

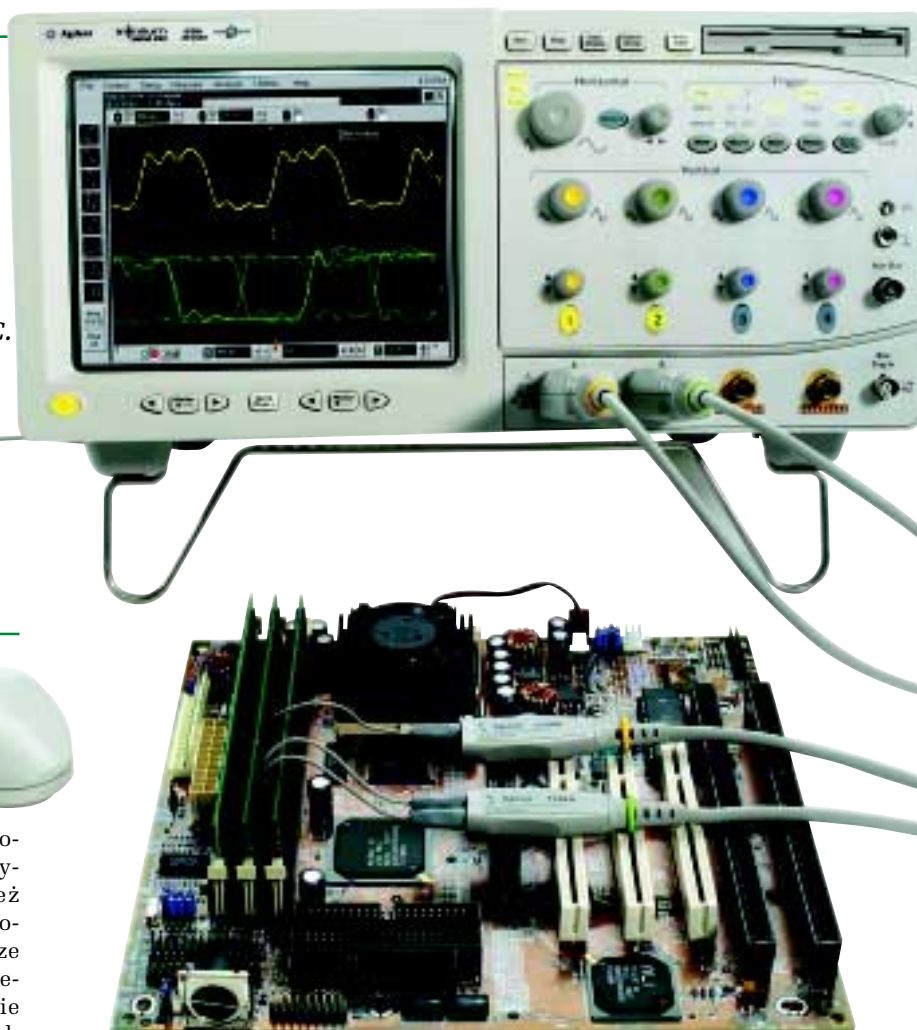
Wykrywanie losowych anomalii sygnału za pomocą oscyloskopów cyfrowych

część 1

Powszechne jest przekonanie, że oscyloskopy cyfrowe są pozbawione wad. I tak w zasadzie jest, pod warunkiem że użytkownicy potrafią radzić sobie z ich niedoskonałościami wynikającymi z konwersji A/C. W artykule naświetlamy problem akwizycji i zobrazowania przebiegów z rzadko występującymi zaburzeniami losowymi.

Stale wzrastający stopień złożoności współczesnych urządzeń elektronicznych wymusza nie tylko ciągłą poprawę parametrów przyrządów pomiarowych używanych w laboratoriach badawczo-rozwojowych, fabrykach czy serwisach, ale również wzbogacanie ich możliwości funkcjonalnych, pozwalających na pełniejsze śledzenie działania badanych systemów. Ten technologiczny trend nie mógł nie objąć także takich przyrządów pomiarowych, jakimi są oscyloskopy.

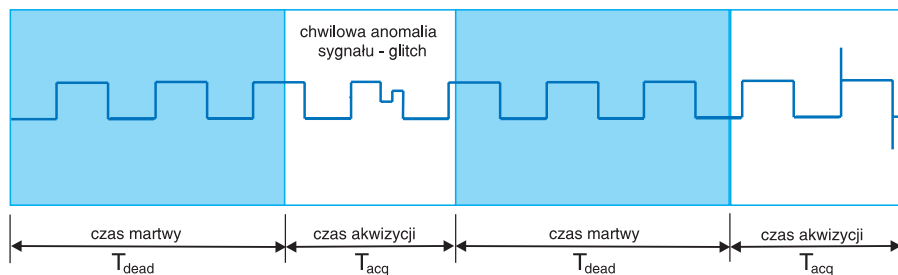
Jednym z kamieni milowych na drodze rozwoju tych przyrządów jest niewątpliwie skonstruowanie i wprowadzenie na rynek w latach osiemdziesiątych oscyloskopów cyfrowych DSO (*Digital Storage Oscilloscope*). Zastosowana w tego typu przyrządach cyfrowa technologia akwizycji i przetwarzania sygnałów umożliwiła implementację wielu użytecznych, a niedostępnych w oscyloskopach analogowych funkcji, do których między innymi można zaliczyć równoczesną, wielokanałową akwizycję i zapamiętywanie przebiegów, szybkie zautomatyzowane określanie parametrów badanych sygnałów, zaawansowane funkcje



matematyczne (w tym FFT) czy też możliwość łatwego połączenia oscyloskopu z komputerem, co pozwala na przesłanie danych i ich przetwarzanie za pomocą wyrafinowanych narzędzi programowych. Jedyny, ale za to bardzo istotny obszar, na którym oscyloskopy cyfrowe musiały uznać wyższość oscyloskopów analogowych, to zobrazowanie przebiegu. Na pierwszy rzut oka może się wydawać, że takie stwierdzenie jest nedorzecznością. Przecież małych, świecących na zielono ekranów lamp oscyloskopowych wykorzystywanych w przyrządach analogowych nie da się porównać z dużymi, kolorowymi ekranami oscyloskopów cyfrowych, wyświetlających przebiegi we wszystkich kolorach tęczy.

Pozostaje jednak niebanalne pytanie o to, co tak naprawdę na tych ekranach widać?

Bardzo dobre zobrazowanie sygnałów w oscyloskopach analogowych wynika z połączenia persystencji (poświaty ekranu luminescencyjnego), intensywności świecenia luminoforu oraz bardzo dużej częstotliwości odświeżania ekranu. Zmieniająca się w sposób ciągły, a więc nieskończenie wielopoziomowa intensywność świecenia punktów na ekranie oscyloskopów analogowych, wspierana przez zjawisko persystencji, pozwala na wychwycenie bardzo subtelnych szczegółów oglądanego sygnału. Drugi czynnik wpływający znacząco na jakość zobrazowania, tj. częstotliwość odś-



Rys. 1

wieżania ekranu, ma bezpośredni wpływ na szybkość odpowiedzi oscyloskopu i jest ściśle związana z innym, często spotykanym parametrem, a mianowicie z czasem martwym oscyloskopu.

Jak można zauważyć na rys. 1, czas martwy jest to okres między kolejnymi cyklami akwizycji, podczas którego w układach oscyloskopu cyfrowego odbywa się przeliczanie zebranych próbek na punkty, które następnie zostaną wyświetlone na ekranie. Pierwsze oscyloskopy cyfrowe nie posiadały w ogóle takich cech zobrazowania, jak intensywność czy persystencja (punkt ekranu świecił się, świecił się intensywnie albo był wygaszony - 3 poziomy intensywności), natomiast częstotliwość odświeżania ekranu była w nich na poziomie od 1 do 2 przebiegów na sekundę, podczas gdy oscyloskopy analogowe były w stanie wyświetlić setki tysięcy przebiegów na sekundę. Nic w tym dziwnego. Długość okresu martwego w oscyloskopie analogowym wynika jedynie z czasu potrzebnego na powrót plamki na początek ekranu, natomiast w oscyloskopach cyfrowych wiąże się z procesami przetwarzania danych i ich przesyłania między blokami funkcjonalnymi oscyloskopu. Co więcej, czas martwy oscyloskopów cyfrowych rośnie wraz z pojemnością wykorzystywanej pamięci, co jest całkowicie zrozumiałe - rośnie liczba danych wymagających przetworzenia.

Konstruktorzy nowoczesnych oscyloskopów cyfrowych podejmują mniej lub bardziej udane próby cyfrowej emulacji persystencji oraz statystycznego odwzorowania sygnałów za pomocą zróżnicowania intensywności świecenia punktów. Dość powszechnie znane są technologie takie jak *analog persistence*, DPO (*Digital Phosphor Oscilloscope*) czy *TrueTrace*. Producenci dążą również do zminimalizowania czasu martwego, a tym samym do zwiększenia częstotliwości odświeżania ekranu.

Na tym drugim parametrze obrazowania chcielibyśmy się skupić w niniejszym artykule, a w szczególności

na analizie jego wpływu na prawdopodobieństwo wykrywania sporadycznych, losowych anomalii sygnału. Chcielibyśmy również spróbować odpowiedzieć na pytanie, czy liczba przebiegów wyświetlanych na ekranie oscyloskopu w ciągu sekundy jest jedynym wyznacznikiem jego zdolności do wychwytywania nieprawidłowości sygnałów, które pojawiają się rzadko i w nierównomiernych odstępach czasu, jak również przedstawić nowe techniki zwiększające prawdopodobieństwo wykrywania takich zdarzeń.

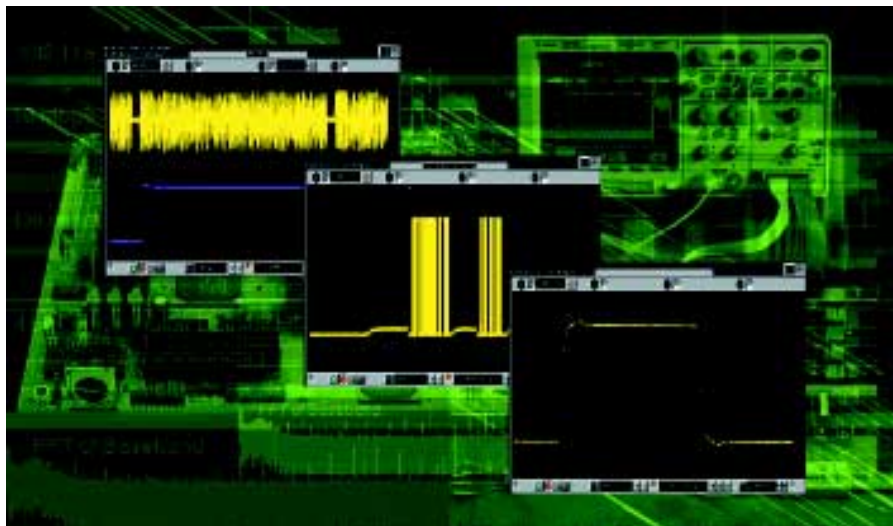
Potrzeba detekcji i analizy rzadko występujących losowych zaburzeń sygnałów pojawia się w bardzo wielu aplikacjach. Konstruktorzy systemów cyfrowych, których głównym narzędziem pomiarowym jest zwykle analizator logiczny, używają oscyloskopów do obserwacji kształtu przebiegów, oceny jakości sygnału zegarowego w różnych punktach badanego układu itp. Sporadyczne zakłócenia sygnałów cyfrowych mogą powodować, w zależności od ich nasilenia i czasu wystąpienia, nieprzewidziane działanie pewnych bloków funkcjonalnych bądź całego systemu. Czas uruchamiania systemów cyfrowych zależy w dużej mierze od parametrów i funkcjonalności wykorzystywanych urządzeń pomiarowych, w tym m.in. od zdolności oscyloskopu do wykrywania sporadycznych zdarzeń.

W kontekście detekcji rzadkich anomalii występujących podczas uruchamiania systemów cyfrowych, należałoby jeszcze wspomnieć o stanach metastabilnych przerzutników. Stany te pojawiają się wówczas, kiedy czas między zmianą poziomu logicznego na wejściu przerzutnika a zboczem zegarowym powodującym jego zapis (*setup-and-hold time*) jest zbyt krótki. Stany metastabilne są bardzo niekorzystne i ujawniają się w sposób losowy. Ich szybkie wykrywanie jest niewątpliwie wyzwaniem dla konstruktorów oscyloskopów cyfrowych.

Drugi obszar wykorzystywania oscyloskopu w charakterze detektora rzadkich anomalii występujących w badanych przebiegach jest związany z wszelkiego rodzaju transmisją danych, podczas której analizuje się kształt przesyłanych impulsów i ocenia ich jakość albo zlicza się te impulsy, które odpowiadają bitom przesyłanym błędnie. To drugie zastosowanie pozwala na wyznaczenie i analizę bitowej stopy błędów BER (*Bit Error Rate*) w systemach teletransmisyjnych. Wykorzystanie oscyloskopów cyfrowych wspomaganych programowymi narzędziami symulacyjnymi do określania stopy błędów w wielu aplikacjach - od transmisji głosowych (BER na poziomie 10^{-3} ... 10^{-4}) do przesyłu danych w twardych dyskach (BER na poziomie 10^{-14} ... 10^{-16}) - może być tematem odrębnego, dość obszernego artykułu.

Jak zwiększano szybkość odpowiedzi oscyloskopów DSO

Szybkość odświeżania ekranu oscyloskopu wpływa, jak już wspomniano wcześniej, na prawdopodobieństwo wykrywania rzadkich losowych zakłóceń sygnałów, ale nie tylko. W pierwszej kolejności dostrzegana jest



zwykle dogodność użytkowania. Długi czas odpowiedzi oscyloskopu frustruje użytkownika oraz wydłuża uruchamianie i testowanie układów elektronicznych. To właśnie komfort pracy był podstawowym czynnikiem stykulującym działania projektantów oscyloskopów mierzących do zwiększenia szybkości odświeżania ekranu. Pierwsze oscyloskopy DSO wyświetlały na ekranie od 1 do 2 przebiegów na sekundę i operowały na rekordzie o długości 1000 punktów. Pierwszym, aczkolwiek nierewolucyjnym krokiem zmierzającym do poprawy tej sytuacji było skonstruowanie oscyloskopów o częstotliwości odświeżania ekranu na poziomie 20 wfm/s (*waveforms per second* - przebiegi na sekundę) przy pojemności pamięci około 100 kpkt. Przyrządów z taką szybkością odświeżania nadal nie da się porównać pod względem szybkości odpowiedzi z oscyloskopami analogowymi, ale praca z nimi mogła już zadowolić użytkownika. Niestety, problem zbyt wolnej odpowiedzi powracał w tych urządzeniach przy wykorzystywaniu pamięci o pojemności 1 Mpkt i większej. Znowuż trzeba było czekać kilka lub nawet kilkanaście sekund na wyświetlenie przebiegu, a czekać, jak wiadomo, nikt nie lubi. Z tego względu, z dużej pojemności pamięci użytkownik mógł korzystać jedynie w specjalnym trybie pracy oscyloskopu, uzbrojony się uprzednio w cierpliwość.

Prace nad poprawą szybkości odświeżania ekranu trwały nadal i zaowocowały wkrótce dwoma odmiennymi rozwiązaniami wprowadzonymi przez dwie duże korporacje zajmujące się produkcją przyrządów pomiarowych. Pierwsze podejście umożliwiło uzyskanie szybkości odświeżania ekranu na poziomie setek tysięcy przebiegów na sekundę, czyli jak w oscyloskopach analogowych, ale tylko przy spełnieniu pewnego, określonego zbioru warunków i tylko w określonym trybie pracy zwanym *Fast Acquisition* (FA). Praca oscyloskopu w tym trybie charakteryzuje się ograniczeniem pojemności pamięci i częstotliwości próbkowania w porównaniu z wartościami maksymalnymi podanymi w specyfikacji oraz niemożnością wykorzystania dodatkowych funkcji przyrządu, takich jak: powiększanie fragmentów wyświetlanego przebiegu (*zoom*), funkcje matematyczne oraz automatyczne wyznaczanie parametrów badanego sygnału. Jak to przedstawimy w dalszej części artykułu, korzyści wynikające z zastosowania w oscyloskopie trybu *Fast Acqui-*

sition są dostrzegalne jedynie przy bardzo szybkich podstawach czasu (40 ns/dz. i szybszych) z ograniczeniami częstotliwości próbkowania (do 1,25 GSa/s) oraz pojemności pamięci (do 1 Mpkt).

W rozwiązaniach konstrukcyjnych oscyloskopów obserwuje się także inną koncepcję rozszerzenia ich możliwości funkcjonalnych. Projektanci firmy Agilent Technologies położyli szczególny nacisk na efektywne zarządzanie pamięcią oscyloskopu. Wykreowana przez nich technologia *MegaZoom* umożliwia wykorzystanie dużej pojemności pamięci przez cały czas pracy przyrządu i uniknięcie tworzenia specjalnych trybów pracy. Dodatkowo, ustawianie częstotliwości próbkowania i pojemności pamięci jest realizowane w oscyloskopie automatycznie, w optymalny - ze względu na rozdzielczość oglądanego sygnału - sposób. Częstotliwości odświeżania ekranu, które udało się uzyskać stosując technologię *MegaZoom*, sięgają dziesiątków tysięcy przebiegów na sekundę. Sposób, w jaki technologia *MegaZoom* wpływa na zwiększenie prawdopodobieństwa wykrywania sporadycznych, losowych anomalii sygnałów, zostanie przedstawiony w dalszej części artykułu.

Prawdopodobieństwo wykrycia losowego zaburzenia sygnału

Typowa, spotykana w większości opracowań na temat oscyloskopów cyfrowych definicja prawdopodobieństwa detekcji P_d losowych zaburzeń sygnału jest funkcją czasu martwego T_{dead} i czasu akwizycji sygnału T_{acq} (rys. 1). Sformułowana jest ona w następujący sposób:

$$P_d = \frac{T_{acq}}{T_{acq} + T_{dead}}$$

Prawdopodobieństwo detekcji P_d oznacza tu szansę wykrycia pojedynczej anomalii sygnału w pewnym skończonym czasie obserwacji. Z powyższej definicji jednoznacznie wynika, że minimalizacja czasu martwego oscyloskopu, czyli osiągnięcie możliwie największej liczby przebiegów wyświetlanych na jego ekranie w jednostce czasu, prowadzi do maksymalizacji prawdopodobieństwa wykrycia losowego zaburzenia sygnału. Porównajmy dla przykładu dwa oscyloskopy, z których pierwszy - nazwijmy go „klasyczny“ - wyświetla 100, zaś drugi - „szybki“ - 50000 przebiegów w ciągu sekundy. Dla ustalenia uwagi przyjmijmy, że szukamy zaburzenia sygnału zegarowego o częstotliwości 1 MHz, które pojawia się średnio raz

na sekundę. Podstawy czasu obydwu oscyloskopów ustawione są na 1 μ s/dz., co dla ekranu o szerokości równej 10 działek daje długość czasu akwizycji $T_{acq} = 10 \mu$ s. Wykorzystując informację o liczbie przebiegów wyświetlanych w jednostce czasu przez obydwu oscyloskopy oraz o długości czasu akwizycji, możemy z łatwością określić wartości czasów martwych. I tak, czas martwy oscyloskopu klasycznego $T_{dead1} = 9,99 \text{ ms} \approx 10 \text{ ms}$, zaś dla drugiego przyrządu parametr ten przyjmuje wartość równą czasowi akwizycji, czyli 10 μ s. Po podstawieniu wyliczonych wartości do wzoru możemy obliczyć prawdopodobieństwa wykrycia losowej anomalii badanego sygnału, przy założeniu czasu obserwacji równego 1 s, co jest równoznaczne z jednokrotnym wystąpieniem poszukiwanego zaburzenia. Prawdopodobieństwa te wynoszą odpowiednio: $P_{d1} = 0,1\%$ dla oscyloskopu klasycznego oraz $P_{d2} = 50,0\%$ dla oscyloskopu szybkiego.

Już na pierwszy rzut oka widać, że różnica jest kolosalna, ale jeszcze lepszy pogląd na jej istotę dałoby oszacowanie dla obydwu przyrządów czasu, jaki byłby potrzebny, aby prawdopodobieństwo co najmniej jednokrotnego pojawienia się na ekranie poszukiwanej anomalii sygnału osiągnęło 95%.

Oszacowania takiego możemy dokonać, korzystając z rozkładu Bernoulliego (dwumianowego). Po wykonaniu obliczeń okazuje się, że czasy te wynoszą 5 sekund dla szybkiego oscyloskopu oraz 50 minut dla oscyloskopu o klasycznej architekturze. Czasy obserwacji rzędu jednej godziny raczej nie są akceptowalne, biorąc pod uwagę obecny poziom technologiczny. Z powyższego przykładu możemy wysnuć dwa wnioski. Po pierwsze, pokazuje nam on, jak istotnie szybkość odświeżania ekranu oscyloskopu wpływa na zdolność tego przyrządu do wykrywania sporadycznych zaburzeń sygnału. Po drugie natomiast, możemy się przekonać, że twórcy klasycznej definicji prawdopodobieństwa wykrycia rzadko występujących cech sygnału, którą do tej pory się posługiwaliśmy, milcząco założyli, że już sam fakt dokonania akwizycji fragmentu sygnału zawierającego zaburzenie wystarczy do wykrycia poszukiwanej anomalii.

W drugiej części artykułu postaramy się udzielić odpowiedzi na pytanie, czy założenie takie jest słuszne.

Jacek Falkiewicz
AM Technologies Polska
jacek.falkiewicz@amt.pl