

Przetworniki CDC (1)

Modulacja Sigma – Delta w przetwornikach pojemność – cyfra

Prezentujemy nową generację przetworników analogowo-cyfrowych, przetwarzających pojemność na cyfrę. Zaczyna się je coraz częściej stosować jako elementy klawiatur pojemnościowych i sensorów służących do pomiaru poziomu, ciśnienia, położenia obiektu itp. Rozpoczynamy od części teoretycznej, prezentującej podstawy wiedzy na temat przetwarzania cyfrowego, potem, aby przedstawić praktyczne rozwiązania wykorzystujące układy scalone AD7745/46, AD7150/52 firmy Analog Devices.

Podstawowe wiadomości – nadpróbkowanie, cyfrowa filtracja, kształtowanie szumu oraz decymacja

Bez większych trudności powinniśmy zrozumieć zasadę pracy przetwornika $\Sigma\text{-}\Delta$, jeśli tylko ominie pewne szczegóły matematyczne. W tym artykule spróbujemy podjąć się tego zadania w przystępny sposób.

Przetwarzanie $\Sigma\text{-}\Delta$ opiera się o analogowe elementy elektroniczne (komparator, źródło referencyjne, przełącznik, integrator oraz układ sumujący) oraz dość złożony cyfrowy układ obliczeniowy. Jednym z jego elementów jest filtr cyfrowy. Przeważnie jest to filtr dolnoprasmowy, lecz nie jest to regułą. Aby móc korzystać we własnych aplikacjach z przetworników CDC nie jest konieczna dokładna znajomość teorii filtrów i wyższej matematyki a jedynie garść informacji teoretycznych. Do zrozumienia przetwarzania $\Sigma\text{-}\Delta$ musimy poznać następujące pojęcia: nadpróbkowanie, kształtowanie szumu kwantyzacji, cyfrowa filtracja oraz decymacja.

Nadpróbkowanie w dziedzinie częstotliwości

Konwersja sygnału DC posiada błąd kwantyzacji mniejszy lub równy 50% LSB. Próbkując dane zawsze borykamy się z szumem kwantyzacji, jest to tak zwana konwersja stratna. Idealne próbkowanie N-bitowe posiada wartość skuteczną (RMS) szumu kwantyzacji równą $\frac{q}{\sqrt{12}}$, zawierając się jednocześnie w paśmie Nyquist-a od 0 do $f_s/2$ (gdzie q jest stanem LSB a f_s jest częstotliwością próbkowania (rys. 1a)). Zatem, stosunek sygnału do szumu (SNR) wejściowego sygnału sinusoidalnego będzie równy $6,02 \times N + 1,76$ dB. Jeśli prze-

twarzanie ADC jest poniżej wytycznych oraz szum jest większy niż teoretyczne minimalny szum kwantyzacji, wówczas skuteczna rozdzielczość przetwornika będzie mniejsza niż N bitów. Wyżej wspomniana rozdzielczość (często używana nazwa to efektywna rozdzielczość bitowa (ENOB)) będzie wyrażona:

$$ENOB = \frac{SNR - 1,76dB}{6,02dB}$$

Jeśli weźmiemy większą częstotliwość próbkowania Kf_s (patrz rys. 1b), RMS szumu kwantyzacji pozostaje $\frac{q}{\sqrt{12}}$, lecz szum jest rozproszony na całe pasmo od DC do $Kf_s/2$.

Stosując na wyjściu filtr cyfrowy dolnoprzepustowy możemy usunąć dużą część szumu kwantyzacji bez wywierania wpływu na pożądaną sygnał, czyli ENOB ulega poprawie. Osiągamy wysoką rozdzielczość przetwarzania A/D (24-bitowe słowo kodowe) przy niskiej rozdzielczości przetwornika ADC (1-bitowy przetwornik $\Sigma\text{-}\Delta$). Współczynnik K nazywany jest współczynnikiem nadpróbkowania. W tym momencie należy dodać, iż nadpróbkowanie przynosi dodatkową korzyść przy wymogu stosowania analogowego filtra antyaliasingowego. Jest to znaczna korzyść przetwarzania $\Sigma\text{-}\Delta$, zwłaszcza dla użytkowników aplikacji audio, gdzie ma znaczenie ostre odcięcie w liniowej fazie filtra.

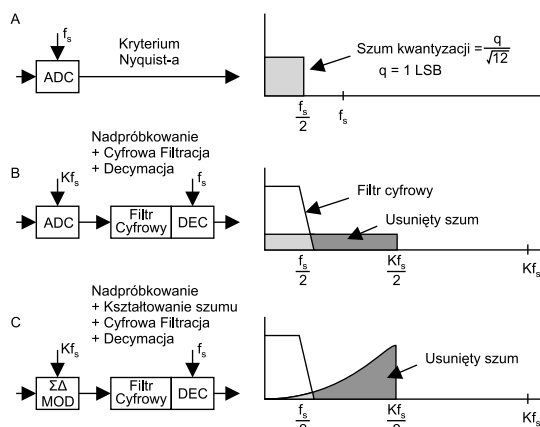
Decymacja

Pasma jest zredukowane dzięki zastosowaniu filtra cyfrowego na wyjściu. Częstotliwość próbkowania na wyjściu może być mniejsza od oryginalnej częstotliwości próbkowania (Kf_s) i wciąż spełniać kryterium Nyquist-a. Przepuszczamy każdą M-tą próbkę i odrzucamy resztę. Taki proces nosi nazwę decymacji o współczynniku M. Wbrew oryginalnego pochodzenia terminu współczynnik M może przybierać wartość każdej liczby całkowitej, pod warunkiem, że częstotliwość próbkowania na wyjściu będzie dwa razy większa niż pasmo sygnału. Decymacja nie wprowadza żadnych strat w informacji (rys. 1b).

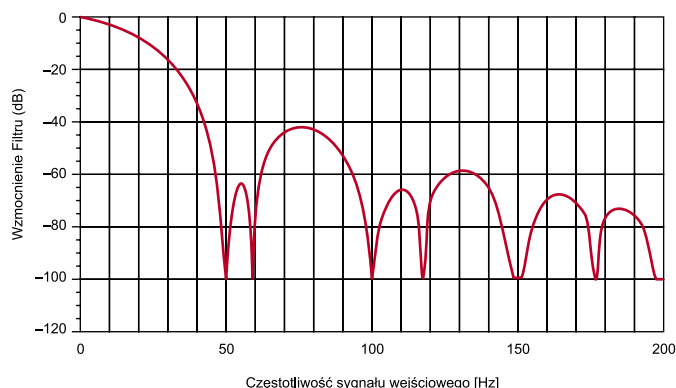
Proste użycie nadpróbkowania powiększa rozdzielczość. Aby uzyskać wzrost rozdzielczości o N bitów, należy użyć współczynnika nadpróbkowania równego 2^{2N} . Przetwornik $\Sigma\text{-}\Delta$ nie potrzebuje bardzo dużych współczynników nadpróbkowania, gdyż nie tylko ogranicza go pasmo przepustowe, ale również kształt szumu kwantyzacji, który zmniejsza się poza pasmem przepustowym jak pokazano na rys. 1c.

Kształtowanie szumu kwantyzacji

Usunięty szum kwantyzacji pojawia się z większymi amplitudami jako szum pozapasmowy systemu. Szumy te są usuwane dzięki filtrowi cyfrowemu. Rezultatem jest zwiększony zakres dynamiki systemu



Rys. 1. Nadpróbkowanie, cyfrowa filtracja, decymacja, oraz kształtowanie szumu

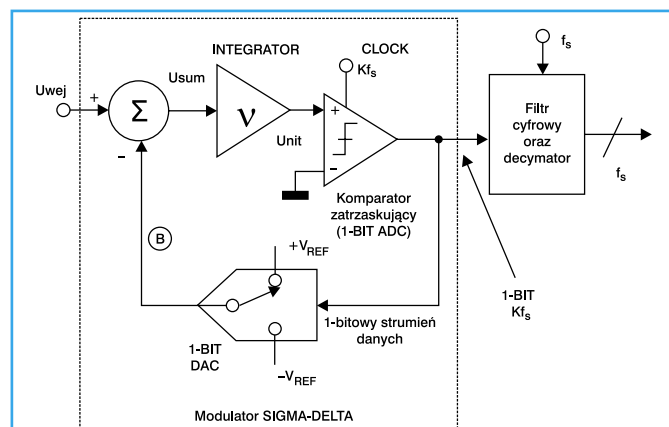


Rys. 2. Częstotliwościowa odpowiedź wbudowanego filtra cyfrowego (AD7745/46)

Na rys. 2 pokazano częstotliwościową odpowiedź wbudowanego filtra cyfrowego (AD7745/46 – CDC). Filtr ten przepuszcza interesujące pasmo oraz dodatkowo usuwa przydźwięk w sygnale pochodzący od częstotliwości prądu elektrycznego w sieci energetycznej (np. w Polsce: 50 Hz, Stany Zjednoczone: 60 Hz), i ich harmonicznych. Można to zaobserwować na rys. 2.

Zasada działania modulatora delta-sigma

Podstawowymi elementami modulatora $\Delta - \Sigma$ są sumator oraz układ całkujący. Dodatkowo stosuje się układ najprostszego przetwornika analogo-



Modulator 1-go rzędu

Zasada przetwarzania wejściowego napięcia (U_{wej}) na wyjściowe słowo cyfrowe (DIG).

Założenia: $U_{wej} = 1,2 \text{ V}$, $U_{ref+} = 5 \text{ V}$, $U_{ref-} = -5 \text{ V}$ oraz po włączeniu układu zasilania napięcia DIG = $U_{sum} = U_{int} = 0 \text{ V}$.

Krok (1)

Napięcie wejściowe ($U_{wej} = 1,2 \text{ V}$) jest sumowane z napięciem wyjściowym ($U_{wyj} = 0 \text{ V}$), czego wynikiem jest napięcie sumacyjne ($U_{sum} = 1,2 \text{ V}$) podane na wejście układu całkującego. Po całkowaniu wyjściowe napięcie ($U_{int} = 1,2 \text{ V}$) podawane jest na komparator; ponieważ napięcie wejściowe jest większe od potencjału masy ($U_{int} > 0$) komparator wystawia na wyjściu dodatnie napięcie referencyjne ($U_{wyj} = 5 \text{ V}$) odpowiada to stanowi „1” na wyjściu.

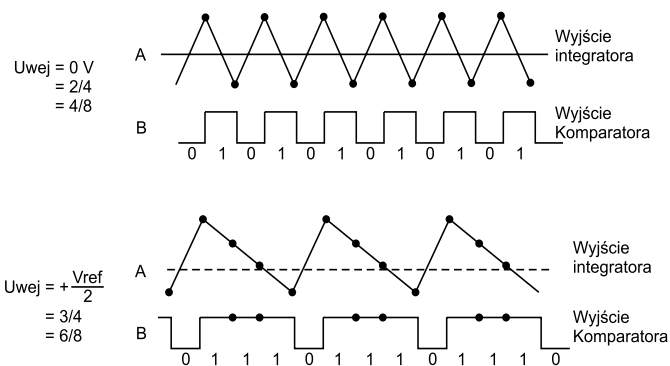
Krok (2)

Napięcie wejściowe ($U_{wej} = 1,2 \text{ V}$) sumowane jest z napięciem wyjściowym komparatora ($U_{wyj} = 5 \text{ V}$), czego wynikiem jest napięcie sumacyjne ($U_{sum} = 1,2 \text{ V} - 5 \text{ V} = -3,8 \text{ V}$) podane na wejście układu całkującego. Po całkowaniu wyjściowe napięcie ($U_{int} = 1,2 \text{ V} - 3,8 \text{ V} = -2,6 \text{ V}$) podawane jest na komparator; ponieważ wejściowe napięcie jest mniejsze od potencjału masy ($U_{int} < 0$) komparator wystawia na wyjściu potencjał masy ($U_{wyj} = 0 \text{ V}$) odpowiada to stanowi „0” na wyjściu.

Krok (3)

Napięcie wejściowe ($U_{wej} = 1,2 \text{ V}$) sumowane jest z napięciem wyjściowym ($U_{wyj} = 0 \text{ V}$), czego wynikiem jest napięcie sumacyjne ($U_{sum} = 1,2 \text{ V}$) podane na wejście układu całkującego. Po całkowaniu wyjściowe napięcie ($U_{int} = -2,6 \text{ V} + 1,2 \text{ V} = -1,4 \text{ V}$) podawane jest na komparator; ponieważ wyjściowe napięcie jest mniejsze od potencjału masy ($U_{int} < 0$) komparator wystawia na wyjściu potencjał masy ($U_{wyj} = 0 \text{ V}$) odpowiada to stanowi „0” na wyjściu.

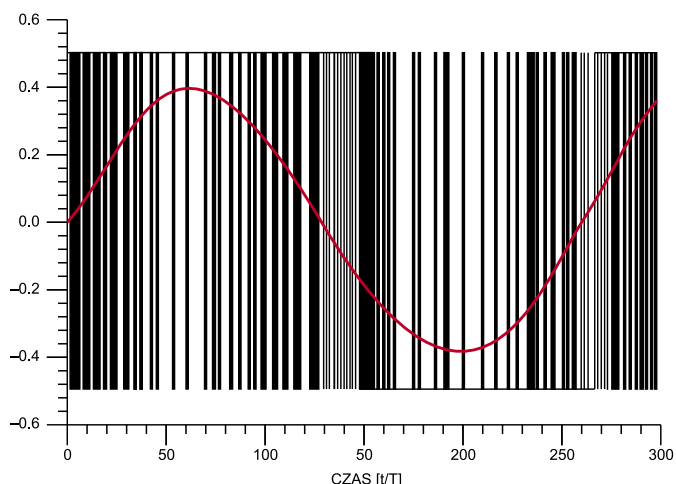
Powtarzając wyżej przedstawiony algorytm uzyskamy strumień bitowy na wyjściu komparatora DIG = „01000100010001...”, uśredniając w filtrze cyfrowym otrzymamy wartość 24% z napięcia zasilania komparatora $U_{ref+} = 5 \text{ V}$, czyli dokładnie 1,2 V.



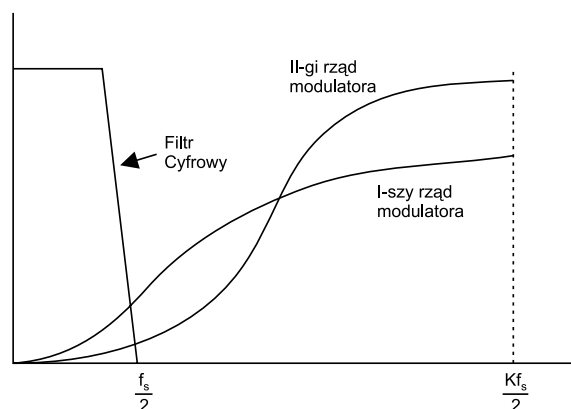
Rys. 3. Przebiegi sygnałów modulatora $\Sigma - \Delta$ (wyjście integratora oraz komparatora)

gowo – cyfrowego, który jest generatorem cyfrowego słowa wyjściowego przetwornika DIG. Ścisłej rzecz biorąc: układ prostego układu komparatora, ponieważ cyfrowe słowo wyjściowe jest 1-bitowe. Informacja o mierzonym napięciu wejściowym nie jest jednak tracona na zwykłym dyskryminatorze o dwóch stanach na wyjściu. Jest ona zachowana w ilości wyjściowych, 1-bitowych danych cyfrowych oraz w częstotliwości, z jaką są produkowane (silne nadpróbkowanie sygnału). Dołączając do wyjścia komparatora filtr cyfrowy oraz decymator uzyskuje się przetwornik analogowo – cyfrowy z szumem kwantyzacji na poziomie nawet 24 bitów, czyli 2^{24} poziomów kwantyzacji. Przetwornik taki nazywa się przetwornikiem 24-bitowym mimo, iż w jego strukturze użyto prostego jednobitowego komparatora, a jakość jego przetwarzania wynika z zastosowania modulatora $\Sigma - \Delta$ oraz nadpróbkowania.

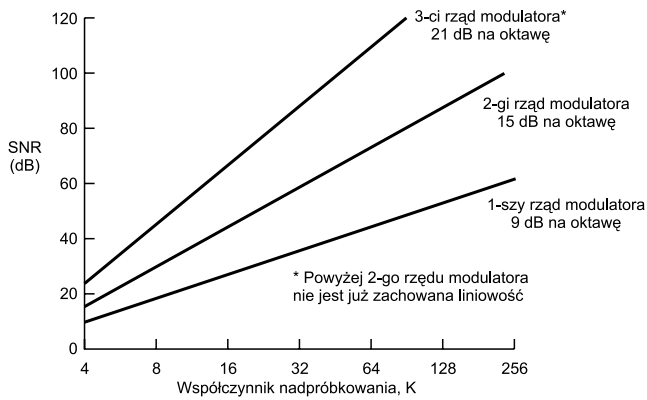
Na rys. 3 zamieszczono przebiegi sygnałów na wyjściu integratora, oraz komparatora, gdy $U_{wej} = 0 \text{ V}$ lub $U_{wej} = +V_{ref}/2$. Można stwierdzić, iż



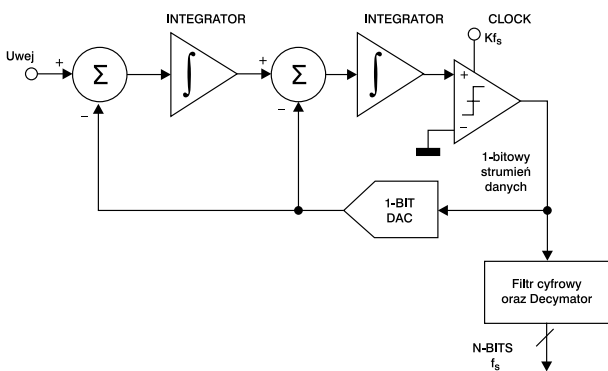
Rys. 4. Sygnał wejściowy oraz zmodulowany (modulator 1-go rzędu $\Sigma - \Delta$)



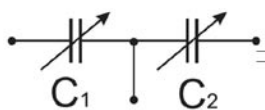
Rys. 5. Szum kwantyzacji modulatora sigma – delta w dziedzinie częstotliwości



Rys. 6. Zależność SNR (stosunek sygnał – szum) od współczynnika nadpróbkowania dla 1-szego, 2-go, oraz 3-go rzędu modulatora $\Sigma-\Delta$



Rys. 7. Modulator $\Sigma-\Delta$ 2-go rzędu



Rys. 8. Schemat zastępczy prostego czujnika opisanego dwoma pojemnościami

układ pamięta (kondensator w układzie całkującym) błąd popełniony przy kwantyzacji napięcia wejściowego układu dyskryminatora w poprzednim kroku i cały czas uwzględnia go w kolejnych konwersjach, wystawiając wyjściowe słowo cyfrowe proporcjonalne do napięcia wejściowego. O dokładności przetwarzania decyduje się dobierając długość cyfrowego słowa wyjściowego oraz częstotliwość przetwarzania modulatora.

Dodatkową zaletą płynącą z użycia modulatora jest możliwość wpływania na kształt w dziedzinie częstotliwościowej. Na rys. 5 przedstawiono przebieg szumu kwantyzacji modulatora $\Sigma-\Delta$ w dziedzinie częstotliwości. Krzywe charakteryzują rząd modulatora, czyli ilość układów całkujących w torze modulacji. Pole szumu kwantyzacji pozostaje bez zmian, natomiast krzywa zostaje „przesunięta” w kierunku częstotliwości powyżej F_{max} , czyli poza pasmo sygnału użytkowego. Efekt można polepszyć powiększając rząd modulatora – dodając ilość układów całkujących.

Na rys. 6 przedstawiono zależność pomiędzy rzędem modulatora $\Sigma-\Delta$ a war-

tością współczynnika nadpróbkowania K dla poszczególnych wartości SNR. Dla przykładu, dla współczynnika nadpróbkowania $K=64$, idealny modulator 2-go rzędu jest zdolny uzyskać SNR na poziomie 80 dB. To oznacza 13-to bitową efektywną rozdzielczość (ENOB). Uzyskanie wyższej rozdzielczości z układu 1-bitowego może nastąpić dzięki zwiększaniu współczynnika nadpróbkowania i/lub używając modulatora $\Sigma-\Delta$ wyższego rzędu.

Modulator 2-go rzędu przedstawiono na schemacie blokowym na rys. 7. Modulatory 3-go i wyższego rzędu uważane były za potencjalnie niestabilne, lecz ostatnio prowadzone analizy z użyciem komparatora skończonego wzmocnienia pokazują, że nie musi to być prawdą, gdyż nawet jeśli zaczyna pojawiać się niestabilność, to DSP w filtrze cyfrowym oraz decymatorze może rozpoznać ją w stanie początkowym i odpowiednio zareagować.

Pomiary pojemności. Czujniki

Zazwyczaj przy pomiarach różnych wielkości fizycznych panuje zasada, iż badana wielkość przetwarzana jest na wielkość elektryczną tzn. odpowiednie napięcie lub prąd wyjściowy czujnika. Jednym z rozwiązań może być para kondensatorów. Powszechnie stosuje się różnicowy układ kondensatorów (rys. 8). W tym układzie badana wielkość fizyczna wpływa na oba kondensatory z przeciwnym charakterem zmian, tzn. gdy pojemność C1 wzrasta, to pojemność C2 maleje.

Badane wielkości, zgodnie z zależnością (1), najczęściej wpływają na zmianę przenikalności elektrycznej ośrodka pomiędzy elektrodami (zależność proporcjonalna):

$$C1 = C0 \cdot (1 \pm kx) \quad C2 = C0 \cdot (1 \mp kx)$$

lub odległości pomiędzy elektrodami (zależność odwrotnie proporcjonalna):

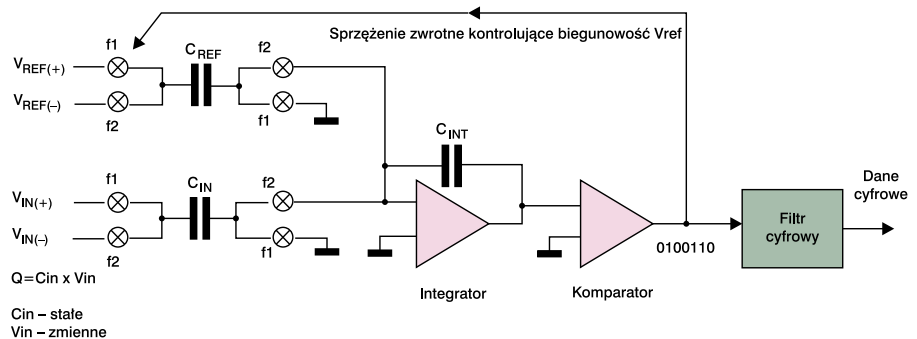
$$C1 = C0 \cdot \frac{1}{1 \pm kx} \quad C2 = C0 \cdot \frac{1}{1 \mp kx}$$

gdzie:

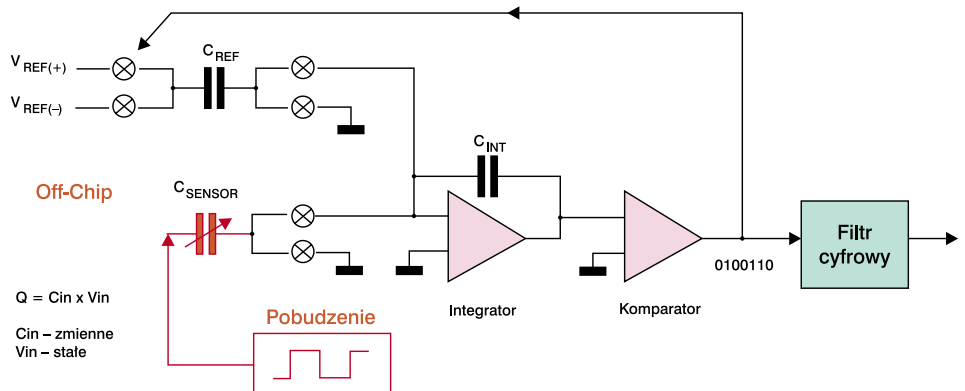
C0 – pojemność początkowa,

k – współczynnik proporcjonalności,

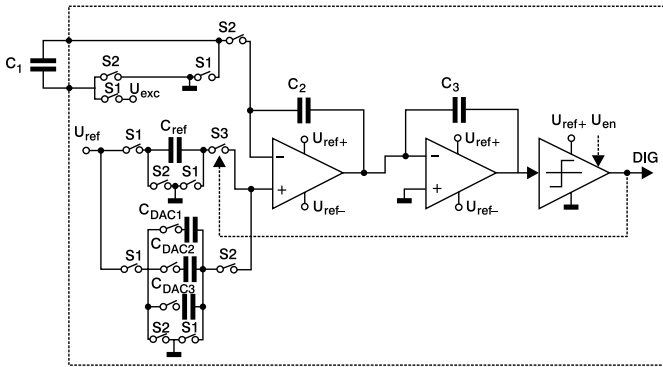
x – zmiana wielkości



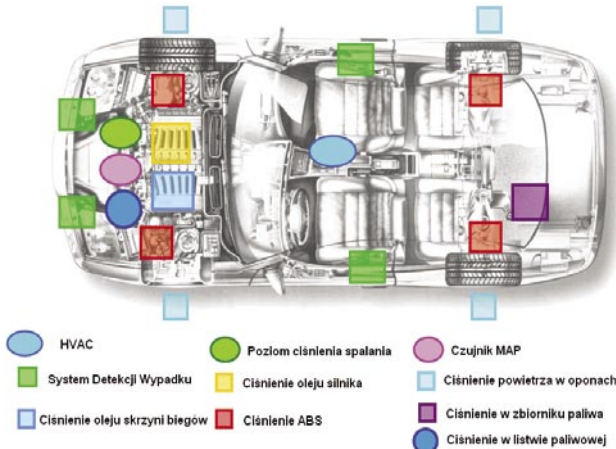
Rys. 9. Architektura przetwornika ADC typu $\Sigma-\Delta$



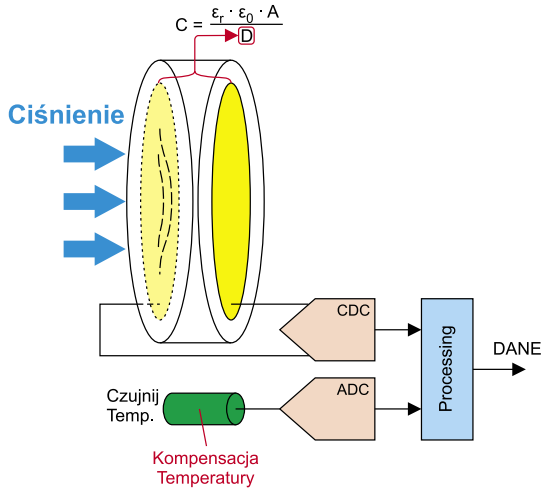
Rys. 10. Architektura przetwornika CDC typu $\Sigma-\Delta$



Rys. 11. Przetwornik CDC z modulatorem Σ-Δ drugiego rzędu



Rys. 12. Przykładowe zastosowanie czujników ciśnienia w samochodzie



Rys. 13. Pomiar ciśnienia z wykorzystaniem przetwornika CDC

Przetwornik CDC (Capacitance-to-Digital Converter)

Pojemności C_{in} oraz C_{ref} ładowane są w fazie f1 i całkowane w fazie f2. Sprężenie zwrotne utrzymuje ładunek referencyjny C_{ref} równy ładunkowi wejściowemu C_{in} . Ładunek referencyjny jest ładowany proporcjonalnie do cyfrowego wyjścia komparatora, skutkiem tego cyfrowe wyjście jest proporcjonalne do ładunku wejściowego. Ewolucją zaprezentowanego układu jest przetwornik pojemnościowo – cyfrowy (CDC).

W architekturze przetwornika pojemność – cyfra (rys. 11), wewnętrzna, znana pojemność C_{in} zastąpiona jest zewnętrzną, nieznaną pojemnością C_{in} , natomiast zewnętrzne, nieznaną napięcie V_{in} , zastąpione jest wewnętrznym, znanym pobudzeniem. Idea przetwornika $\Delta - \Sigma$ jest zachowana (rys. 12). Występuje tu drugi układ całkujący, który modyfikuje, kształt szumu kwantyzacji. Dodatkowo zastosowano kondensatory C_{DAC1} , C_{DAC2} , C_{DAC3} , których sumacyjna pojemność jest odejmowana od pojemności $C1$. Umożliwia to wyeliminowanie składowej stałej pojemności $C1$ i uwzględ-

nienie w pomiarach jedynie jej zmian. Wyjściowe słowo cyfrowe zależy tym razem od relacji kondensatorów $C1$ i $(C_{ref} + C_{DAC1} + C_{DAC2} + C_{DAC3})$ i opisuje jej zależność:

$$DIG = k \cdot \frac{U_{exc} \cdot C1}{U_{ref} \cdot (C_{ref} + C_{DAC1} + C_{DAC2} + C_{DAC3})}$$

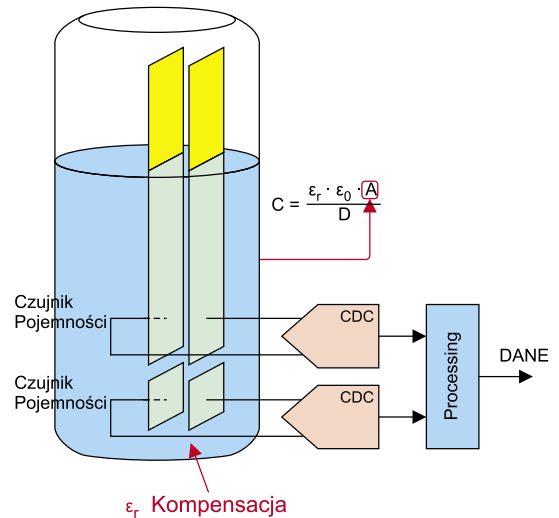
Zastosowanie przetworników pojemność – cyfra

Przetworniki CDC mogą służyć do pomiaru: ciśnienia, przemieszczenia/zbliżenia, przyspieszenia, wilgotności, pH, poziomu cieczy, pomiarów biomedycznych itp. Potencjalnie np. samochód może zawierać powyżej 22 z wyżej wymienionych. Na rys. 12 przedstawiono niektóre z nich. Na rysunkach odpowiednio przedstawiono: 13 – aplikacja czujnika ciśnienia, 14 – aplikacja czujnika poziomu, 15 – aplikacja czujnika wilgotności z użyciem przetwornika pojemność – cyfra wykorzystującego modulację Σ-Δ.

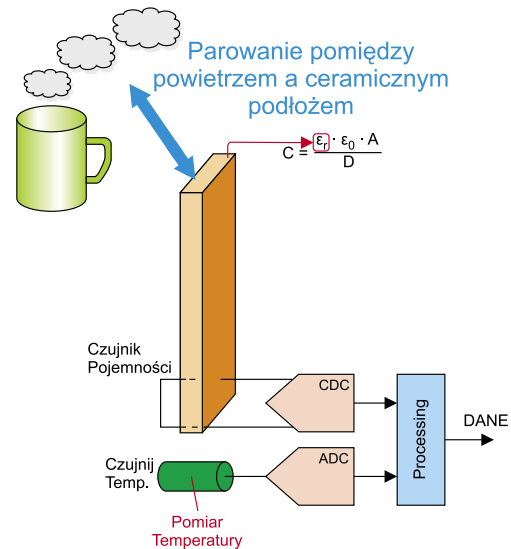
Praktycznie w każdym zastosowaniu jest możliwość kompensacji temperaturowej, tak jak przy użyciu przetwornika z 2-ma kanałami kompensacji wejścia. Dzięki temu można wyeliminować wpływ zmian otoczenia na mierzony układ.

Możliwości stosowania takich przetworników są bardzo szerokie, szczególnie w przemyśle motoryzacyjnym i medycynie, które to są głównymi odbiorcami wyżej wymienionych układów.

Piotr Pietrzyk
p.pietrzyk@ieee.org



Rys. 14. Pomiar poziomu np. wody, oleju z użyciem przetwornika pojemność cyfra



Rys. 15. Pomiar wilgotności z użyciem przetwornika pojemność – cyfra