

# Pomiary oscyloskopowe: okiem praktyka, część 12

## Szum obwodów wejściowych

Podstawowym rodzajem szumu, z którym musimy się liczyć jest szum termiczny. Napięcie szumu termicznego  $U$  na rezystancji  $R$ , w danym paśmie  $B$  i temperaturze  $T$  określa znana zależność:

$$U = \sqrt{4kTBR}$$

gdzie  $k$  jest stałą Boltzmana ( $1,38 \cdot 10^{-23}$  J/K). Ponieważ sygnał szumu jest losowy, jego amplituda zmienia się w czasie w sposób przypadkowy. Dlatego określić ją można za pomocą funkcji gęstości prawdopodobieństwa, jak to przedstawia **rys. 62**. Dla rozkładu gausowskiego, słusznego dla szumu termicznego, wartość skuteczna napięcia szumu  $U_{RMS}$  jest równa odchyleniu standardowemu. Wartość międzyszczytowa  $U_{p-p}$  jest z prawdopodobieństwem 99,7% równa  $6 \times U_{RMS}$ . Dla wyobrażenia odpowiedniej skali zjawiska policzmy i zauważmy, że w temperaturze pokojowej na rezystancji  $1,7 \text{ k}\Omega$ , w paśmie  $1 \text{ GHz}$ , zaobserwujemy szum termiczny o amplitudzie  $\sim 1 \text{ mV}_{p-p}$ . Odpowiada to aż jednej działce skali oscyloskopu na zakresie  $1 \text{ mV/dz}$ . Nawet gdyby stosować idealne wzmacniacze wejściowe, pewnych zjawisk pominać po prostu nie sposób.

Zgodnie z podaną zależnością, aby zminimalizować szum należałoby zmniejszyć temperaturę, rezystancję i pasmo. Na temperaturę wpływu nie mamy: oscyloskop pracuje w temperaturze pokojowej. Rezystancja wejściowa to dla przyrządów szerokopasmowych standardowo



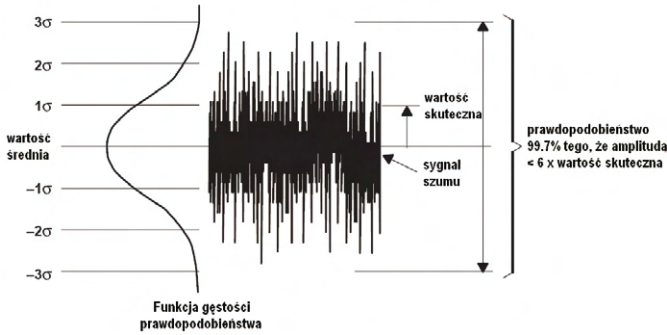
*Użytkownicy oscyloskopów cyfrowych, szczególnie Ci którzy wcześniej pracowali z przyrządami analogowymi, zwracają często uwagę na stosunkowo duży poziom szumów. Nawet przy braku jakiegokolwiek sygnału wejściowego, linia obserwowana na wyświetlaczu przyrządu cyfrowego jest zazwyczaj grubsza od wykreślonej przez plamkę w lampie oscyloskopu analogowego. Widać to zwłaszcza na najmniejszych zakresach skali pionowej, rzędu pojedynczych mV/dz. W naturalny sposób budzi to wątpliwości co do jakości wykonania obwodów wejściowych. Są one tym większe, że zostały szybko podchwycone przez handlowców pod hasłem „oscyloskopy konkurencji szumią bardziej”. Zanim wypowiemy tak kategoryczny sąd, zwróćmy uwagę na kilka kwestii, przedstawionych w tej części artykułu.*

$50 \Omega$ . Z kolei pasmo coraz nowocześniejszych oscyloskopów cyfrowych jest coraz szersze. Aby zminimalizować obserwowany szum, użytkownik ma zazwyczaj do dyspozycji opcjonalne

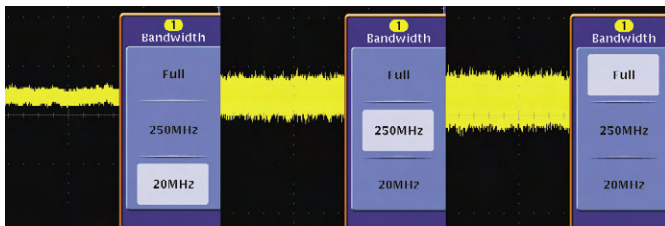
zawężanie pasma pomiarowego. Spójrzmy na **rys. 63**. Przedstawia on szum obserwowany na ekranie oscyloskopu cyfrowego na zakresie  $1 \text{ mV/dz}$  przy paśmie  $20 \text{ MHz}$ ,  $250 \text{ MHz}$  oraz

$350 \text{ MHz}$ . Różnica jest jak widać znaczna.

Można tu zarzucić, że precyzyjne woltomierze umożliwiają pomiar napięć rzędu mikrowoltów lub nawet mniejszych, podczas



Rys. 62.



Rys. 63.

gdy oscyloskop rejestruje aż tak duży szum. Jednak pamiętać należy, że oscyloskop rejestruje sygnał w bardzo szerokim paśmie. Jeżeli spojrzymy na parametry współczesnych woltomierzy szerokopasmowych wysokiej klasy (np. Rohde&Schwarz URV5) zauważymy, że minimalna wartość mierzonego napięcia jest rzędu  $200 \mu V_{RMS}$ . Odpowiada to wartości międzyszczytowej na poziomie  $\sim 1 mV_{P-P}$ . Szerokie pasmo oscyloskopów cyfrowych jest bardzo istotnym czynnikiem determinującym szum.

Jak wiemy z poprzednich odcinków cyklu, charakterystyka częstotliwościowa oscyloskopów cyfrowych ma różny kształt w paśmie przejściowym. W celu zminimalizowania aliasingu, kształtowana bywa tak, aby w paśmie przejściowym opadała jak najbardziej stromo. Do tej pory omówione zostały konsekwencje takiego zabiegu w kontekście pomiaru czasu narostu oraz obserwowanych przerostów na grzbietach szybko narastających zboczy. Stromo opadająca charakterystyka to także większe zmini-

malizowanie wielkoczęstotliwościowych składników szumu.

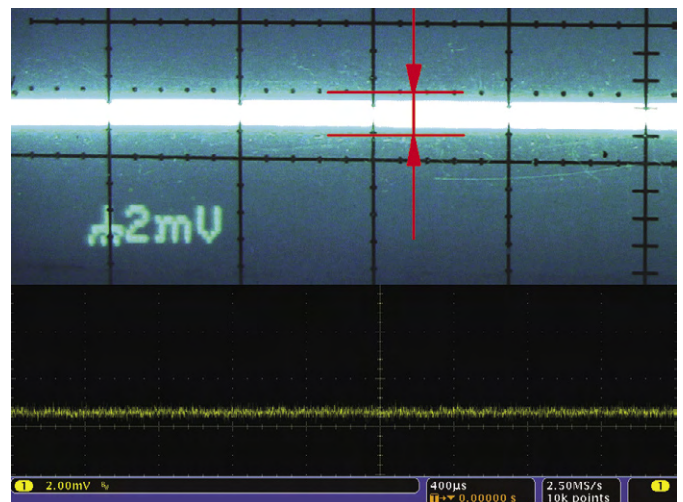
Oscyloskop analogowy wykreśla kształt przebiegu na odcinku określonym przez poziomy wymiar ekranu lampy. Oscyloskop cyfrowy może na rejestrację sygnału przeznaczyć różny rozmiar pamięci. Użytkownik ma często możliwość regulacji długości rekordu akwizycji. Przy dłuższej obserwacji sygnału wartość międzyszczytowa napięcia szumu będzie większa. Dlatego praca z bardzo długim rekordem akwizycji może błędnie sugerować zwiększenie szumu obwodu wejściowego. Spróbujmy teraz dokonać porównania szumu w obu typach przyrządów, zapewniając w miarę możliwości jednakowe nastawy. Autor wykorzystał oscyloskop analogowy Tektronix 2445B o paśmie 150 MHz oraz oscyloskop cyfrowy klasy MSO4000 o paśmie zawężonym do 250 MHz. W obu przyrządach została ustawiona taka sama skala pionowa: 2 mV/dz, a wejścia kanałów pomiarowych dołączono do masy. Rekord akwizycji został zawężony do 10000 próbek.

Wynik obserwacji przedstawia rys. 64. W obydwu przypadkach, kiedy zapewniono takie same warunki pracy, szum jest mniej więcej jednakowy, a szerokość kreślonej linii zajmuje  $\sim 0,3$  działki skali.

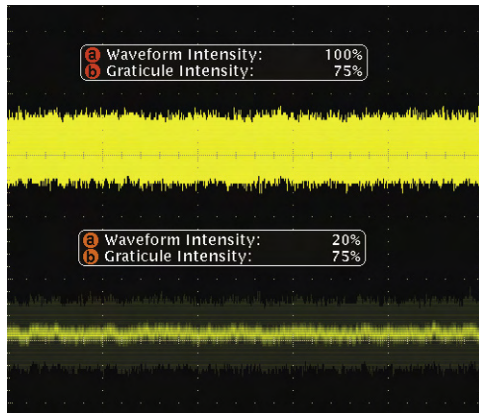
Przy okazji zauważmy, że oscyloskop analogowy ma jakby naturalną skłonność do maskowania szumu. Dzieje się tak dlatego, że w miejscach bliższych wartości średniej, plamka kreśląca obraz znajduje się najdłużej. Przekłada się to bezpośrednio na intensywność świecenia i rzadko występujące piki są mało widoczne. Jak widać w górnej części rys. 64 aby je zaobserwować, intensywność świecenia została mocno zwiększona. Z reguły jest ona mniejsza, a zatem kreślona linia jest węższa. Nie znaczy to jednak, że tor sygnałowy oscyloskopu analogowego szumi mniej. Dodatkowo, sama plamka nie jest obszarem rozświetlonym jednolicie, z ostrą granicą świecenia na granicy zajmowanego obszaru. Intensywność świecenia wzdłuż przekroju plamki modeluje się często rozkładem w kształcie krzywej Gaussa. To także wpływa na pozorne zmniejszenie szumu w przyrządzie analogowym.

Rekord akwizycji w oscyloskopie cyfrowym ma rozmiar zazwyczaj kil-

krotnie większy od poziomego rozmiaru ekranu. Dla przykładu, w oscyloskopach TDS1000 przebieg tworzy 250 punktów, podczas gdy pamięć akwizycji mieści 2500 próbek. W oscyloskopie MSO4000 proporcja ta jest jeszcze większa. Przebieg kreślony jest na odcinku 1000 punktów, a maksymalny rozmiar rekordu akwizycji to 10000000 próbek. W poprzednim odcinkach poznaliśmy różne sposoby rejestrowania próbek w rekordzie. Niezależnie od tego jest ich o wiele więcej niż można wyświetlić na ekranie. Istnieją dwa podstawowe sposoby poradzenia sobie z tym problemem. Najprościej jest utworzyć obraz tak, że w każdej kolejnej kolumnie wyświetlacza znajduje się pionowy wektor, którego początek i koniec określają próbki o minimalnej i maksymalnej wartości. Dla przykładu, aby uzyskać 250 wyświetlanych wektorów na podstawie 2500 próbek należy każdy z nich utworzyć na podstawie zestawu 10 próbek. Teraz jest już jasne, dlaczego przy najmniejszym ustawieniu skali pionowej szum widoczny jest w postaci pionowych kresek. Bardziej zaawansowane przyrządy realizują to trochę inaczej, naśla-



Rys. 64.



Rys. 65.

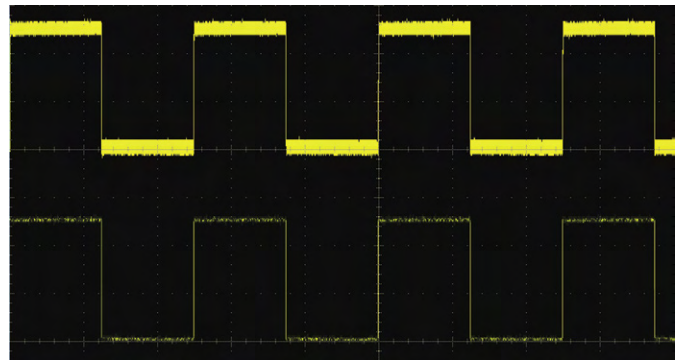
dując luminofor w lampie oscyloskopu analogowego. Wektor nie jest kreślony tym samym jednolitym kolorem, ale poszczególne jego części mają odcień odzwierciedlający ilość próbek o danej wartości. Ponieważ najczęściej występująca wartość oscyluje wokół średniej (patrz rys. 62), więc pozwala to zredukować obserwowany szum, podobnie jak w przypadku przyrządu analogowego. Spójrzmy na **rys. 65**. Przedstawia on przebieg wykreślany przez oscyloskop cyfrowy o paśmie 350 MHz na zakresie 1 mV/dz oraz przy zwarciu wejścia z masą. Dla intensywności 100% (górny przebieg) poszczególne wektory rysowane są z taką samą intensywnością, szum zajmuje ponad 1 działkę skali. Zredukowanie intensywności do 20% pozornie zmniejsza szum

do 0,2 działki. A przecież jest on taki sam. Ponadto oba przebiegi rejestrowane są w takim samym trybie akwizycji 'sample'. Teoretycznie bez uśredniania. W drugim przypadku możemy jednak mówić

o pewnej formie uśredniania przebiegu. Tyle, że odbywa się ona na etapie tworzenia obrazu, nie akwizycji.

Odfiltrowanie szumu na etapie akwizycji sygnału jest możliwe np. poprzez zastosowanie trybu wysokiej rozdzielczości (według nazewnictwa Hewlett-Packard jest to po prostu tryb wygładzania). Skuteczność tej metody zależy od ilości nadmiarowych próbek. Dla tej samej podstawy czasu, przy zwiększaniu długości rekordu akwizycji zmniejszy się liczba próbek uśrednianych. Obrazuje to **rys. 66**. Przebieg został zarejestrowany przy podstawie 200  $\mu$ s/dz, skali 1 mV/dz i rekordzie zmieniającym się od 1000 do 10000000 próbek.

Aby porównać wartość szumu dwóch oscyloskopów, poza zapewnieniem takich samych nastaw,



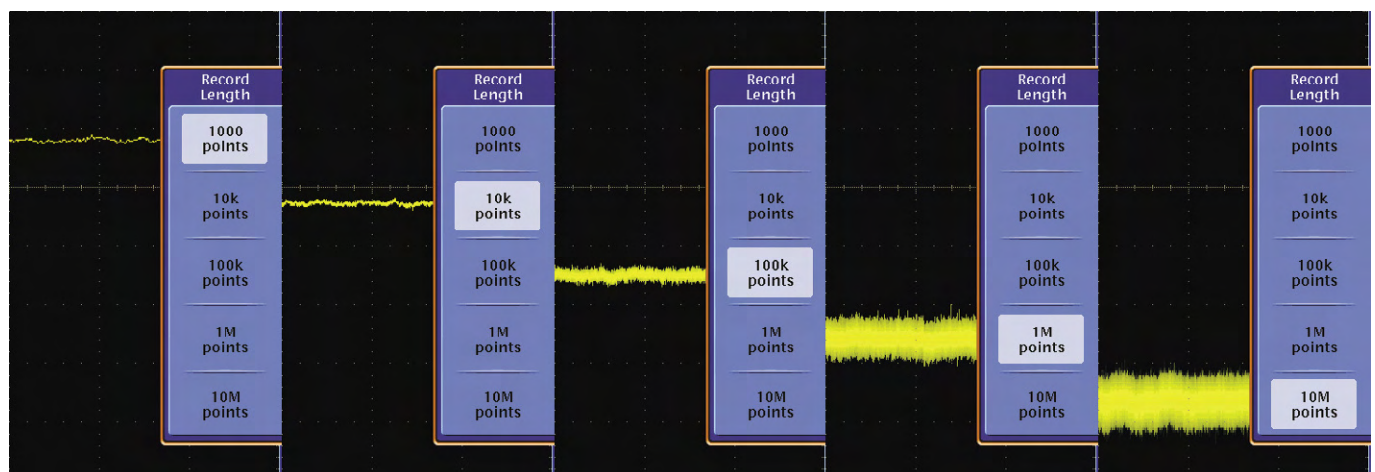
Rys. 67.

warto zwrócić uwagę na proporcję pomiędzy pionowym rozmiarem okna akwizycji a pionowym rozmiarem ekranu. Dla przykładu, oscyloskopy Tektronix TDS1000 mają okno akwizycji o rozmiarze 10,24 działki skali. Każdej działce odpowiada 25 poziomów kwantyzacji ośmiobitowego przetwornika. Na ekranie widocznych jest jednak tylko 8 działek w osi pionowej. Jeżeli porównywany oscyloskop, także dysponujący przetwornikiem ośmiobitowym, miałby identyczny rozmiar okna akwizycji i ekranu, to odpowiadałoby to 'ściśnięciu' przebiegu w osi pionowej do  $\sim 78\%$  ( $8/10,24$ ). O tyle optycznie spadłaby wartość obserwowanego szumu.

Na koniec chciałbym przedstawić jeszcze jeden ciekawy przykład. Wejście oscyloskopu cyfrowego MSO4000 podłączono za pomocą sondy pasywnej X10 do wyjścia we-

wnętrznego kalibratora. Po wywołaniu ustawień fabrycznych, włączeniu funkcji „AUTASET” oraz ustawieniu intensywności na 100%, otrzymano przebieg widoczny w górnej części **rys. 67**. Następnie rekord akwizycji został zredukowany do 1000 próbek (dokładnie tyle punktów tworzy obraz w osi poziomej) a intensywność zmniejszono do 22%. Rezultat widoczny jest u dołu tego samego rysunku. Zwróćmy uwagę, że w obu przypadkach rejestrujemy ten sam przebieg tym samym przyrządem. Ponadto oba przebiegi zarejestrowano w tym samym trybie akwizycji z prostym próbkoowaniem, przy identycznych nastawach skali poziomej i pionowej. Czy można kategorycznie twierdzić, że w drugim przypadku oscyloskop szumi mniej? Gdyby chodziło o produkty dwóch różnych firm pewnie tak...

**Andrzej Kamieniecki  
Tespól**



Rys. 66.