niż maksymalna. Należy zaznaczyć, że proces próbkowania jest procesem w pełni odwracalnym, jeśli częstotliwość próbkowania jest większa od dwukrotności szerokości pasma B próbkowanego sygnału analogowego ($f_s > 2B$ – twierdzenie o próbkowaniu).

Kwantyzacja to ograniczenie dokładności danych wynikające z podziału zbioru wartości tych danych na rozłączne przedziały. Każda dana, w zależności od wartości trafia w konkretny przedział, gdzie w wyniku kwantyzacji jest odwzorowywana wartością przypisaną do danego przedziału – tzw. poziom reprezentacji. Zasadniczo kwantowanie polega na podzieleniu zakresu zmian wartości sygnału na skończoną liczbę przedziałów kwantyzacji, a następnie przybliżeniu wartości chwilowych próbek uzyskanych w wyniku próbkowania wartościami przyporządkowanymi poszczególnym przedziałom. Proces ten z założenia jest nieodwracalny i nieliniowy oraz wprowadza błąd. Wynika to z faktu, że do jednego przedziału może trafić kilka danych o różnych, aczkolwiek zbliżonych wartościach i wszystkie w wyniku odwzorowania otrzymają identyczną wartość wyjściową przypisaną do tego przedziału. Cały proces przypomina zaokrąglanie do przyjętych przedziałów (do przyjętej skali). W rezultacie na tym etapie przetwarzania sygnał dyskretny (efekt próbkowania) zostaje przybliżony sygnałem cyfrowym przyjmującym skończoną liczbę wartości (efekt kwantyzacji). Istnieje szereg rodzajów kwantyzacji. Jedną z najprostszych jest metoda kwantowania równomiernego (modulacja kodowo-impulsowa PCM). Polega ona na podzieleniu całego zakresu, w jakim może zmieniać się sygnał wejściowy, na k równomiernie rozłożonych przedziałów kwantowania o stałych szerokościach. Jeżeli do reprezentacji próbki przeznaczonych jest n bitów, wówczas całkowita liczba reprezentowanych k wartości sygnału opisuje zależność: $k = \frac{Z}{q} = 2^n$ gdzie q – przedział kwantowania (kwant przetwornika), Z – nominalny

zakres przetwarzania. Jeżeli sygnałem wejściowym jest napięcie, wówczas zakres przetwarzania należy utożsamiać z zakresem pomiarowym ($Z = U_{max} - U_{min}$), a kwant q z wagą napięciową najmniej znaczącego bitu. Jeśli przetwornik 10-bitowy charakteryzuje się zakresem pomiarowym 1V, to kwant

równy jest $q = \frac{1V}{2^{10}} = \frac{1}{1024} \approx 1mV$. Wartość q nazywana jest również Least Significant Bit (LSB), ponieważ odpowiada zmianie najmniej znaczącego bitu słowa.

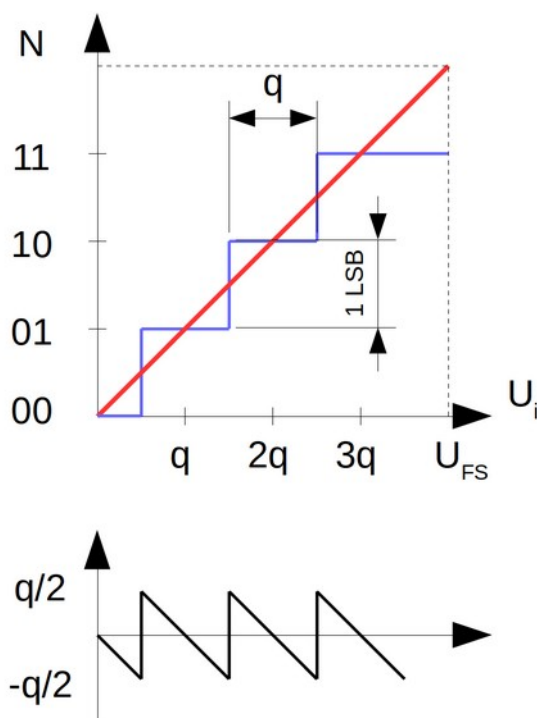


Rys. 3. Kwantyzacja równomierna PCM.

Istotnym parametrem przetwornika jest zakres dynamiczny. Jest to stosunek nominalnego zakresu przetwarzania $Z=2^n q$ do wartości przedziału kwantowania q wyrażony w decybelach:

$$D = 20 \log\left(\frac{Z}{q}\right) = 20 \log(2^n) = 20n \log(2) = 6,02n [dB]$$

Sygnal po kwantowaniu ma postać schodkową (rys. 3) co jest efektem degradacji (przybliżenia) i nie jest możliwa idealna rekonstrukcja takiego sygnału. Ponadto schodkowy charakter sygnału powoduje pojawienie się wyższych harmonicznych, będących przyczyną zniekształceń nieliniowych. Błędy kwantyzacji ogólnie określa się mianem szumu kwantyzacji, ponieważ można je traktować jako szum dodawany do sygnału.



Rys. 4. Charakterystyka przetwarzania i towarzyszący jej błąd kwantyzacji dla przetwornika 2-bitowego.

Należy zauważyć, że szum kwantyzacji jest tym mniejszy, im więcej przyjęto poziomów kwantyzacji, czyli im mniejszy jest schodek na wykresie. Na rysunku 4 przedstawiono przebieg charakterystyki przetwarzania przy nieskończenie dużej rozdzielczości (kolor czerwony) przechodzącej przez środek

przedziałów kwantowania, łącząc początek układu współrzędnych z maksymalną wartością słowa wyjściowego 11. Odchylenie charakterystyki przetwarzania (kolor niebieski) od tej prostej wyznacza błąd kwantyzacji zmieniający się w przedziale od $-q/2$ do $q/2$. Średnia wartość błędu kwantyzacji w pełnym rzeczywistym zakresie jest w tym przypadku równa zero, a jest to następstwem przesunięcia charakterystyki o $q/2$ w stosunku do początku układu współrzędnych. Przejście ze stanu 00 do 01 następuje wówczas przy napięciu $U_i=q/2$. Wartość międzyszczytowa napięcia szumu kwantyzacji jest równa przedziałowi kwantowania q , a wartość skuteczna obliczona dla przebiegu piłokształtnego jest równa $q/\sqrt{12}$. Szum kwantyzacji wynika bezpośrednio z samego procesu kwantyzacji, więc pełne wyeliminowanie tego efektu jest niemożliwe. Jedyną możliwością zredukowania jego wartości jest zastosowanie przetwornika o mniejszym błędzie kwantyzacji, co jest równoznaczne z zastosowaniem przetwornika o większej rozdzielczości. Należy zauważyć, że wartość zniekształceń bardzo silnie zależy od stosunku bieżącego poziomu sygnału odniesionego do maksymalnego zakresu przetwarzania przetwornika. Jeśli przy dużym zakresie przetwornika będzie wykorzystane zaledwie kilka procent jego zakresu, to efekt będzie identyczny z zastosowaniem przetwornika o zdecydowanie węższym zakresie.

Kodowanie polega na przypisaniu słów bitowych/cyfrowych poszczególnym poziomom kwantyzacji. Dyskretny ciąg próbek jest odwzorowywany w procesie kwantowania za pomocą słów bitowych /cyfrowych przypisanych poziomom kwantyzacji. Jest to proces istotny z punktu widzenia komunikacji przetwornika z innymi urządzeniami cyfrowymi (np. mikrokontrolerem). Najczęściej stosowanymi w praktyce kodami są: naturalny kod binarny NB, kod dwójkowy przesunięty, kod uzupełnień do dwóch ZU2 oraz kod BCD – dziesiętny z zapisem dwójkowym.

W naturalnym kodzie dwójkowym NB zależność pomiędzy wartością analogową napięcia U_a i słowem cyfrowym NB określa zależność:

$U_a = q \cdot (a_{n-1} \cdot 2^{n-1} + \dots + a_2 \cdot 2^2 + a_1 \cdot 2^1 + a_0 \cdot 2^0)$, gdzie q – przedział kwantowania, a_i – bity słowa cyfrowego NB. Bit a_{n-1} jest bitem najbardziej znaczącym o wadze $\frac{1}{2} FS$ (ang. MSB – ang. Most Significant Bit). FS (ang. Full Scale) oznacza pełny zakres wejściowy przetwornika. Bit a_0 jest bitem najmniej znaczącym o wadze $2^{-n} FS$ (ang. LSB – ang. Least Significant Bit). Należy zauważyć, że słowo bitowe złożone z samych jedynek nie odpowiada wartości pełnego zakresu przetwarzania FS , lecz jest mniejsze o wagę najmniej znaczącego bitu LSB ($1-2^{-n}$). Dla $n=10$ (przetwornik 10-bitowy) i zakresu $FS=(0-1)V$ kod NB=1111111111 odpowiada wartości $U = (1-2^{-10})1 V \approx 0,999 V$. Naturalny kod bitowy sprawdza się w przypadku przetworników unipolarnych. W przypadku przetworników bipolarnych pojawia się konieczność kodowania liczb ujemnych i zapisu znaku. W tym celu najczęściej stosuje się kod dwójkowy przesunięty lub kod uzupełnień do dwóch.

W kodzie dwójkowym przesuniętym zasada kodowania jest identyczna z zasadą funkcjonującą w naturalnym kodzie binarnym, z tą różnicą, że zakres przetwarzania jest przesunięty o połowę, czyli o wartość najbardziej znaczącego bitu MSB ($\frac{1}{2}FS$).

W kodzie uzupełnieniowym do dwóch suma dwóch słów kodowych odpowiadających modułowi identycznych co do wartości, ale o różnych znakach wartości analogowych wynosi zero. W wyniku pomija się przeniesienie. Jest on obecnie najczęściej wykorzystywaną metodą kodowania, ponieważ operacje dodawania i odejmowania liczb ze znakiem wykonuje się identycznie jak dla liczb bez znaku. Nazwa kodu wynika z metody obliczania liczb przeciwnych, tj. dla liczb n -bitowych wartości przeciwne uzyskuje się, odejmując liczbę od dwukrotnej wagi najstarszego bitu. W kodzie można na n -bitach zapisać liczby z przedziału $[-2^{n-1}, 2^{n-1}-1]$, przy czym w kodzie występuje tylko jedno zero i w efekcie kodowany zakres nie jest symetryczny. W kodzie dwójkowym NB najstarszy bit liczby n -bitowej ma wagę 2^{n-1} . W kodzie uzupełnieniowym do dwóch zmienia się wagę tego bitu na przeciwną,

czyli -2^{n-1} . W efekcie najstarszy bit oprócz kodowania liczby koduje również jej znak. Jeśli bit jest ustawiony na 0, to jest to liczba dodatnia lub równa zero, jeśli 1 to jest to liczba ujemna. Dla jednego bajtu (słowo 8-bitowe) liczba -2^{n-1} (binarnie 10000000) nie ma liczby przeciwnej i tak stosując kod uzupełnieniowy do dwóch, można na 8 bitach zakodować liczby z przedziału -128 do 127. Różnica pomiędzy kodem uzupełnieniowym do dwóch a kodem dwójkowym przesuniętym wynika z zanegowania najbardziej znaczącego bitu MSB (bitu znaku).

W kodzie BCD (Binary-Coded Decimal) zapis liczby polega na kodowaniu na 4 bitach kolejnych cyfr z zapisu dziesiętnego. Na zakodowanie każdej kolejnej cyfry wykorzystuje się 4 bity (wykorzystuje się 10 z 16 możliwych kombinacji). Liczba 128 zakodowana w kodzie BCD 0001 0010 1000. Kod wykorzystywany był często w aparaturze pomiarowej do kodowania wyników wyświetlanych na wyświetlaczach numerycznych (każda cyfra wyniku na 4 bitach).

Metody przetwarzania A/C

Trójetapowy proces przetwarzania analogowo-cyfrowego może być zrealizowany za pomocą różnych metod przetwarzania. Metoda przetwarzania wynika z samej konstrukcji i typu pracy przetwornika. Metody przetwarzania sygnału analogowego na sygnał cyfrowy klasyfikuje się zasadniczo w dwóch grupach: metody bezpośrednie (porównawcze) – sygnał cyfrowy jest formowany na podstawie wyniku porównania napięcia przetwarzanego z napięciem wzorcowym oraz metody pośrednie (przetworzeniowo-porównawcze) – sygnał cyfrowy jest formowany w dwóch krokach: najpierw napięcie przekształcane jest na wielkość pośrednią (np.: czas, częstotliwość), następnie tę wielkość przetwarzają na sygnał cyfrowy. Popularność danej metody przetwarzania analogowo-cyfrowego wynika głównie z możliwości i prostoty implementacji sprzętowej danego algorytmu. Obecnie najczęściej wykorzystuje się metodę: bezpośredniego porównania, kompensacyjną wagową (z kolejnym porównaniem), czasową z dwukrotnym całkowaniem, metodę częstotliwościową oraz delta-sigma. Dwie pierwsze metody to tzw. metody bezpośrednie, metoda czasowa, częstotliwościowa i delta-sigma to metody pośrednie. Nazwa metody przetwarzania określa najczęściej nazwę/typ przetwornika.

W metodzie bezpośredniego porównania napięcie wejściowe n -bitowego przetwornika jest porównywane jednocześnie z 2^{n-1} poziomami odniesienia (wzorcami) za pomocą 2^{n-1} liczby komparatorów (układów porównujących). Po zakodowaniu stanów wyjść komparatorów otrzymuje się cyfrową reprezentację wartości napięcia. Zaletą tego rozwiązania jest bardzo duża szybkość przetwarzania, wadą duża liczba komparatorów w przetwornikach wielobitowych.

W metodzie kompensacyjnej wagowej (ang. SAR Successive Approximation Register) dla n -bitowego przetwornika w kolejnych n iteracjach porównywane jest napięcie wejściowe z napięciem referencyjnym (kompensującym) wytwarzanym przez przetwornik C/A (cyfrowo-analogowy). W pierwszej iteracji napięcie wejściowe porównuje się z połową zakresu przetwarzania. Wynik ustala w rejestrze wartość najstarszego bitu słowa wyjściowego oraz wartość najstarszego bitu wejścia przetwornika C/A. W kolejnych iteracjach napięcie referencyjne dzieli się coraz gęściej (najczęściej z dwukrotnym skokiem). Po n -tym porównaniu stan rejestru wyjściowego jest cyfrową reprezentacją napięcia wejściowego, stąd metoda nazywana jest metodą sukcesywnych aproksymacji.

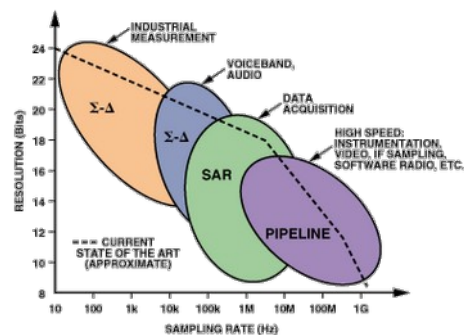
Metoda czasowa z dwukrotnym całkowaniem polega na sprowadzaniu napięcia wyjściowego integratora (układu całkującego) do zera przez wielokrotne całkowanie. Występują dwie fazy całkowania: całkowanie napięcia wejściowego i całkowanie napięcia odniesienia o znaku przeciwnym do napięcia wejściowego. Napięcie wyjściowe określa się na podstawie kalibrowania lub pomiaru czasu całkowania. W typowym rozwiązaniu najpierw przez określony czas całkuje się napięcie

wejściowe, a następnie całkuje napięcie odniesienia, mierząc czas potrzebny do sprowadzenia wartości całki do zera. Czas drugiego całkowania jest proporcjonalny do napięcia wejściowego. Zaletą metody jest duża dokładność i mała wrażliwość na szумы i zakłócenia szczególnie wysokich częstotliwości (efekt całkowania). Wadą jest bardzo mała szybkość działania.

Metoda częstotliwościowa polega na zmianie wartości napięcia wejściowego na sygnał impulsowy o częstotliwości proporcjonalnej do wartości tego napięcia. Impulsy są zliczane w stałym czasie wyznaczanym przez generator wzorcowy. Jest to, podobnie jak metoda z dwukrotnym całkowaniem, metoda integracyjna.

W metodzie delta-sigma ($\Delta\Sigma$) konwersja sygnału analogowego na cyfrowy odbywa się na zasadzie modulacji sygnału. Etap ten realizuje modulator $\Delta\Sigma$, czego efektem jest ciąg bitów zakodowany w postaci gęstości impulsów na wyjściu. Dokładność odwzorowania sygnału wejściowego zależy od liczby impulsów wytworzonego strumienia bitów, a ta zależy od częstotliwości próbkowania, dlatego stosuje się nadpróbkowanie, czyli zwiększenie częstotliwości próbkowania powyżej składowych widmowych sygnału (twierdzenie o próbkowaniu).

W układach specjalnych stosowane są metody złożonej konwersji np. potokowej – wielostopniowej, szeregowej konwersji z układem śledząco-pamiętającym (pipeline ADC). Metoda charakteryzuje się bardzo dużą częstotliwością przetwarzania i jednocześnie małym zużyciem energii.



źródło: Analog Devices <http://analog.com>

Rys. 4. Porównanie metod konwersji w zależności od rozdzielczości bitowej i szybkości próbkowania.

Obecnie najpopularniejszym na rynku typem przetworników analogowo-cyfrowych są przetworniki delta-sigma ($\Delta\Sigma$) (rys.4). Wynika to głównie z ich parametrów przetwarzania, czyli dużej rozdzielczości bitowej dostępnej przy znacznej szybkości próbkowania. Oferowane parametry odpowiadają zakresom typowym dla zastosowań przemysłowych oraz zakresom przetwarzania sygnałów mowy (telefonii cyfrowej, zapis/odczyt audio itp.). W systemach wymagających wysokich częstotliwości próbkowania (szybkie zmiany sygnału przetwarzanego) stosuje się metody szybkie (kompensacyjne SAR) lub metody złożone np. pipeline.

Podstawowe parametry przetworników A/C

Zakres przetwarzania FS – pełny zakres napięcia sygnału wejściowego przetwornika.

Rozdzielczość przetwornika (resolution) – stosunek przedziału kwantyzacji q do pełnego zakresu wejściowego przetwornika FS – jest odwrotnością liczby poziomów kwantyzacji. Parametr ten jest granicą dokładności przetwornika wynikająca bezpośrednio z procesu kwantyzacji.

$$\text{resolution} = \frac{q}{FS} = \frac{1}{2^n}$$

Rozdzielczość układu kwantowania (przedział kwantowania) – liczba stanów wyjściowych (cyfrowych) wyrażona w bitach, czyli przedział wartości sygnału analogowego, któremu odpowiada to samo słowo kodowe na wyjściu.

$$q = \frac{FS}{2^n}$$

Dokładność przetwornika (błąd bezwzględny lub względny) – największa różnica między rzeczywistą a przewidywaną wartością sygnału analogowego dla danego słowa cyfrowego.

$\Delta U_b = U_r - U_{ref}$, gdzie U_r – wartość rzeczywista, U_{ref} – wartość przewidywana. (U_{ref} – może się mylić z napięciem odniesienia przetwornika)

W postaci względnej:

$$\delta = \frac{\Delta U_b}{FS}$$

Dokładność względną przetwornika można interpretować jako odchylenie cyfrowego sygnału wyjściowego przetwornika od linii prostej wykreślonej między zerem a punktem pełnego zakresu przetwarzania.

W przypadku idealnego przetwornika analogowo-cyfrowego dokładność jest równa połowie przedziału kwantyzacji $q/2$, czyli $\frac{1}{2}$ LSB.

Czas przetwarzania (conversion time) – czas konieczny do jednego całkowitego przetworzenia na wielkość cyfrową, z określoną rozdzielczością sygnału analogowego o wartości równej pełnemu zakresowi przetwarzania. W większości przetworników parametr ten podaje się jako czas upływający od chwili podania sygnału inicjującego przetwarzanie do chwili pojawienia się pełnej wartości cyfrowej na wyjściu.

Szybkość bitowa (ang. bit rate) – liczba bitów wyniku przetwarzania, uzyskana w jednostce czasu (np. bitów /s, megabitów /s).

Błąd kwantyzacji (błąd cyfrowy) – opisany w podrozdziale kwantyzacja.

Błąd wzmocnienia (skalowania) gain error (błąd analogowy) – odchylenie Δ_{FS} rzeczywistej wartości pełnego nominalnego zakresu przetwarzania od wartości idealnej. Jest on wyrażany jako procentowa wartość względna.

Błąd przesunięcia zera offset error (błąd analogowy) - różnica między rzeczywistą a idealną wartością sygnału analogowego dla minimalnej lub zerowej wartości cyfrowej.

Nieliniowość całkowita (Integral Nonlinearity – INL) – największe odchylenie rzeczywistej charakterystyki przetwarzania od linii prostej.

Nieliniowość różniczkowa (Differential Nonlinearity – DNL) – lokalne odchylenia charakterystyki przetwarzania od linii prostej. Jeżeli zmiany na charakterystyce spełniają warunek $|DNL| < 1\text{LSB}$ wówczas nie występuje tzw. pomijanie kodów (missing codes).

3. Opracowanie wyników pomiarów

3.1. Parametry badanego przetwornikach

Parametr	Przetwornik 1	Przetwornik 2
Typ (n-bitowy)		
Zakres przetwarzania FS		
Przedział kwantowania		
Rozdzielczość		

3.2. Badanie przetwornika analogowo-cyfrowego

Wyznaczanie wartości napięcia zmiany najmniej znaczącego bitu LSB

Przetwornik 1

$NB_{\frac{1}{2} FS}$	$NB_{\frac{1}{2} FS} + LSB$	ΔU_{LSB}
		Średnia:

Przetwornik 2

$NB_{\frac{1}{2} FS}$	$NB_{\frac{1}{2} FS} + LSB$	ΔU_{LSB}
		Średnia:

Wyznaczanie charakterystyki przetwarzania

Przetwornik 1

% NB	U dla zmiany NB w górę	U dla zmiany NB w dół
0		
10		

20		
30		
40		
50		
60		
70		
80		
90		
100		

Przetwornik 2

<i>% NB</i>	<i>U dla zmiany NB w górę</i>	<i>U dla zmiany NB w dół</i>
0		
10		
20		
30		
40		
50		
60		
70		
80		
90		
100		