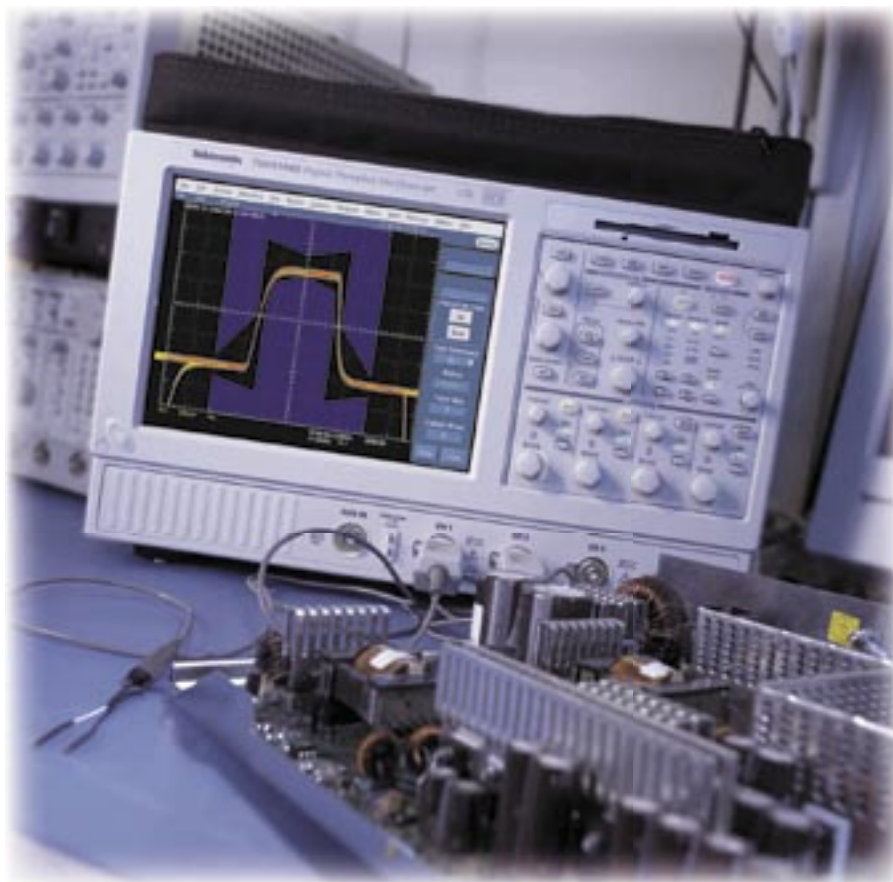


Pomiary oscyloskopowe: okiem praktyka, część 4

Oscyloskop jest jednym z najbardziej uniwersalnych przyrządów pomiarowych. Wykorzystywany jest zarówno w najbardziej zaawansowanych projektach badawczych jak i warsztatach amatorskich. Oczywiście różnice w parametrach, a także i cenach przyrządów stosowanych podczas pomiarów bywają ogromne. Pasma najbardziej wyczynowych współczesnych oscyloskopów niebawem przekroczy granicę 20 GHz, a szybkość próbkowania w czasie rzeczywistym rzędu 40 miliardów próbek na sekundę, stosowana jest już od dawna. Tajniki pomiarów prowadzonych za pomocą nowoczesnych oscyloskopów cyfrowych przedstawiamy w artykule.



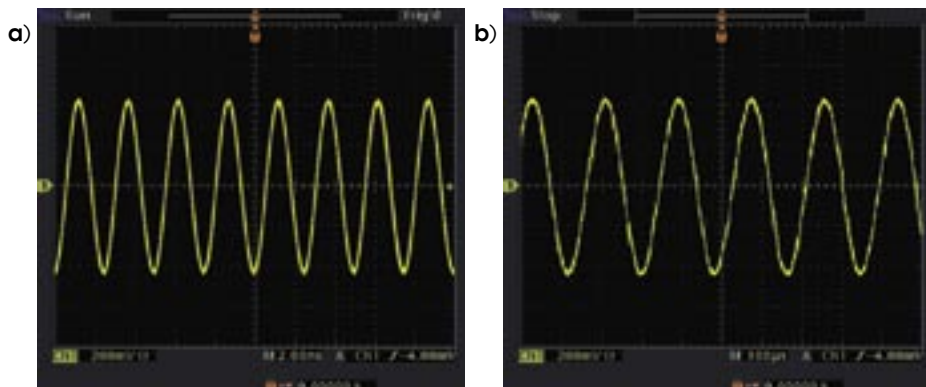
Próbkowanie

Podstawowe parametry dotyczące procesu pobierania próbek sygnału badanego przez oscyloskop cyfrowy, stanowią częstotliwość próbkowania i rozdzielczość przetwornika analogowo-cyfrowego. Częstotliwość

próbkowania podawana jest w ilości próbek na sekundę i oznaczana jako Sa/s lub S/s (*samples per second*). Wartości podawane w katalogach są zazwyczaj maksymalne dla danego przyrządu. Rozdzielczość stosowanych przetworników A/C wyno-

si standardowo 8 bitów i bardzo rzadko występują odstępstwa od tej reguły. Pośród współczesnych przyrządów firmy Tektronix jedynie oscyloskopy serii TDS3000 posiadają przetwornik 9-bitowy.

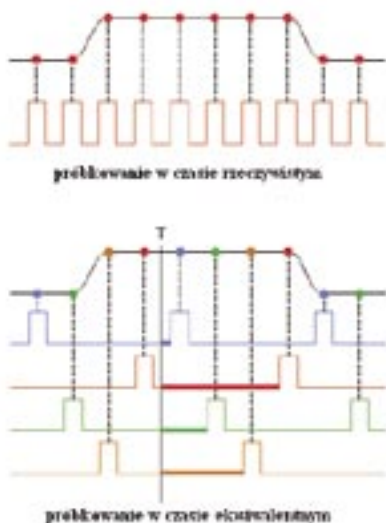
Częstotliwość próbkowania jest uwarunkowana parametrami zastosowanego przetwornika, ale też aktualnymi nastawami. W oscyloskopie cyfrowym zmiana podstawy czasu przy stałej długości rekordu akwizycji wymusza zmianę częstotliwości próbkowania. Im podstawa czasu wolniejsza, tym wolniejsze jest próbkowanie. Zgodnie z teorią, szybkość pobierania próbek musi być co najmniej dwukrotnie większa od największej częstotliwości występującej w sygnale. Aby warunek nie był naruszony, przed przetwornikiem umieszcza się dolnoprzepustowy filtr antyaliasingowy. Jednak w oscyloskopie cyfrowym



Rys. 10. Wydłużenie podstawy czasu zmniejsza częstotliwość próbkowania i zawęża pasmo pomiarowe, czego skutkiem może być aliasing. Ten sam sygnał sinusoidalny mierzony dla podstawy czasu 2 ns/dz (a) i 100 μs/dz (b)

nie stosuje się takiego rozwiązania. Nie ma tu filtrów o parametrach zmienianych wraz ze zmianą podstawy czasu. Wydłużenie podstawy czasu powoduje spadek częstotliwości próbkowania, a tym samym zawężenie aktualnego pasma pomiarowego. Prowadzi to w konsekwencji do aliasingu. Spójrzmy na **rys. 10a**: sygnał sinusoidalny o częstotliwości 400 MHz został tu zarejestrowany przyrządem o paśmie 500 MHz przy próbkowaniu 5 GSa/s. Następnie podstawa czasu została wydłużona do 100 μ s/dz, a częstotliwość próbkowania spadła do 10 MSa/s. Przebieg rejestrowany w takich warunkach widoczny jest na **rys. 10b**. Chociaż ma on w dalszym ciągu częstotliwość 400 MHz, uzyskany wynik może sugerować, że jego częstotliwość wynosi niecałe 7 kHz. Jeżeli rejestrujemy sygnał powtarzalny, to w obecności aliasingu będą występowały trudności ze stabilnym wyzwaniem. Gdy jednak pomiar wykonywany jest w pojedynczym wyzwoleniu (jak na **rys. 10b**), to uzyskany wynik może być bardzo mylący.

Niektóre oscyloskopy wyposażone są w przetwornik analogowo-cyfrowy o maksymalnej częstotliwości próbkowania mniejsze niż pasmo przyrządu. Dla przykładu, nieprodukowany już TDS460 ma pasmo 400 MHz, ale maksymalną szybkość pobierania próbek tylko 100 MSa/s. To, jak się wydaje, naruszenie elementarnych zasad próbkowania, wymaga wyjaśnienia.



Rys. 11. Zasada próbkowania w czasie rzeczywistym i w czasie ekwiwalentnym

Gdy nie dysponujemy odpowiednio szybkim przetwornikiem, ale oscyloskop przeznaczony będzie do pomiarów sygnałów powtarzalnych, możemy wykorzystać tzw. próbkowanie w czasie ekwiwalentnym. Oznacza to, że w pojedynczym cyklu rejestracji oscyloskop pobierze tyle próbek, ile jest w stanie dostarczyć jego wolny przetwornik. W kolejnym wyzwoleniu pobierze następną serię próbek, i tak aż do wypełnienia całego rekordu wymaganą ich ilością. Każdy widoczny na ekranie przebieg będzie wynikiem kilku wyzwoleń przyrządu. Chociaż w pojedynczym wyzwoleniu próbki pobierane są z mniejszą częstotliwością, to jednak ostateczny efekt będzie taki, jakby pobrane zostały z częstotliwością większą. Oczywiście wymogiem poprawności otrzymanego w ten sposób rezultatu jest powtarzalność mierzonego sygnału i stabilność kolejnych wyzwoleń. Najczęściej próbkowanie w czasie ekwiwalentnym odbywa się w sposób sekwencyjno-przypadkowy, jak to pokazano na **rys. 11**. Oznacza to, że każda pobierana seria próbek jest przesunięta w osi czasu względem serii poprzedniej o przypadkową wartość. Dzieje się tak, ponieważ zegar taktujący przetwornik analogowo-cyfrowy nie jest zsynchronizowany z wyzwaniem. Wspólnym punktem każdej pobieranej serii próbek jest moment wyzwolenia. Jednak aby poszczególne serie poprawnie ułożyć w pamięci należy dokładnie zmierzyć czas pomiędzy momentem wyzwolenia a pierwszą pobraną po nim próbką. Rozdzielczość tego pomiaru określa okres częstotliwości próbkowania w czasie ekwiwalentnym. Ale jak tego dokonać dysponując sygnałem zegarowym o okresie o wiele dłuższym niż mierzony odcinek? Okazuje się, że nie jest to aż tak skomplikowane. pomiędzy wyzwoleniem a chwilą pobrania pierwszej próbki ładowana jest liniowo pojemność. Następnie jest ona bardzo wolno rozładowywana. Następuje jakby rozciągnięcie mierzonego odcinka, stąd układ taki nazywany bywa liniowym ekspanderem czasu. W tym czasie zliczane są impulsy zegarowe, których ilość będzie proporcjonalna do napięcia na pojemności, a więc i czasu w jakim została naładowana. Rozdzielczość

pomiaru przesunięcia pomiędzy wyzwoleniem a pierwszą po nim próbką zależy od czasu rozładowania pojemności i częstotliwości sygnału zegarowego. Dla uzyskania większej dokładności czas rozładowania jest dłuższy, ale to jednocześnie oznacza wydłużenie czasu potrzebnego na zakończenie pojedynczego cyklu rejestracji. Dla przykładu, w oscyloskopach serii TDS300 omawiany obwód, określane jako interpolator podstawy czasu (*timebase interpolator*), składa się ze źródła prądowego 22 mA służącego do ładowania pojemności oraz źródła 11 μ A – do jej rozładowywania. Sygnał wyzwalaający dołącza pierwsze źródło do pojemności i powoduje jej szybkie ładowanie. Zbocze sygnału zegarowego taktującego przetwornik analogowo-cyfrowy wyznaczające moment pobrania próbki jednocześnie powoduje odłączenie źródła prądowego ładującego i od tego momentu pojemność jest rozładowywana drugim źródłem prądowym. Czas pomiędzy wyzwoleniem a pierwszą po nim próbką jest proporcjonalny do napięcia na naładowanej pojemności. Jednocześnie jest on proporcjonalny do czasu rozładowywania pojemności w stosunku takim samym, jak stosunek wydajności zastosowanych źródeł prądowych, czyli 1:2000. Pomiar tego czasu rozpoczyna się więc w chwili pobierania próbki, a kończy w momencie zmiany stanu na wyjściu komparatora. Ze względu na bardzo wolne rozładowanie może on być odmierzany impulsami sygnału zegarowego taktującego przetwornik analogowo-cyfrowy.

Istnieje też wiele metod pomiaru krótkich odcinków czasu w sposób całkowicie cyfrowy. Stosowane są one w nowszych konstrukcjach. Najprostszym takim sposobem jest zastosowanie cyfrowej linii opóźniającej w postaci szeregowo połączonych przerzutników. Chociaż praca w trybie czasu ekwiwalentnego rozwiązuje w pewnym stopniu problem wolnego przetwornika, jednak może jednocześnie obniżyć komfort obsługi przyrządu. Dzieje się tak zwłaszcza w przypadku tych oscyloskopów, dla których częstotliwość próbkowania jest kilkukrotnie mniejsza od szerokości pasma. Pomiaru wykonywane przy najkrótszych podstawach czasu potrzebują wielu cykli na skompletowanie rekordu akwizycji. Każdy taki

ST7LiteU0x – Ultralekkie kontrolery ST z EEPROMem



- Rdzeń ST7 (8bit, CISC)
- 2 kB pamięci FLASH z możliwością zabezpieczenia przed odczytem;
- 128 B wewnętrznej pamięci RAM
- 128 B pamięci EEPROM
- zasilanie pojedynczym napięciem 2,4...5,5V
- dwustopniowy układ detekcji niskiego poziomu napięcia zasilania (LVD + AVD)
- 5 trybów oszczędności energii
- możliwość programowania w systemie (ICP)
- obudowy DFN8, SO8 i DIP8



Solidne wsparcie techniczne dostępne przez m.in

www.st.com/mcu:

- darmowa biblioteka w języku C
- liczne noty aplikacyjne i przykłady programów
- liczne zestawy ewaluacyjne
- solidna dokumentacja



Bogata oferta peryferiów:

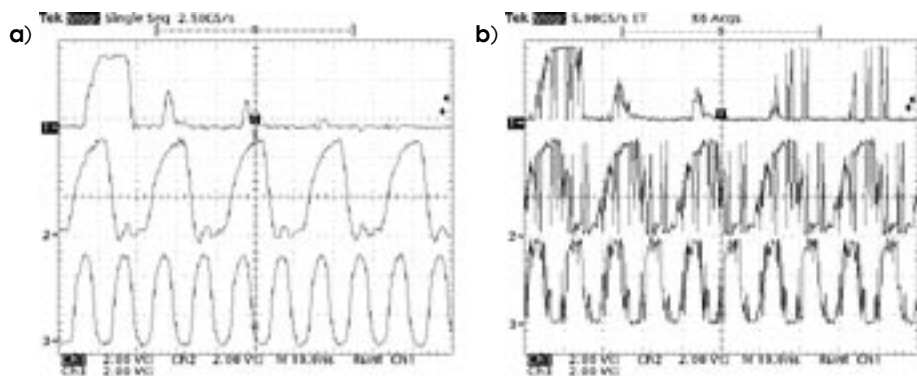
- wbudowany oscylator RC do 8 MHz
- 5 kanałowy 10bitowy przetwornik A/C
- Do 5 linii wejścia/wyjścia
- Timer 8-bitowy (z watchdog i funkcją input capture)
- Timer 12-bitowy (z funkcją output compare i wyjściem PWM)
- Do 5 wektarów przerwań zewnętrznych
- Blok wspierający uruchamianie oprogramowania (Debug Module)



www.st.com/mcu



FUTURE ELECTRONICS POLSKA Sp. z o.o.
03-704 Warszawa
ul. Paniańska 9
tel.: 022 618 92 02
fax: 022 618 80 50
<http://www.futureelectronics.com>



Rys. 12. Te same sygnały rejestrowane przy próbkowaniu w czasie rzeczywistym (a) i w czasie ekwiwalentnym (b). Oscyloskop wyzwalany impulsem niepełnym (*run*t)

cykl wymaga pomiaru czasu przesunięcia danego zestawu próbek, a po zgromadzeniu ich dostatecznej liczby dodatkowej interpolacji i dopiero wyświetlenia przebiegu na ekranie. Przebiegi wykreślone są zatem z wyraźnym opóźnieniem.

Próbkowanie w czasie ekwiwalentnym nie nadaje się do obserwacji sygnałów jednorazowych. Wymaga to bowiem zgromadzenia wszystkich próbek w jednym cyklu, czyli pracy w czasie rzeczywistym. Z tego powodu przyrządy wyposażone w zbyt wolny przetwornik, niekiedy w ogóle nie mają możliwości pojedynczego wyzwoleń. Przetwornik wspomnianego wcześniej, nieprodukowanego już modelu TDS460A, pracuje z maksymalną częstotliwością próbkowania 100 MSA/s, a więc dla najkrótszej podstawy czasu 1 ns/dz. dostarczyć może tylko jedną próbkę w pojedynczym wyzwoleń. Praca w czasie ekwiwalentnym nie daje dobrych wyników w połączeniu z bardziej zaawansowanymi trybami wyzwalania. Dla przykładu **rys. 12** przedstawia wynik rejestracji sygnałów w czasie rzeczywistym i ekwiwalentnym przy wyzwalaniu impulsem niepełnym (*run*t).

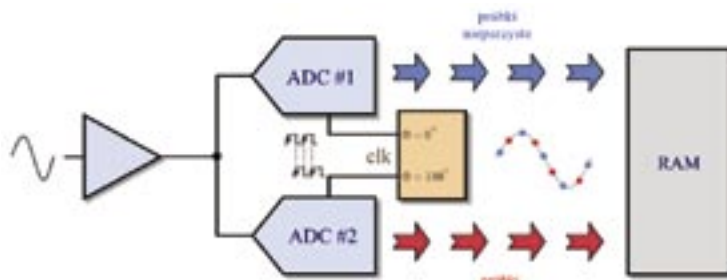
Praca w czasie rzeczywistym wymaga zastosowania odpowiednio szybkiego przetwornika analogowo-cyfrowego. Często stosowanym rozwiązaniem jest praca z przeplotem (*time interleaving*). Polega ona na tym, że kilka wolniejszych przetworników jest połączonych równolegle i taktowanych zegarem przesuniętym w fazie (**rys. 13**). Sprawia to jednak, że włączenie kolejnych kanałów powoduje spadek częstotliwości próbkowania. Dla przykładu, mając do dyspozycji 4 przetworniki

po 250 MSA/s każdy, mamy możliwość taktowania ich zegarem przesuniętym co 90° i uzyskania próbkowania 1 GSA/s w czasie rzeczywistym, ale tylko w jednym kanale. Włączenie dwóch kanałów stwarza możliwość wykorzystania dwóch zestawów po dwa przetworniki taktowane zegarem przesuniętym o 180°, czyli 2x500 MSA/s. Korzystanie z 3 lub 4 kanałów pomiarowych redukuje maksymalną częstotliwość próbkowania w czasie rzeczywistym do 250 MSA/s. O możliwościach tej techniki świadczy przetwornik stosowany w oscyloskopach Infinium firmy Agilent. Zastosowany tam obwód przetwarzania A/C zawiera w jednym chipie 80 przetworników po 250 MSA/s każdy. Taktowane są sygnałami zegarowymi przesuniętymi o 50 ps. Dopasowanie wzmocnienia i offsetu każdego z 80 torów przetwarzania wymagało umieszczenia w tej samej strukturze 160 przetworników DAC. Obwód scalony wyposażono dodatkowo w bufor o pojemności 1 MB. Ostatecznie osiągnięto w ten sposób pasmo 6 GHz, próbkowanie 20 GSA/s, ale odczyt wbudowanego bufora z częstotliwością tylko 250 MHz (2x8 bitów). Niestety, układ jest produkowany

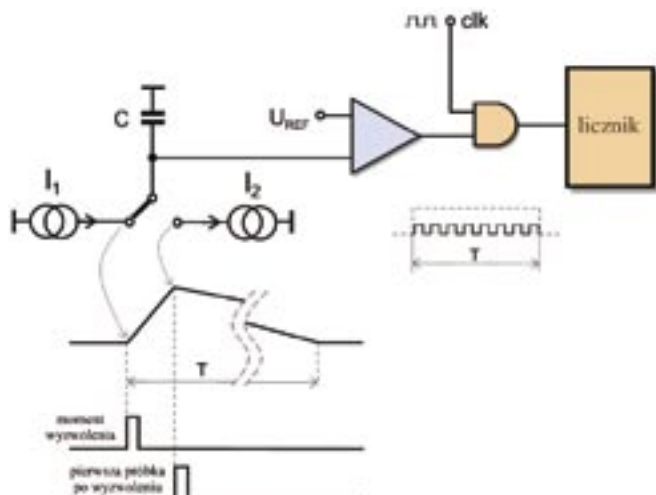
wyłącznie na potrzeby firmy Agilent.

Innym często spotykanym rozwiązaniem szybkiego przetwornika A/C są przyrządy o sprzężeniu ładunkowym CCD (*charge coupled devices*). W tym przypadku próbki sygnału badanego zapisywane są w pamięci analogowej FISO (*fast in slow out*). Zapis próbek do poszczególnych komórek odbywa się z częstotliwością rzędu GHz. Analogowe wartości próbek są następnie odczytywane przez wolny przetwornik analogowo-cyfrowy, a ich skwantowane wartości zapisywane w pamięci akwizycji. Powszechnie stosowanym przez firmę Tektronix rozwiązaniem jest taktowanie pamięci FISO zegarem o częstotliwości 60,606 MHz (okres 16,5 ns). Zegar jest dołączony do 33 szeregowo połączonych buforów, każdy o czasie propagacji 0,5 ns. Wyjścia poszczególnych buforów sterują zapisem analogowych próbek w kolejnych rzędach pamięci FISO. Próbki pobierane co 0,5 ns odpowiadają częstotliwości próbkowania 2 GSA/s. Odczyt analogowych próbek odbywa się z częstotliwością rzędu kilkudziesięciu MHz. Zaletą takiej metody przetwarzania jest niski koszt i bardzo duża częstotliwość próbkowania przy relatywnie wolnych sygnałach na zewnątrz układu przetwornika. Dzięki zastosowaniu tej technologii nawet oscyloskopy „z dolnej półki” pracują na wszystkich nastawach podstawy czasu w czasie rzeczywistym, przy maksymalnej częstotliwości próbkowania nawet dziesięciokrotnie większej od pasma przyrządu.

Przyjętą w praktyce zasadą jest próbkowanie w czasie rzeczywistym z częstotliwością najmniej pięciokrotnie wyższą od pasma. Ponieważ pasmo powinno być pięciokrotnie szersze od częstotliwości sygna-



Rys. 13. Zasada zwielokrotnienia częstotliwości próbkowania przy pracy z przeplotem



Rys.14 Sposób pomiaru czasu pomiędzy wyzwoleniem a sygnałem taktującym pobieranie próbek

łu mierzonego, więc częstotliwość próbkowania w czasie rzeczywistym powinna być co najmniej $5 \cdot 5 = 25$ razy wyższa od podstawowej częstotliwości badanego sygnału. Jeśli zatem chcielibyśmy z dokładnością rzędu $\sim 2\%$ mierzyć sygnały niepowtarzalne w układach logicznych

W przeważającej części przetworniki analogowo-cyfrowe stosowane w oscyloskopach cyfrowych są ośmiobitowe. Dla specyficznych nastaw rozdzielczość tę można zwiększyć. Z uwagi na ograniczony rozmiar rekordu akwizycji, dla wolnych podstaw czasu spada częstotliwość

TTL, musieliśmy dysponować oscyloskopem o paśmie pomiarowym ≥ 300 MHz i częstotliwości próbkowania $\geq 1,5$ GS/s. Przy wyborze oscyloskopu warto upewnić się, czy podawana w katalogu częstotliwość próbkowania odnosi się do pracy w trybie rzeczywistym i czy nie jest dzielona przy włączaniu kolejnych kanałów.

próbkowania poniżej wartości maksymalnej, z jaką może pracować przetwornik. Dysponując nadmiarem próbek można je uśredniać i tym sposobem uzyskać zwiększenie rozdzielczości. Dla przykładu, oscyloskop Tektronix DPO4054 wyposażony jest w przetwornik 2,5 GSa/s, ale przy rekordzie 1000 próbek i podstawie czasu 200 μ s/dz próbki pobierane są z częstotliwością jedynie 500 kSa/s. Pomiedzy próbkami pobieranymi co 2 μ s przetwornik dostarcza 5000 próbek, które są ignorowane. Jeśli jednak z częstotliwością 500 kSa/s uśrednić te pięć tysięcy próbek, nominalną rozdzielczość 8 bitów zwiększymy do 14 bitów. Pamiętać należy, że pasmo pomiarowe dla tej podstawy czasu wyniesie 220 kHz. Ogólnie, zwiększenie rozdzielczości uzyskane dzięki takiemu uśrednieniu obliczyć możemy jako:

$$0,5 \log_2 p$$

gdzie p jest liczbą uśrednianych próbek.

Andrzej Kamieniecki, Tespoł

Szybciej i łatwiej mierząc oscyloskopem z nowej rodziny TDS1000B/2000B

Tektronix®
Enabling Innovation

PRZYRZĄDY
POMIAROWE

POMIARY RF

POMIARY
CZĘSTOTLIWOŚCI

POMIARY TV

TELEKOMUNIKACJA

- pasmo do 200MHz
- próbkowanie do 2GS/s (w każdym kanale)
- modele 2 lub 4 kanałowe
- USB interfejs do zapisu przebiegów w pamięci flash
- łatwa dokumentacja i analiza przebiegów za pomocą oprogramowania NI SignalExpress lub OpenChoice
- USB Plug&Play
- dożywotnia gwarancja*

TESPOL®
Sp. z o.o.

* warunki www.tektronix.com/lifetimearranty lub www.tespol.com.pl/dozywotniagwarancja *

Siedziba Firmy: 54-413 Wrocław, ul. Klecińska 125, tel. 071 783 63 60, fax 071 783 63 61
Biuro Handlowe: 03-301 Warszawa, ul. Jagiellońska 74, tel. 022 675 75 42, fax 022 675 54 47, tespol@tespol.com.pl, www.tespol.com.pl
Dostępne również w sieci sprzedaży: Gdańsk - Bialł, tel. 058 322 11 91, Poznań - Merazet, tel. 061 866 86 14, Warszawa - Merserwis, tel. 022 831 42 56