

# Warto spróbkować, część 4

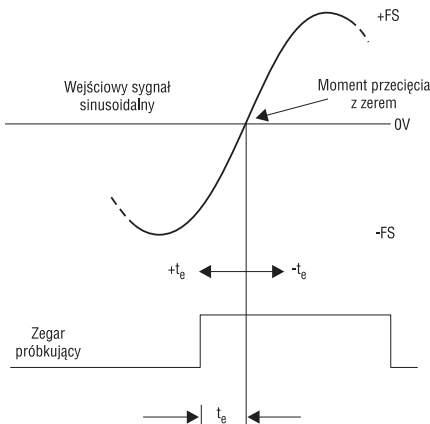
Implementowanie przetworników analogowo-cyfrowych i cyfrowo-analogowych w popularnych mikrokontrolerach stało się już na tyle powszechne, że próby sprawdzenia się w dziedzinie cyfrowego przetwarzania sygnałów coraz częściej są podejmowane przez zwykłych składaczy kitów (z całym szacunkiem dla składaczy).

Często nie dysponują oni odpowiednimi podstawami teoretycznych. Robią więc to na wyczucie lub „na słuch”.

Tymczasem wiedza na ten temat jest nie mała, zawiera sporą dawkę elementów matematyki wyższej.

**Czas opóźnienia apertury (Aperture Delay Time)** – Parametr ten bywa nazywany również krótko czasem apertury. Jest to czas pomiędzy zboczem sygnału zegarowego wyznaczającego moment próbkowania, a faktycznym momentem pobrania próbki przez przetwornik A/C (rys. 23). Jest to parametr szczególnie istotny w przypadku, gdy w jednym urządzeniu występuje kilka przetworników A/C synchronizowanych jednym przebiegiem zegarowym.

**Jitter apertury (Aperture Jitter)** – Z opisu parametru Aperture Delay Time wiemy już, że faktyczny moment pobrania próbki przez przetwornik A/C nie musi dokładnie odpowiadać momentom wyznaczonym przez



Rys. 23. Czas opóźnienia apertury

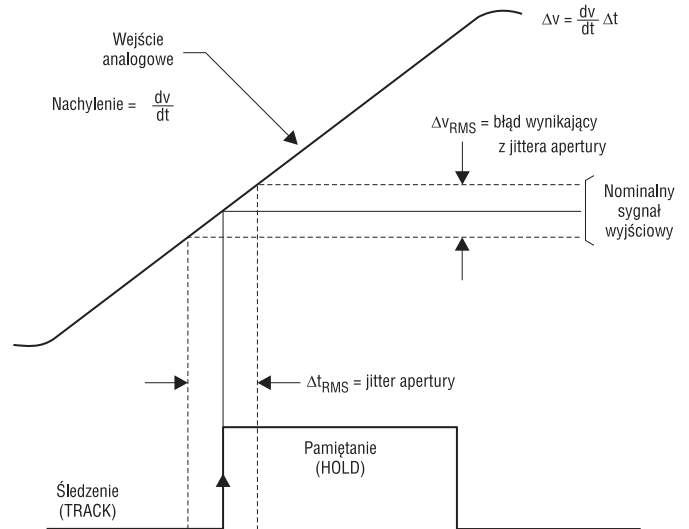
odpowiednie zbocze sygnału zegarowego. Niestety, to jeszcze nie koniec kłopotów. W praktyce można zaobserwować dodatkowo wahania (w przód i w tył) momentów pobrania próbki w stosunku do odpowiedniego zbocza przebiegu zegarowego (rys. 24). Przyczyną tego zjawiska może być modulacja fazy przebiegu zegarowego

wynikająca z występowania w układzie szerokopasmowego szumu, zakłóceń pochodzących z zasilania i zakłóceń od sygnałów cyfrowych. Są one wyraźnie dokuczliwe, gdy mozaika obwodu drukowanego została wykonana nieprawidłowo, w szczególności, gdy nie zadbane o odpowiednie rozproszczenie płaszczyzny masy.

Jitter apertury objawia się jako swego rodzaju szum zmniejszający całkowity odstęp sygnału od szumu przetwornika A/C. Wartość skuteczna napięcia tego szumu zależy od wielkości jittera (rys. 24). Podobny efekt może być wywołany przez jitter fazy sygnału wejściowego.

**Czas odpowiedzi przetwornika (Transient Response lub Settling Time)** – Parametr ten określa czas, jaki jest wymagany do tego, by stan wyjściowy przetwornika osiągnął odpowiednią dokładność po podaniu na wejściu skoku jednostkowego zawierającego się w pełnym zakresie napięciowym przetwornika (rys. 25). Jest to krytyczny parametr w aplikacjach, w których przetwornik A/C jest sterowany przez multiplexer analogowy (rys. 26). Długi czas odpowiedzi przetwornika i multiplexera może prowadzić do powstawania przesłuchów międzykanałowych.

**Czas regeneracji po przepięciu (Overvoltage Recovery)** – Jest to czas, po którym przetwornik A/C osiąga wymaganą dokładność po zaniku sygnału wejściowego przekraczającego pierwotnie zakres przetwarzania (rys. 27). Zwykle parametr ten jest

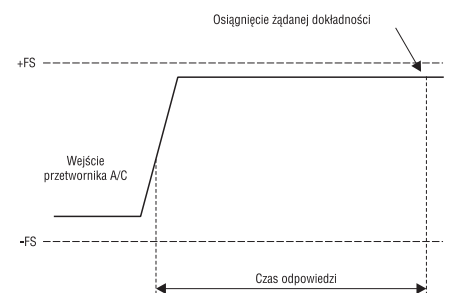


Rys. 24. Jitter apertury

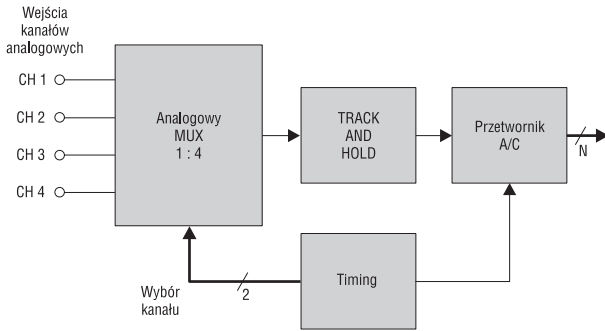
podawany dla 50% przekroczenia zakresu wejściowego. Przetwornik A/C zachowuje się jak idealny ogranicznik napięciowy. Oznacza to, że napięcie większe od zakresu przetwarzania jest kodowane jako wartość maksymalna (np. 0xffff dla przetwornika 12-bitowego). W niektórych typach przetworników dostępna jest specjalna flaga (wskaźnik) informująca o przekroczeniu zakresu (zarówno od góry, jak i od dołu).

## Parametry dynamiczne przetworników C/A

Jak już wiemy, w wielu aplikacjach cyfrowego przetwarzania sygnałów na ostatnim etapie jest przywracana początkowa, czyli analogowa postać sygnału. Operację tę realizuje przetwornik cyfrowo-analogowy. Od jakości przetwornika C/A zależy m.in. powodzenie całej obróbki cyfrowej. Cóż na przykład było by warte cyfrowe czyszczenie szumów jakiegoś sygnału, jeśli na ostatnim etapie przetwornik C/A po-



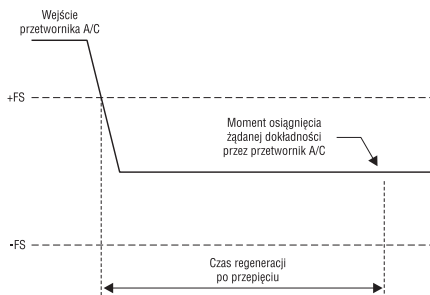
Rys. 25. Czas odpowiedzi przetwornika A/C



Rys. 26. Współpraca przetwornika A/C z multiplekserem analogowym

nownie wprowadzałyby do tego sygnału szum, kto wie, czy nie większy niż na wejściu. Parametrów dynamicznych przetworników C/A nie należy więc lekceważyć, na pewno warto je poznać.

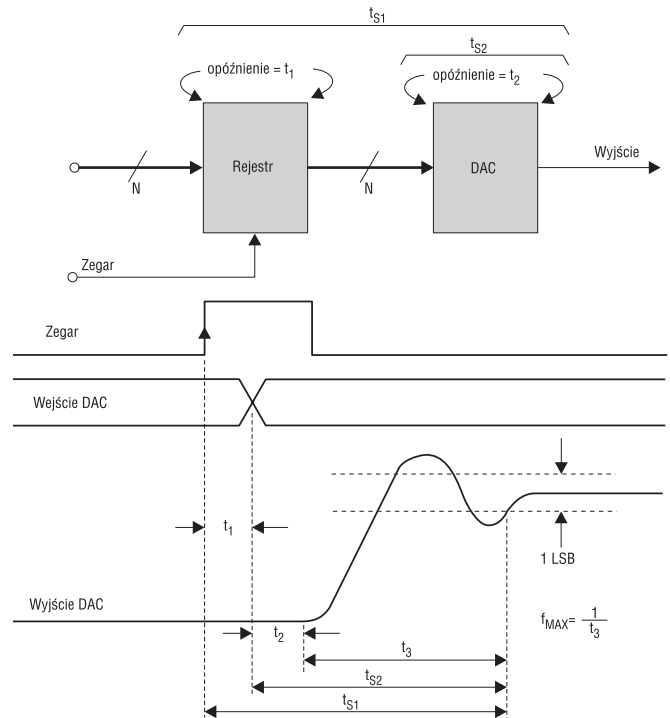
**Czas ustalania się sygnału wyjściowego (Settling Time)** – Parametr ten jest zdefiniowany jako czas pomiędzy zmianą sygnału cyfrowego, a momentem osiągnięcia takiej wartości wyjściowej, od której ewentualne następujące późniejszą oscylacje są nie większe niż 1/2 LSB (rys. 28). Jeśli przetwornik C/A posiada wejściowe zatrzaski (latch) lub rejestry, to parametr *settling time* powinien być mierzony od połowy impulsu strobujującego zatrzaski lub impulsu zegarowego dla rejestrów. Wyróżnia się pełnozakresowy czas ustalenia się wyjściowego napięcia przetwornika, któremu odpowiada zmiana wartości wejściowej od 000...0 do 111...1, a także czas połowy zakresu (zmiany od 011...1 do 100...0 lub 100...0 do 011...1). Oprócz opisanych wyżej parametrów określa się również czas zmiany samego napięcia wyjściowego (bez powiązania tej zmiany z impulsami zegarowymi lub strobującymi). Czas ustalenia się napięcia wyjściowego jest w tym przypadku mierzony od przekroczenia wejściowego zakresu o 1/2 LSB do osiągnięcia wartości wyjściowej, po której nie następują zmiany większe niż



Rys. 27. Czas regeneracji przetwornika A/C po przebiegu

1/2 LSB (rys. 29). Maksymalna częstotliwość pracy przetwornika jest określona jako  $f_{MAX} = 1/t_s$ . Oczywiście czas ustalenia się napięcia wyjściowego dla zmian mniejszych niż pełny zakres przetwarzania będą krótsze niż dla pełnego zakresu.

**Obszar zakłóceń impulsowych (Glitch Impulse Area)** – zakłócenia tego typu są szczególnie widoczne w przetworniku C/A w momencie przekraczania środka pełnego zakresu cyfrowego sygnału wejściowego (np. z 100...0 na 011...1). Przypadek taki jest przedstawiony na rys. 30. Bezpośrednią przyczyną zakłóceń tego typu glitch jest nierówny czas propagacji poszczególnych przełączników przetwornika C/A. Wyjątkiem są przetworniki sigma-delta, których zasada działania wyklucza powstawanie takich błędów. Zakłócenia glitch są mierzone zazwyczaj w jednostkach pV·s. Można się również spotkać z pojęciem *glitch energy*, ale należy podkreślić, że jest to termin nieprawidłowy, gdyż jednostka pVs nie wyraża ilości energii. Na podstawie rys. 30 można wyróżnić sześć obszarów występowania zakłóceń glitch. Każdemu przejściu przez połowę zakresu przetwarzania towarzyszą dwa impulsy. Odpowiednie obszary oznaczono cyframi 1, 2, 3 i 4. Ponadto można utworzyć dwa obszary tzw. *net glitch impulse*. Jeden będzie się składał z połączonych obszarów 1 i 2, drugi natomiast z obszarów 3 i 4. Taka klasyfikacja wprowadza niestety trochę bałaganu w interpretowaniu danych katalogowych przetworników C/A.



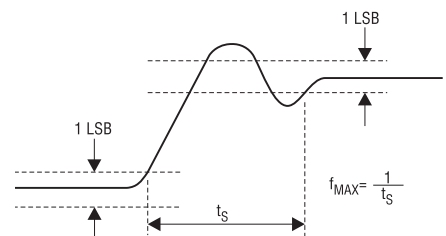
Rys. 28. Czas ustalania się sygnału wyjściowego w przetworniku C/A

Impulsy glitch stanowią efekt niepożądaną. Niestety skutecznie opierają się filtrowaniu. Krótkie czasy ustalania się napięcia wyjściowego (*settling time*) również nie zawsze zmniejszają *glitch impulse area*. Ostatecznie oczekujemy, aby parametr *glitch impulse area* danego przetwornika był równy zero dla każdego z dwóch przejść przez środek zakresu:

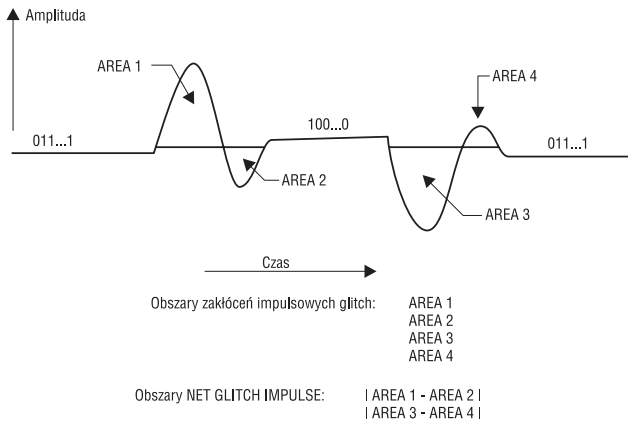
$$AREA1 - AREA2 = AREA3 - AREA4$$

Przemilczamy dyskretnie przypadek idealny, w którym każdy z obszarów 1, 2, 3 i 4 jest równy zero, jako mało prawdopodobny w praktyce.

**Zniekształcenia harmoniczne (Harmonic Distortion)** – Chyba dobrze znamy zasadę naczyń połączonych – gdy coś zmieni się w jednym naczyniu, natychmiast zmiany zauważamy również w drugim. Podobnie jest z zakłóceniami glitch. Jak wiemy, są one zależne od stanu



Rys. 29. Czas zmiany napięcia wyjściowego przetwornika C/A (bez powiązania tej zmiany z impulsami zegarowymi lub strobującymi)



Rys. 30. Obszar zakłóceń impulsowych (Glitch Impulse Area)

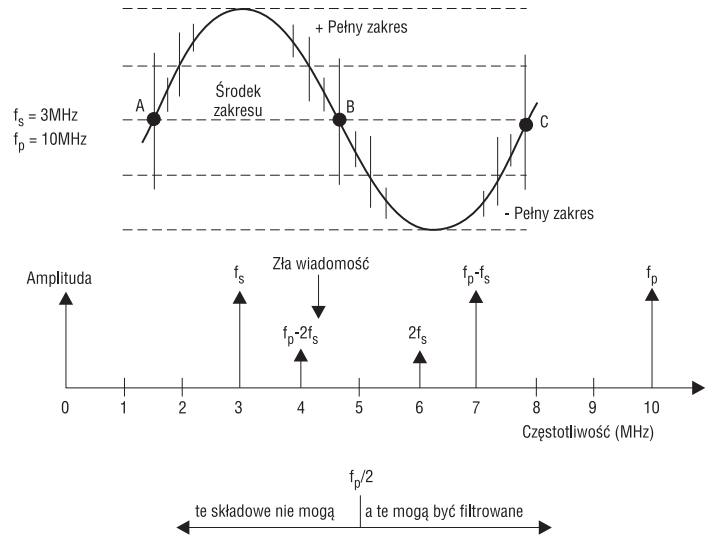
przetwornika, a ściślej mówiąc powstają głównie w chwili przekraczania środka zakresu przetwarzania. Towarzyszy temu generacja harmonicznych pojawiających się w sygnale wyjściowym. Na jeden okres przebiegu sinusoidalnego przypadają dwa momenty, w których są generowane zakłócenia glitch (punkty A i B na rys. 31, punkt C należy już do następnego okresu) i dlatego w widmie zobaczymy drugą harmoniczną. Zauważmy, że takie wysokoczęstotliwościowe harmoniczne będą przyczyną powstawania odpowiadających im składowych aliasingowych, które pojawią się poniżej częstotliwości Nyquista i z tego powodu będą niemożliwe do odfiltrowania (znajdują się w zakresie pasma użytkowego).

Współczynnik całkowitych zniekształceń harmonicznymi (THD - Total Harmonic Distortion) jest dosyć trudny do zmierzenia. Wykorzystuje się do tego często techniki DSP.

**Eliminacja zakłóceń glitch przez użycie układu**

**SHA (Sample-and-Hold-Amplifier)** – Układ SHA może być wykorzystany do eliminacji zakłóceń glitch, jak to pokazano na rys. 32. Dana wyjściowa przetwornika C/A zostaje zapamiętana w układzie próbkująco-pamiętającym, tym samym wyjście przetwornika C/A jest izolowane od wszystkich urządzeń współpracujących z nim. Zakłócenia glitch nie mają więc możliwości przedostania się do wyjścia. Ewentualne zakłócenia powstające na wyjściu układu SHA nie zależą od stanu przetwornika i mogą być łatwo filtrowane.

**Efekt roll-off  $\sin(x)/x$**  – Na wyjściu przetwornika C/A występuje przebieg schodkowy (rys. 33a), co wynika z zasady jego działania. Przebieg taki może być potraktowany jako seria impulsów prostokątnych, których szerokość jest równa odwrot-



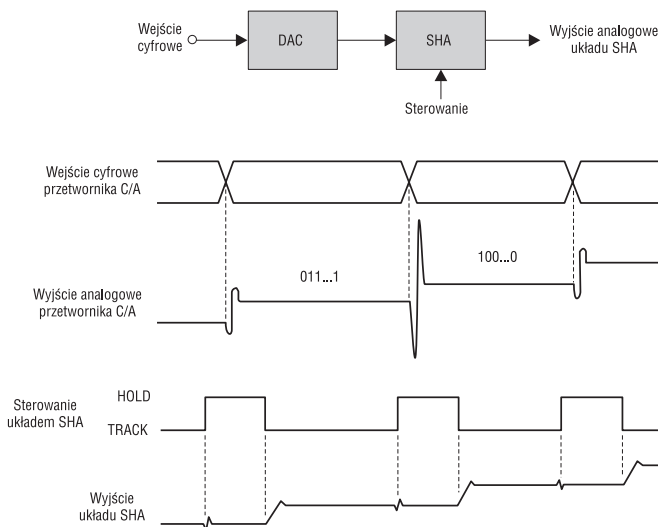
Rys. 31. Powstawanie zniekształceń harmonicznymi w wyniku istnienia Glitch Impulse Area

ności częstotliwości podawania danych na wejście (w tym przypadku trudno mówić o częstotliwości próbkowania). Widmo takiego sygnału ma charakter opisany zależnością:

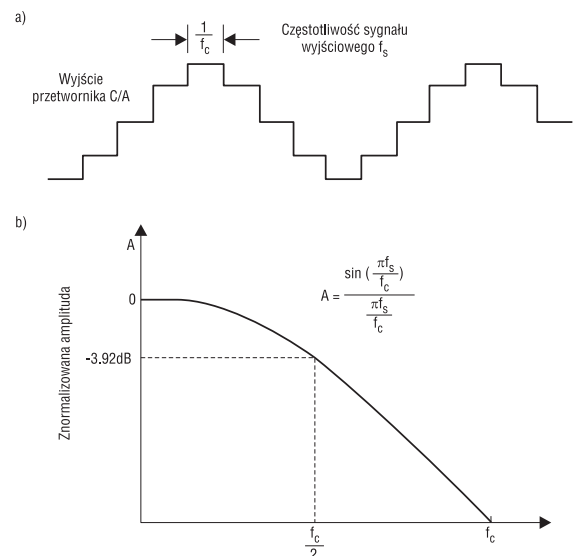
$$A = \frac{\sin\left(\frac{\pi f_s}{f_c}\right)}{\frac{\pi f_s}{f_c}}$$

której interpretacja graficzna jest przedstawiona na rys. 33b. Z obliczeń wynika, że dla częstotliwości Nyquista  $f_c/2$  poziom sygnału spada o 3,92 dB w stosunku do częstotliwości niskich. Dla skorygowania tego efektu stosuje się filtr o transmitancji będącej odwrotnością funkcji  $\sin(x)/x$ .

**Jarosław Dolński**  
jaroslaw.dolinski@ep.com.pl



Rys. 32. Eliminacja zakłóceń glitch poprzez zastosowanie układu SHA



Rys. 33. Efekt roll-off