

Ćwiczenie 10

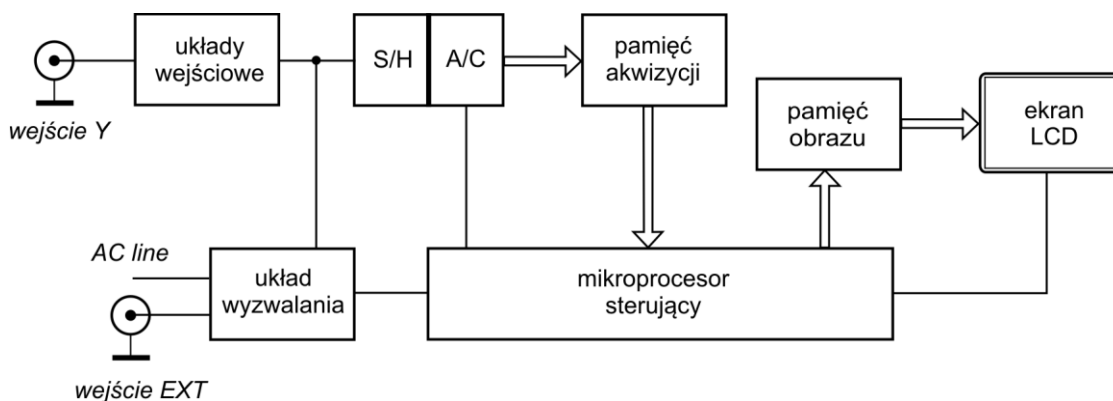
Oscyloskopy cyfrowe

10.1. Wstęp

Oscyloskopy cyfrowe są obecnie bardzo popularnymi urządzeniami pomiarowymi i w większości zastosowań stopniowo zastępują swoje analogowe odpowiedniki. Oba typy oscyloskopów umożliwiają użytkownikowi obserwację sygnałów i pomiar ich parametrów, lecz różnią się nie tylko konstrukcją i zasadą działania ale również funkcjonalnością. Oscyloskopy cyfrowe oferują szereg funkcji ułatwiających użytkownikowi pracę jak również więcej możliwości pomiarowych w porównaniu z oscyloskopami analogowymi. Celem ćwiczenia jest zapoznanie się z zasadami eksploatacji oscyloskopów cyfrowych, ich funkcjonalnością oraz podstawami parametrami a także sposobami wykonywania pomiarów parametrów czasowych i amplitudowych obserwowanych sygnałów.

10.2. Budowa i zasada działania oscyloskopów cyfrowych

Oscyloskop analogowy pracuje w czasie rzeczywistym, co oznacza, że zmiany sygnału badanego zachodzące w trakcie trwania okresu podstawy czasu są bezpośrednio widoczne na ekranie. Z jednej strony jest to duża zaleta oscyloskopów analogowych z drugiej przyczyna komplikacji konstrukcji układów, ograniczenie pracy w zakresie krótkich podstaw czasu a wreszcie brak możliwości zobrazowania przebiegów jednokrotnych. Tych problemów konstrukcyjnych jest pozbawiony oscyloskop cyfrowy, którego schemat blokowy przedstawiony jest na rysunku 10.1.



Rys. 10.1. Uproszczony schemat blokowy oscyloskopu cyfrowego

Idea pracy oscyloskopu cyfrowego polega na pobieraniu próbek sygnału, zapisywaniu ich w pamięci w postaci cyfrowej a następnie rekonstrukcji przebiegu na ekranie oscyloskopu. Uaktualnianie obrazu na ekranie odbywa się z częstotliwością niezależną od podstawy czasu. Oscyloskop cyfrowy nie zobrazowuje sygnałów w czasie rzeczywistym, co należy uznać za jego

wadę. Jedną z zalet oscyloskopów cyfrowych jest natomiast możliwość wykonywania złożonych operacji matematycznych na sygnale, w tym analizy widmowej z wykorzystaniem algorytmów FFT. Cykl pracy oscyloskopu cyfrowego można podzielić na dwie fazy: fazę akwizycji sygnału i fazę rekonstrukcji sygnału.

10.2.1. Faza akwizycji

W fazie akwizycji, badany sygnał napięciowy podany na wejście oscyloskopu przetwarzany jest na ciąg próbek, które odpowiadają wartościom chwilowym napięcia pobieranym w ściśle określonych odstępach czasu, i zapisywany w postaci zbioru n -bitowych liczb w pamięci akwizycji.

Sygnał badany, przez układ sprzężenia, tak jak w oscyloskopie analogowym, podany jest na dzielnik i wzmacniacz wejściowy. Tu następuje kondycjonowanie sygnału w zależności od ustawień wzmocnienia dla dopasowania go do zakresu analogowego napięcia wejściowego przetwornika analogowo-cyfrowego A/C (ang. *ADC – Analog-to-Digital Converter*). Przetwornik A/C poprzedzony jest układem próbkująco-pamiętającym S/H (ang. *Sample and Hold*), w którym zostaje pobrana i zapamiętana, na czas konwersji analogowo-cyfrowej, bieżąca wartość napięcia w chwili próbkowania (często układ S/H występuje w wewnętrznej strukturze przetwornika A/C). Ta analogowa próbka sygnału zostaje przetworzona na słowo o długości n -bitów w określonym formacie cyfrowym przez przetwornik analogowo-cyfrowy. Najczęściej spotyka się oscyloskopy z przetwarzaniem 8-bitowym, rzadziej 10-bitowym, czy 12-bitowym. Okres pobierania próbek sygnału badanego zależy od sposobu i częstotliwości próbkowania wyznaczonej przez mikroprocesor sterujący w zależności od ustawień podstawy czasu. Po zebraniu m -słów o rozmiarze n -bitów zapełniona zostaje pamięć akwizycji. Mówimy, że zarejestrowany został rekord danych akwizycji o długości m . Typowa długość rekordu danych wynosi od kilku kilobajtów do kilku megabajtów. Dalej możliwe są dwa ogólne tryby pracy oscyloskopu. Pierwszy, w którym kolejne próbki sygnału zapisywane są w pamięci wymazując próbki poprzednie. Jest to tryb pracy aktywnej (ang. *active trace*), stosowany przy obserwacji sygnałów powtarzalnych. Drugi, informacje o sygnale zebrane w pamięci są zamrożone i mogą być przechowywane dowolnie długo. Jest to tryb pracy zamrożonej (ang. *stored trace*), stosowany przy obserwacji sygnałów jednokrotnych.

10.2.2. Faza rekonstrukcji

W fazie rekonstrukcji, próbki sygnału zapisane w cyfrowej pamięci akwizycji wykorzystywane są do odtworzenia badanego przebiegu na ekranie oscyloskopu. Współcześnie oscyloskopy cyfrowe wyposażone są w wyświetlacze LCD, poprzednio były to lampy kineskopowe najczęściej z odchyleniem magnetycznym. Na podstawie zgromadzonych danych w pamięci akwizycji mikroprocesorowy układ sterujący tworzy mapę bitową reprezentującą obraz pojawiający się na wyświetlaczu, podobnie jak to ma miejsce w monitorach komputerowych. Mapa bitowa zapisywana

jest w osobnej pamięci obrazu. Skalę osi poziomej określa nastawa podstawy czasu. Uaktualnianie obrazu na ekranie odbywa się z częstotliwością typowo $25\div 30$ Hz, ze względu na bezwładność oka ludzkiego i jak widać, nie ma to nic wspólnego z częstotliwością odświeżania oscylogramu w oscyloskopach analogowych. Należy pamiętać, że rejestrowane są próbki sygnału i z tych próbek sygnału składa się odtworzony przebieg. Gubiona jest informacja o przebiegu sygnału pomiędzy próbkami. W przypadku ekranów LCD można sobie wyobrazić sytuację kiedy zebrana liczba punktów w rekordzie odpowiada rozdzielczości poziomej wyświetlacza, czyli liczbie pikseli, podobnie liczba poziomów kwantyzacji przetwornika A/C (równa 2^n), wynikająca z długości słowa cyfrowego n , odpowiada rozdzielczości pionowej wyświetlacza. Wówczas próbki sygnału mają bezpośrednie przełożenie na mapę bitową obrazu i nie ma potrzeby skalowania. Taka sytuacja występuje jednak bardzo rzadko i przygotowanie mapy obrazu wymaga przetworzenia danych i skalowania w obu osiach.

Typowo obraz na ekranie składa się z 8 działek w osi pionowej i 10/12 działek w osi poziomej. Przy standardowej rozdzielczości wyświetlaczy LCD stosowanych w oscyloskopach cyfrowych jedną działkę w każdej osi tworzy $50\div 100$ pikseli.

10.2.3. Charakterystyka konstrukcji

Wyodrębnione fazy akwizycji i rekonstrukcji sygnału występują we wszystkich oscyloskopach cyfrowych. W najprostszych rozwiązaniach fazy te rozdzielone są w czasie tak, jak to ma miejsce w oscyloskopach występujących pod historyczną nazwą DSO (ang. *Digital Storage Oscilloscope*). Charakteryzują się one szeregowym procesem przetwarzania od momentu pojawienia się sygnału do momentu utworzenia jego obrazu. Po zapisaniu rekordu akwizycji mikroprocesor może wykonać rekonstrukcję przebiegu, a dane przesłać do pamięci obrazu. Od tego momentu oscyloskop jest gotowy do kolejnej rejestracji. Czas przetworzenia danych i przygotowania zobrazowania jest relatywnie długi (rzędu milisekund) i wielokrotnie dłuższy od czasów akwizycji przy szybkich podstawach czasu. Jest to tzw. *czas martwy*, w którym gubione są informacje o badanym sygnale. Możliwe jest zapisywanie próbek w pamięci akwizycji w sposób ciągły (na zasadzie bufora kołowego z nadpisaniem najstarszych próbek), ale jego zawartość jest odczytywana dopiero po wystąpieniu warunku wyzwolenia oscyloskopu. Pomiędzy jedną a drugą rekonstrukcją upływa czas, w którym przyrząd nie reaguje na impulsy wyzwalające. Wcześniej zapisane próbki są tracone pomimo chwilowego zapisu w pamięci. W efekcie końcowym oscyloskop DSO przedstawia jedynie krótkie fragmenty sygnału w porównaniu z całym procesem pomiaru. Większość rejestrowanych próbek jest ignorowana. Jest to podstawową wadą oscyloskopów cyfrowych, która powoduje trudność w obserwacji krótkotrwałych i sporadycznych zakłóceń występujących w badanym sygnale. Dla polepszenia właściwości użytkowych stosuje się bardziej zaawansowane tryby pracy bloku akwizycji sygnałów oraz modyfikację konstrukcji. Modyfikacje konstrukcji dążą do

zrównoleglenia fazy akwizycji i rekonstrukcji. Tak powstały oscyloskopy cyfrowe typu DPO (ang. *Digital Phosphor Oscilloscope*), w których rozbudowane układy akwizycji zapisują wielokrotnie więcej rekordów akwizycji w jednostce czasu a dodatkowe układy *rasteryzacji* przygotowują nakładane mapy pamięci obrazów. W ten sposób uzyskuje się skrócenie czasu martwego, co nie zmienia faktu, że oscyloskop cyfrowy nadal nie zobrazowuje sygnałów w czasie rzeczywistym. Oscyloskopy DPO uzyskują dodatkowo efekt podobny do poświaty w oscyloskopach analogowych, zmienna intensywność fragmentu obrazu informuje jak często powtarza się zjawisko w obserwowanym przebiegu.

10.2.4. Szybkość próbkowania, pasmo oscyloskopów cyfrowych

W oscyloskopach cyfrowych stosuje się różnorodne metody sprzętowo-programowe dla uzyskania wysokich efektywnych częstotliwości próbkowania. Największe uzyskiwane szybkości próbkowania przy pracy jednokanałowej to 100 GS/s (okres próbkowania 10 ps). Rozpatrzmy przypadek rejestracji jednorazowej oraz sytuację, w której każdy piksel w osi poziomej ma odpowiadać kolejnym próbkom w rekordzie akwizycji. Dla 50 pikseli/dz oraz 10 działek mamy 500 pikseli w osi czasu. Przy zadanej podstawie czasu 500 ps/dz należy rejestrować próbki w przedziale 5 ns, co przy próbkowaniu z okresem 10 ps oznacza zapisanie rekordu akwizycji o długości 500 próbek, równej liczbie pikseli. Jeśli oscyloskop dysponuje podstawą czasu 50 ps/dz, to czas rejestracji rekordu akwizycji wynosi 0,5 ns i odpowiada rejestracji 50 próbek. Oznacza to, że na każdą działkę ekranu przypada jedynie 5 próbek sygnału (10-krotnie mniej), czyli każda próbka reprezentuje co 10-ty piksel ekranu. Wówczas potrzebna jest *interpolacja*, czyli „rozciągnięcie” zarejestrowanych 50 próbek do rozmiaru ekranu i uzupełnienie brakujących próbek poprzez funkcję interpolacji. W przypadku sygnałów okresowych możliwe jest utworzenie obrazu przebiegu na podstawie serii kolejnych cykli rejestracji, kiedy próbki sygnału w każdym kolejnym cyklu pobierane są z pewnym przesunięciem czasowym. Wydłuża się czas uzyskania zobrazowania ale zwiększa się efektywna częstotliwość próbkowania sygnału. W tym przypadku mówimy o próbkowaniu w *czasie ekwiwalentnym* w odróżnieniu od poprzedniej sytuacji próbkowania w *czasie rzeczywistym*. Bliższe wyjaśnienie metod próbkowania znajduje się w punkcie 10.3. W przedstawionym przykładzie założyliśmy stałą częstotliwość próbkowania i zmienną długość rekordu akwizycji. Z reguły mamy do czynienia z sytuacją odwrotną, przy stałym rekordzie akwizycji M zmienia się okres próbkowania T_p (częstotliwość próbkowania f_p) w zależności od ustawienia podstawy czasu D_T . Czas akwizycji t_A , w którym sygnał jest rejestrowany wynika bezpośrednio z podstawy czasu. Rekord akwizycji musi zostać zapisany właśnie w tym czasie, czyli przy założeniu 10 działek w osi czasu otrzymujemy:

$$t_A[s] = 10[dz] \cdot D_T \left[\frac{s}{dz} \right] = T_p[s] \cdot M[próbki] \quad (10.1)$$

Stąd okres T_p i częstotliwość próbkowania f_p określone są wyrażeniami:

$$T_p = \frac{t_A}{M} = \frac{10 \cdot D_T}{M} \quad (10.2)$$

$$f_p = \frac{M}{t_A} = \frac{M}{10 \cdot D_T} \quad (10.3)$$

Założmy również, że $M = 500$ próbek, wtedy:

– przy podstawie czasu $D_T = 5$ ns/dz wymagana częstotliwość próbkowania f_p wynosi 10 GHz:

$$f_p = \frac{M}{t_A} = \frac{500}{10 \cdot 5 \cdot 10^{-9}} = 10 \cdot 10^9 \text{ Hz} = 10 \text{ GHz} \quad (10.4)$$

– przy $D_T = 500$ ps/dz wymagana częstotliwość próbkowania f_p wynosi 100 GHz:

$$f_p = \frac{M}{t_A} = \frac{500}{10 \cdot 500 \cdot 10^{-12}} = \frac{50}{0,5 \cdot 10^{-9}} = 100 \cdot 10^9 \text{ Hz} = 100 \text{ GHz} \quad (10.5)$$

– przy $D_T = 50$ ps/dz wymagana częstotliwość próbkowania f_p wynosi 1000 GHz:

$$f_p = \frac{M}{t_A} = \frac{500}{10 \cdot 50 \cdot 10^{-12}} = \frac{50}{0,05 \cdot 10^{-9}} = 1000 \cdot 10^9 \text{ Hz} = 1000 \text{ GHz} \quad (10.6)$$

Jak widać, przy wydłużaniu podstawy czasu wymagana częstotliwość próbkowania maleje, przy skracaniu podstawy czasu wymagana częstotliwość próbkowania rośnie. Dla podstawy czasu 50 ps/dz wymagana częstotliwość próbkowania wynosi 1000 GHz, czyli dziesięciokrotnie więcej niż podana typowa granica szybkości próbkowania w oscyloskopach, równa 100 GHz. Wówczas oscyloskop pracuje z graniczną częstotliwością próbkowania 100 GHz i rejestruje próbki w czasie akwizycji 0,5 ns. Uzyskujemy sytuację taką, jak w przykładzie opisanym wyżej.

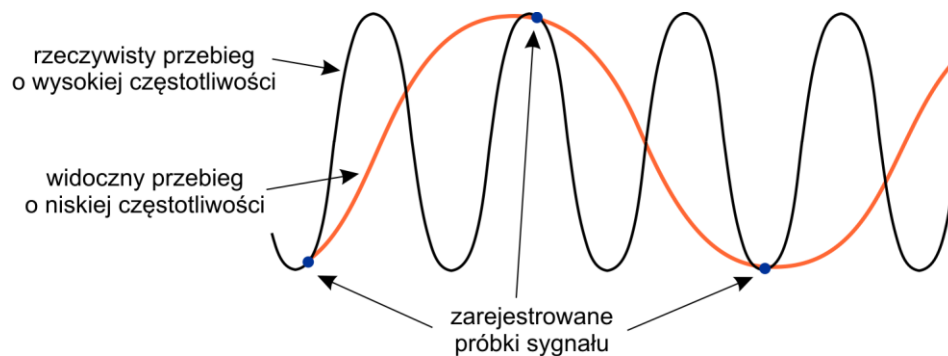
Przy określonej długości rekordu akwizycji M maksymalna częstotliwość pracy przetwornika A/C f_{pmax} w oscyloskopie wyznacza graniczną wartość podstawy czasu D_{Tmin} (minimalny czas podstawy), przy którym można zapisać rekord w pojedynczym cyklu akwizycji. W podanym przykładzie wartość D_{Tmin} wynosi:

$$D_{Tmin} = \frac{M}{10 \cdot f_{pmax}} = \frac{500}{10 \cdot 100 \cdot 10^9} = 0,5 \cdot 10^{-9} [\text{s} / \text{dz}] = 0,5 [\text{ns} / \text{dz}] = 500 \text{ ps} / \text{dz} \quad (10.7)$$

Zmiana częstotliwości próbkowania niesie za sobą konsekwencję zmiany wymaganego pasma sygnału, ze względu na wymagania kryterium Nyquista, zgodnie z którym częstotliwość próbkowania sygnału powinna być co najmniej dwukrotnie większa od górnej częstotliwości pasma sygnału. Przy nie zachowaniu tego warunku możliwe jest wystąpienie błędnego utożsamienia przebiegu czasowego (ang. *aliasing*), kiedy obserwowany przebieg na ekranie ma inną częstotliwość niż w rzeczywistości.

W przykładowym oscyloskopie cyfrowym TDS1012 maksymalna szybkość przetwarzania wynosi 1 GS/s a długość rekordu akwizycji 2500 próbek. Przy pracy z podstawą czasu 250 ns/dz czas zapisania rekordu równy jest 2,5 μ s (10 działek w osi poziomej), przy częstotliwości

próbkowania 1 GS/s. Teoretycznie dozwolona górna częstotliwość pasma sygnału wynosi 500 MHz, fizycznie pasmo sygnału ograniczone jest rzeczywistym analogowym pasmem oscyloskopu wynoszącym 100 MHz. Przy pracy z podstawą czasu 10 ms/dz czas zapisania rekordu równy jest 100 ms, przy częstotliwości próbkowania 25 kS/s. Wymagane pasmo sygnału pozwalające uniknąć błędnego utożsamienia sygnału w dziedzinie czasu to 12,5 kHz. Ilustrację błędnego utożsamienia sygnału w dziedzinie czasu przedstawia rysunek 10.2.



Rys. 10.2. Błędne utożsamienie sygnału w wyniku niezachowania warunku próbkowania

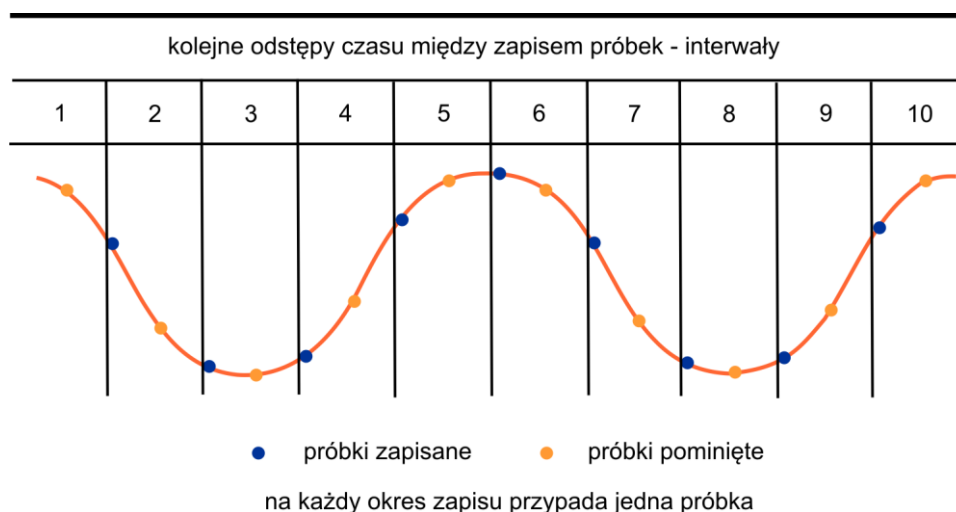
10.2.5. Podstawowe tryby pracy bloku akwizycji sygnału

Zazwyczaj przetwornik A/C pracuje w oscyloskopie cyfrowym z największą możliwą dla niego szybkością przetwarzania, co pozwala na uzyskanie większej stabilności i dokładności. Wymagana częstotliwość próbkowania wynikająca z ustawienia podstawy czasu i długości rekordu akwizycji odpowiada częstotliwości pobierania próbek do zapisu w pamięci. Tylko część próbek podlega rejestracji pozostałe są pomijane. W przypadku krótkich podstaw czasu wymagana częstotliwość próbkowania może być za duża dla możliwości przetwornika. Wówczas liczba zarejestrowanych próbek jest mniejsza niż długość rekordu. W takich sytuacjach stosuje się próbkowanie w czasie ekwiwalentnym i/lub interpolację sygnału. Interpolacja może być liniowa lub typu $\sin(x)/x$ (*Sync*). Interpolacja typu *Sync* daje w większości przypadków lepsze wrażenie wizualne zobrazonego przebiegu. W przypadku dłuższych podstaw czasu dysponujemy nadmiarem próbek w stosunku do rozmiaru rekordu akwizycji. Wykorzystanie próbek nadmiarowych może zależeć od wybranego trybu pracy układu akwizycji. Do podstawowych trybów akwizycji danych w oscyloskopach cyfrowych należą: tryb próbkowania (ang. *sample*), tryb detekcji wartości szczytowej (ang. *peak detect*), tryb uśredniania (ang. *average*) oraz tryb przewijania (ang. *roll*).

Tryb próbkowania

W tym trybie oscyloskop próbuje sygnał w równych odstępach czasu. Okres, co który zapisywane są próbki do pamięci nazywa się *interwałem*. Do pamięci trafia zawsze pierwsza próbka sygnału pobrana w interwale. Jeśli próbek w interwale jest więcej pozostałe są pomijane. Ten proces nazywa się *decymacją* a jego wynikiem jest zmniejszenie efektywnej częstotliwości

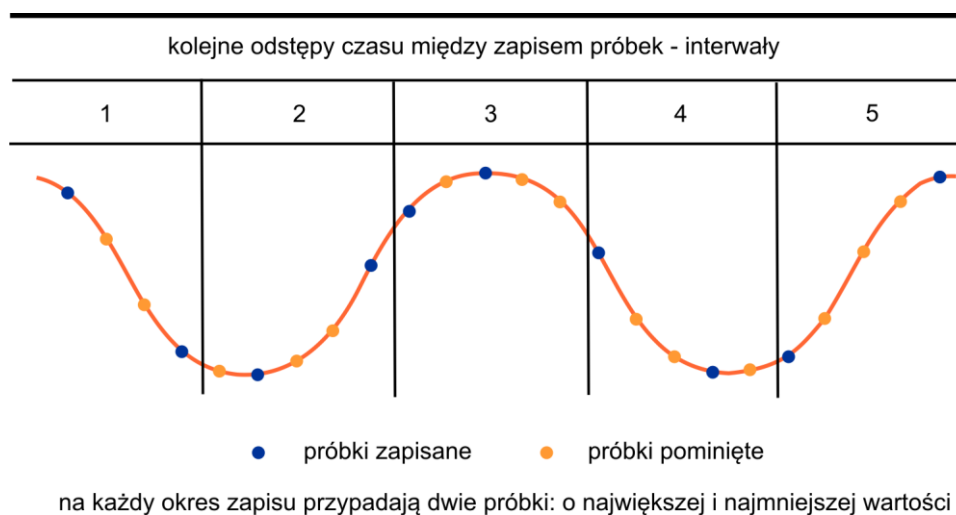
próbkowania. Liczba próbek w interwale wzrasta przy wydłużaniu podstawy czasu. Podczas skracania podstawy czasu liczba próbek w interwale maleje do wartości granicznej, podczas której interwał zapisu do pamięci jest taki sam jak okres próbkowania przetwornika. Wówczas do pamięci trafia każda próbka sygnału. Z reguły tryb próbkowania jest domyślnym trybem pracy układów akwizycji. Tryb ten może powodować powstawanie błędnego utożsamiania sygnału (szczególnie przy dłuższych podstawach czasu, gdy zmniejsza się wymagane pasmo sygnału) oraz pomijanie szybkich zmian w sygnale występujących pomiędzy wybranymi próbkami. Dla jeszcze krótszych podstaw czasu pojedynczy cykl rejestracji nie wypełni rekordu akwizycji. Wtedy mamy wspomnianą wcześniej sytuację niedoboru próbek i wymagane jest próbkowanie w czasie ekwiwalentnym i/lub interpolacja dla uzupełnienia rekordu danych. Zasadę pracy bloku akwizycji w trybie próbkowania przedstawia rysunek 10.3.



Rys. 10.3. Zasada rejestracji próbek sygnału w trybie próbkowania

Tryb detekcji wartości szczytowych

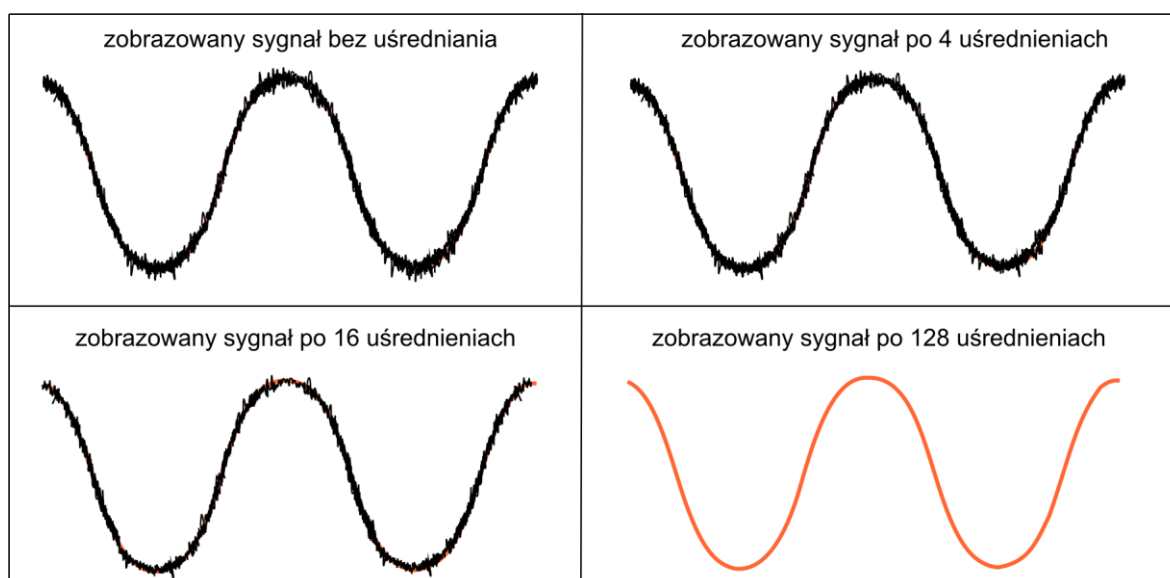
W tym trybie oscyloskop znajduje najwyższe i najniższe wartości sygnału wejściowego występujące w każdym interwale zapisu. Do pamięci zapisuje się parę próbek, co wymaga albo większej pamięci albo skraca czas wypełnienia rekordu. Dlatego niekiedy stosuje się rozwiązania, w których wartości największa i najmniejsza są zapisywane naprzemiennie w kolejnych interwałach. Detekcję szczytów stosuje się w trybie próbkowania w czasie rzeczywistym bez interpolacji. W tym trybie akwizycji można gromadzić i zobrazować wąskie impulsy zakłócające występujące w sygnale o czasie trwania krótszym od interwału zapisu, które normalnie byłyby niewidoczne. Zasada pracy bloku akwizycji w trybie detekcji szczytów została przedstawiona na rysunku 10.4.



Rys. 10.4. Zasada rejestracji próbek sygnału w trybie detekcji szczytów

Tryb uśredniania

W tym trybie oscyloskop rejestruje wiele przebiegów, uśrednia je i wyświetla bieżący przebieg wynikowy. Uśrednianie i zobrazowanie odbywa się na bieżąco. Każdy kolejny cykl rejestracji wykonywany jest w trybie próbkowania a uśredniony wynik z n kolejno zebranych cykli zapisany jest w pamięci i podlega zobrazowaniu. W trybie tym użytkownik ma możliwość wyboru liczby cykli rejestracji do uśrednienia. Po osiągnięci zadanej liczby uśrednień proces rejestracji i zobrazowania zatrzymuje się. Zastosowanie tego trybu możliwe jest dla sygnałów okresowych. Służy on głównie do redukcji szumu w obserwowanym przebiegu. Efekt rejestracji sygnału w trybie uśredniania ilustruje rysunek 10.5.



Rys. 10.5. Eliminacja szumu w sygnale w wyniku uśredniania

Tryb przewijania

Ciekawym trybem akwizycji charakterystycznym dla oscyloskopów cyfrowych jest tryb przewijania. Stosuje się go dla długich podstaw czasu, od kilku do kilkunastu sekund na działkę, kiedy czas zapisu rekordu jest bardzo długi, co przekłada się również na częstotliwości odświeżania ekranu. Jest to niepraktyczne dla użytkownika i sugeruje możliwość uszkodzenia przyrządu. Dlatego obraz na ekranie nie jest uaktualniany dopiero po zapisie całego rekordu ale na bieżąco, w trakcie rejestracji próbek. Wówczas przebieg przesuwa się od lewej do prawej krawędzi ekranu, co daje wizualny efekt przewijania, od którego pochodzi nazwa trybu. Szereg oscyloskopów cyfrowych włącza automatycznie tryb przewijania po wybraniu odpowiednio długiej podstawy czasu.

10.2.6. Wyzwalanie w oscyloskopach cyfrowych

Podobnie jak w oscyloskopach analogowych obwód wyzwalania w oscyloskopach cyfrowych wykrywa spełnienie warunku wyzwolenia. Wystąpienie warunku wyzwolenia rozpoczyna proces zobrazowania przebiegu na ekranie na podstawie próbek zapisanych w pamięci. Ponieważ proces akwizycji oraz proces rekonstrukcji, inicjowany impulsem wyzwolenia, są niezależne, daje to dodatkowe możliwości w porównaniu do oscyloskopów analogowych. Standardowo przyjęto, że moment wyzwolenia w oscyloskopach cyfrowych ma położenie po środku ekranu, co odpowiada jego położeniu w połowie rekordu akwizycji. Dzięki temu mamy możliwość obserwacji fragmentu przebiegu zarejestrowanego przed wystąpieniem wyzwolenia (ang. *pre-trigger*) oraz fragmentu zarejestrowanego po wystąpieniu wyzwolenia (ang. *post-trigger*). Odróżnia to oscyloskop cyfrowy od analogowego, w którym proces rejestracji jest synchroniczny z procesem zobrazowania i początkowany impulsem wyzwalania. Dodatkowo w oscyloskopach cyfrowych istnieje możliwość zmiany położenia momentu wyzwalania względem zarejestrowanego przebiegu. Podczas normalnej pracy oscyloskopu sygnał z wybranego źródła wyzwalania jest monitorowany przez układ wyzwalania a układ akwizycji realizuje bieżącą rejestrację sygnału badanego. W chwili wystąpienia impulsu wyzwalania odliczane są próbki odpowiadające obszarowi rekordu po wyzwoleniu (*post-trigger*), natomiast wcześniej zapisane próbki tworzą obszar rekordu przed wyzwoleniem (*pre-trigger*). Przyjmuje się, że chwili wyzwolenia odpowiada współrzędna zerowa na osi czasu.

Źródła sygnału wyzwalania

Źródłem sygnały wyzwalającego, podobnie jak w oscyloskopach analogowych, może być sygnał badany podłączony do wejścia oscyloskopu w kanale Y (CH1, CH2), sygnał zewnętrzny podany na dodatkowe wejście wyzwalania (EXT), sygnał pochodzący z linii zasilania (LINE).

Tryby pracy układu wyzwalania

Analogiczne są również podstawowe tryby pracy układu wyzwalania:

Normalny (NORM) – w którym aktualizacja zobrazowania następuje na skutek impulsów wyzwalań, występujących po wykryciu warunku wyzwalań. Przy braku impulsów wyzwalań zobrazowany jest dotychczasowy cykl rejestracji lub brak jest zobrazowania przebiegu - w tym trybie oscyloskop nie wyświetla przebiegu do momentu pierwszego wyzwolenia.

Automatyczny (AUTO) – w którym proces zobrazowania uruchamiany jest automatycznie nawet przy braku impulsów wyzwalań. Zobrazowane przebiegi mogą być niestabilne podobnie jak w oscyloskopach analogowych. W trybie *Auto* oscyloskop cyfrowy, podobnie jak analogowy, przechodzi do trybu pracy wyzwalań, kiedy pojawią się impulsy wyzwalań. Dostępny jest również tryb pracy *Auto Level*, w którym poziom wyzwalań regulowany jest w granicach wartości sygnału wyzwalającego. Oscyloskop automatycznie kontroluje zakres wartości sygnału i uniemożliwia ustawienie poziomu wyzwalań powyżej lub poniżej zakresu zmienności sygnału.

W oscyloskopach cyfrowych występuje dodatkowy tryb pracy:

Pojedynczy (SINGLE) – w którym pojawiający się impuls wyzwalań powoduje jednokrotne uruchomienie cyklu akwizycji i zobrazowania. Tryb ten służy do obserwacji jednorazowych sygnałów impulsowych.

Rodzaje wyzwalań

W oscyloskopach cyfrowych występują rozbudowane rodzaje wyzwalań:

Wyzwalanie zboczem (ang. *edge*) – podstawowy tryb wyzwalań poziomem sygnału, którego wartość jest regulowana pokrętką poziomu (ang. *trigger level*) a warunek generacji może być ustawiony dla narastającego lub opadającego zbocza sygnału (ang. *rising/falling edge*). Analogiczny jak w oscyloskopach analogowych.

Wyzwalanie impulsem (ang. *pulse*) – wyzwalań następuje, gdy w sygnale źródłowym wystąpi impuls o określonych cechach, np.: określonej szerokości (ang. *pulse width*) lub szybkości narastania (ang. *slew rate*), impulsem zakłócającym (ang. *glitch*), impulsem niepełnym (ang. *runt*).

Wyzwalanie sygnałem wizyjnym (ang. *video*, TV-H, TV-V) – analogiczne jak dla oscyloskopów analogowych wyzwolenie następuje określonym polem lub linią sygnału wizyjnego.

Sprzężenie źródła sygnału wyzwalań

Oprócz typowych rodzajów sprzężenia (AC, DC) sygnału źródła z wejściem układu wyzwalań stosuje się sprzężenia, które służą poprawie jakości wyzwalań, typu:

HF Reject – tłumienie składowych o wysokiej częstotliwości w sygnale wyzwalań

LF Reject – tłumienie składowych o niskiej częstotliwości w sygnale wyzwalań

Noise Reject – dodanie histerezy do obwodu wyzwalań, co zmniejsza poziom fałszywego wyzwalań przez szum zawarty w sygnale wyzwalań.

10.3. Sposoby próbkowania stosowane w oscyloskopach cyfrowych

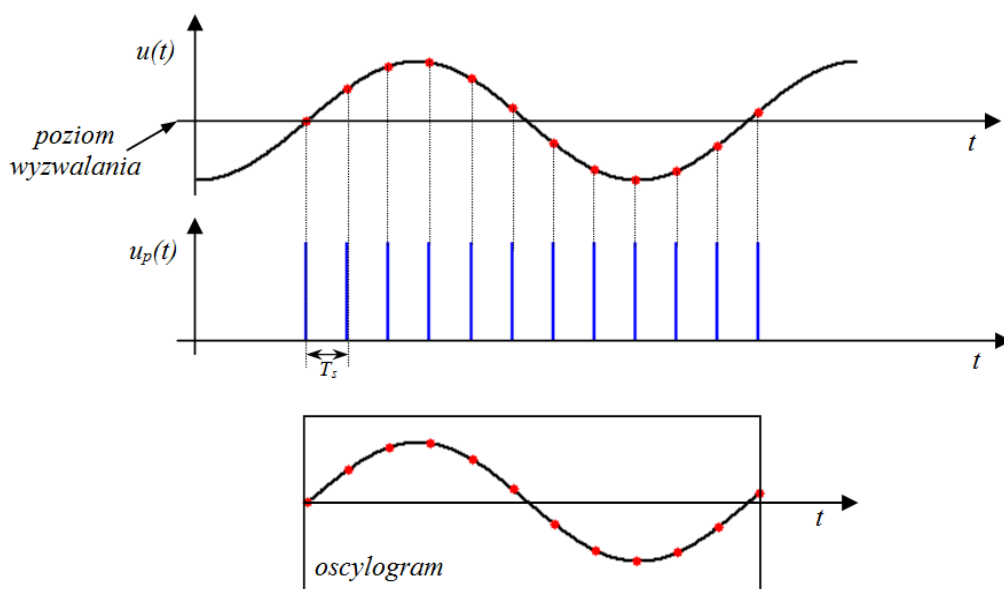
W oscyloskopach cyfrowych, wykorzystywane są różne rodzaje metod próbkowania, które można podzielić na dwie grupy:

- próbkowanie w czasie rzeczywistym,
- próbkowanie w czasie ekwiwalentnym.

10.3.1. Próbkowanie w czasie rzeczywistym

W metodach próbkowania w czasie rzeczywistym, rekord (pamięć) akwizycji, zapełniany jest w trakcie jednego cyklu akwizycji. To znaczy, że wszystkie próbki sygnału tworzące jego oscylogram, pobierane są po pojawieniu się pojedynczego impulsu wyzwalającego. Próbkowanie w czasie rzeczywistym można stosować przy obserwacji sygnałów zarówno okresowych jak i jednorodnych. Ograniczeniem dla sygnałów szybkozmiennych jest maksymalna częstotliwość próbkowania użytego przetwornika analogowo-cyfrowego.

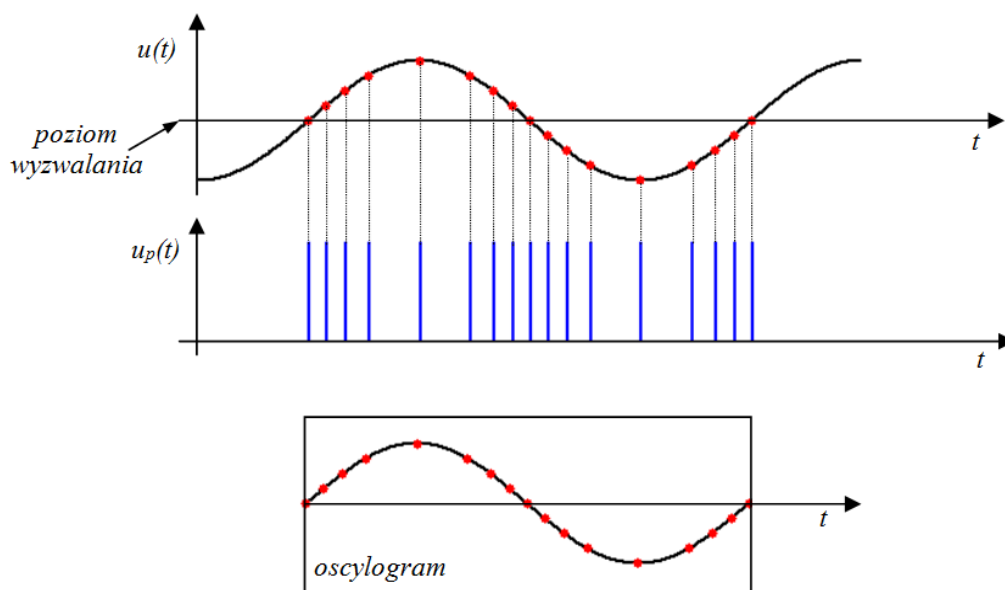
Jedną z metod próbkowania w czasie rzeczywistym jest próbkowanie równomierne, którego idea została przedstawiona na rysunku 10.6. W metodzie tej po pojawieniu się impulsu wyzwalającego, badany sygnał jest próbkowany ze stałą częstotliwością próbkowania, czyli próbki są pobierane w równych odstępach czasu. Odstęp czasu pomiędzy dwoma sąsiadującymi próbkami nazywany jest okresem próbkowania.



Rys 10.6. Idea próbkowania równomiernego ($u(t)$ – sygnał badany, $u_p(t)$ – ciąg impulsów próbkujących)

Próbkowanie w czasie rzeczywistym może odbywać się również w sposób nierównomierny. Metoda taka nazywana próbkowaniem ze zmienną częstotliwością została przedstawiona na rysunku 10.7. Technika ta polega na pobieraniu próbek badanego sygnału z częstotliwością zależną od szybkości jego zmian. Im szybsza zmiana wartości sygnału tym częściej jest on próbkowany.

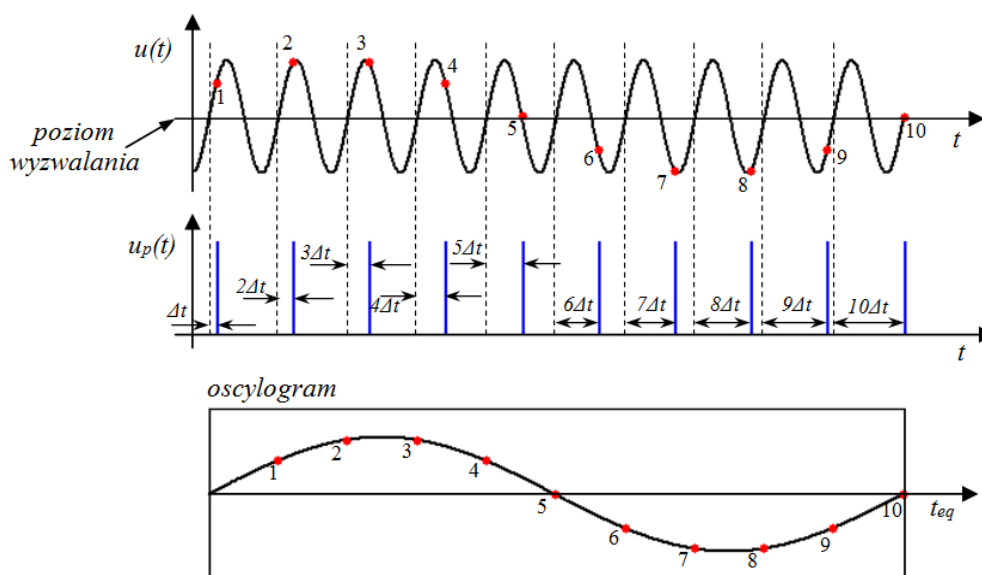
Metoda ta pozwala wierniej odtworzyć postać sygnału jeżeli charakteryzują się on nagłymi skokami wartości, np. krótkotrwałymi impulsami.



Rys. 10.7. Idea próbkowania ze zmienną częstotliwością

10.3.2. Próbkowanie w czasie ekwiwalentnym

W odróżnieniu od próbkowania w czasie rzeczywistym, w próbkowaniu w czasie ekwiwalentnym pamięć akwizycji zapelniana jest nie w jednym a w wielu cyklach akwizycji. Dlatego też, metody te mogą być stosowane tylko do próbkowania sygnałów powtarzalnych (okresowych).



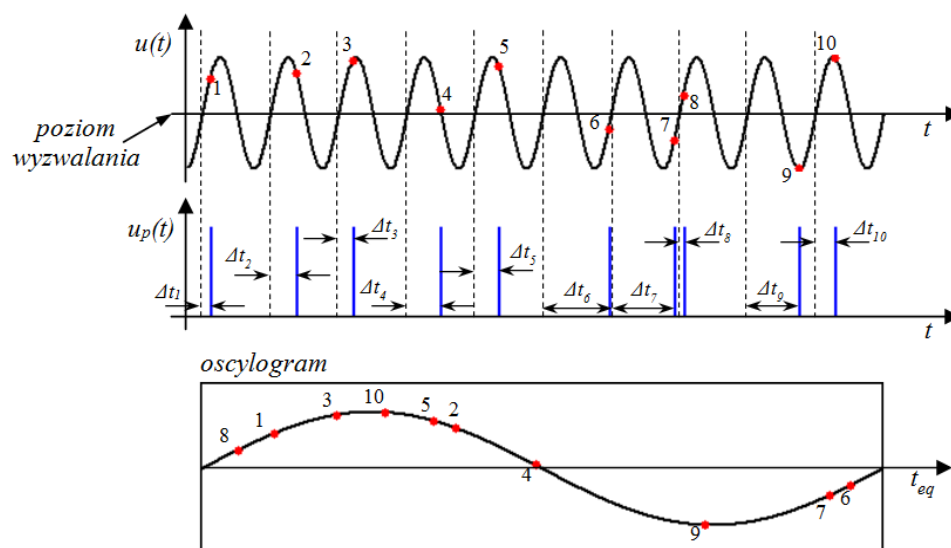
Rys. 10.8. Idea próbkowania sekwencyjnego

Zastosowanie w oscyloskopach cyfrowych, próbkowania w czasie ekwiwalentnym umożliwia obserwację sygnałów okresowych o częstotliwościach większych niż wynikałoby to z możliwości

zastosowanego przetwornika analogowo-cyfrowego przy wykorzystaniu próbkowania w czasie rzeczywistym.

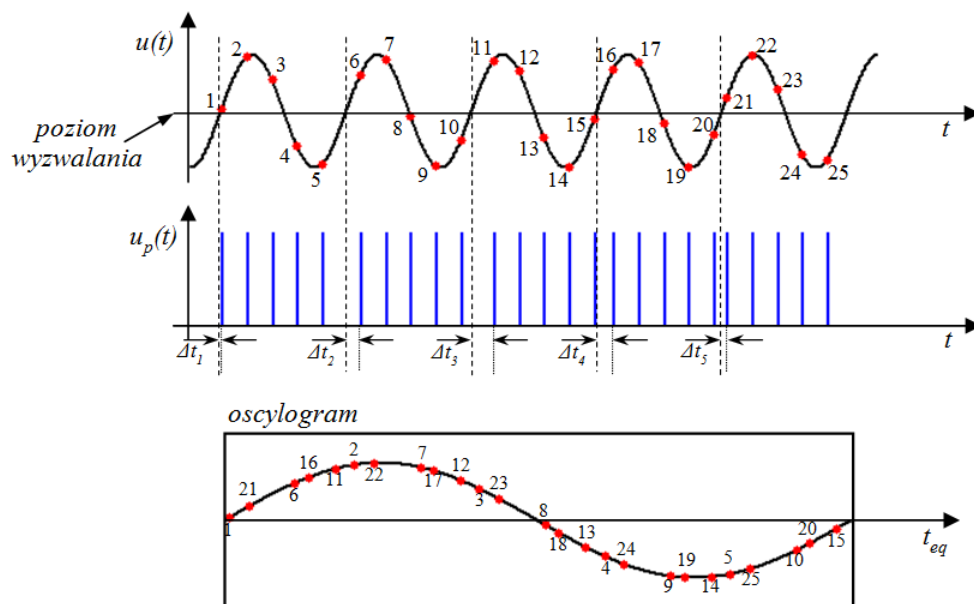
Najprostszą z metod próbkowania w czasie ekwiwalentnym jest próbkowanie sekwencyjne, przedstawione na rysunku 10.8. W metodzie tej k -ta próbka sygnału badanego pobierana jest w odstępie czasu $k \cdot \Delta t$ od momentu wystąpienia k -tego impulsu wyzwalającego. Do zebrania N próbek badanego sygnału potrzebne jest N wyzwoleń.

Kolejną metodą próbkowania w czasie ekwiwalentnym jest próbkowanie przypadkowe, którego idea została przedstawiona na rysunku 10.9. W metodzie tej w kolejnych cyklach akwizycji pobierane są pojedyncze próbki sygnału w losowych odstępach czasu od momentu pojawienia się impulsów wyzwalających. Próbki z kolejnych wyzwoleń nie są kolejnymi próbkami badanego sygnału. Aby otrzymać poprawny oscylogram konieczne jest uszeregowanie próbek względem rosnącego czasu opóźnienia pomiędzy momentem wystąpienia impulsu wyzwalającego a chwilą pobrania próbki. W próbkowaniu przypadkowym, tak samo jak w sekwencyjnym, uzyskanie N próbek sygnału następuje w N cyklach.



Rys. 10.9. Idea próbkowania przypadkowego

Efektywniejszą czasowo metodą próbkowania w czasie ekwiwalentnym jest próbkowanie sekwencyjno-przypadkowe przedstawione na rysunku 10.10. W metodzie tej w kolejnych cyklach akwizycji pobierane jest n próbek w równych odstępach czasu, jednak rozpoczęcie próbkowania jest opóźnione względem chwili wystąpienia impulsu wyzwalającego o losową wartość czasu. Zatem w K cyklach pobieranych jest $n \cdot K$ próbek badanego sygnału. Wszystkie zgromadzone próbki muszą zostać poprawnie uszeregowane względem rosnącego czasu pomiędzy chwilą wystąpienia impulsu wyzwalającego a momentem pobrania danej próbki.



Rys. 10.10. Idea próbkowania sekwencyjno-przypadkowego

10.4. Podstawowe parametry oscyloskopów cyfrowych

Każdy oscyloskop cyfrowy ma zespół analogowych wzmacniaczy wejściowych i przeznaczony jest do tego samego zobrazowania i pomiaru parametrów przebiegów badanych co oscyloskop analogowy. Dlatego wśród parametrów oscyloskopów cyfrowych jest grupa parametrów zdefiniowana jak dla oscyloskopów analogowych. Należą do nich:

1. Analogowe pasmo przenoszenia (Δf) na poziomie 3 dB

Szerokość pasma przenoszenia może się różnić dla różnych trybów akwizycji. Niekiedy oscyloskop realizuje metody poszerzenia pasma poprzez przetwarzanie cyfrowe sygnału i można wówczas mówić o cyfrowym paśmie przenoszenia. Typowo szerokość analogowego pasma przenoszenia to kilkadziesiąt MHz do kilkuset MHz.

2. Czas narastania (t_N) – podobnie jak w oscyloskopach analogowych

3. Zakres współczynnika czasu D_T – może być szerszy niż w oscyloskopach analogowych

4. Zakres współczynnika napięcia D_V – podobnie jak w oscyloskopach analogowych

5. Impedancja wejściowa – podobnie jak w oscyloskopach analogowych

Ponadto wyróżniamy parametry specyficzne dla oscyloskopów cyfrowych, do których należą:

6. Częstotliwość próbkowania lub zakres częstotliwości próbkowania

Definiowana jako maksymalna liczba próbek pobranych z sygnału w ciągu sekundy. Podawana zwykle dla jednego kanału, przy próbkowaniu w czasie rzeczywistym np. 1 GS/s. Zakres częstotliwości próbkowania wynika z zakresu podstawy czasu i długości rekordu, np.: 5 S/s do 1 GS/s. Maksymalna częstotliwość próbkowania wynika z możliwości sprzętowych i

zastosowanego przetwornika A/C (bądź równoległego zespołu przetworników). W dobrych oscyloskopach cyfrowych maksymalna częstotliwość próbkowania wynosi kilka GS/s w bardzo dobrych kilkadziesiąt GS/s. Oprócz częstotliwości próbkowania w czasie rzeczywistym niekiedy podaje się także częstotliwość próbkowania w czasie ekwiwalentnym, która z natury rzeczy ma wartość większą.

7. Długość rekordu akwizycji

Określa ile próbek sygnału może zarejestrować oscyloskop w pojedynczym cyklu akwizycji, podawana na pojedynczy kanał lub dla wszystkich kanałów. Typowo rozmiar rekordu akwizycji wynosi od kilkadziesiąt kb do kilkadziesiąt Mb. W typowych rozwiązaniach długość rekordu jest stała, w zawansowanych jest możliwość wyboru długości rekordu akwizycji. Niekiedy długość rekordu zależy od aktualnej techniki rejestracji sygnału.

Rozdzielczość w osi czasu

Im dłuższy rekord akwizycji, tym większa zdolność rozdzielcza w poziomej osi czasu. Przy stosowanych częstotliwościach próbkowania i długościach rekordu akwizycji zapewniona jest zdolność rozdzielcza w osi czasu większa niż zdolność rozdzielcza wynikająca z możliwości zobrazowania. W praktyce zdolność rozdzielcza w poziomej osi czasu ograniczona jest liczbą pikseli, co odpowiada liczbie zobrazowanych próbek sygnału. Typowo jest to ~500 lub ~1000, co daje rozdzielczość w osi czasu ~0,2% lub ~0,1%.

8. Liczba przebiegów rejestrowanych w ciągu sekundy

Szybkość gromadzenia danych określona jako liczba przebiegów rejestrowanych przez oscyloskop w ciągu sekundy w każdym z kanałów, podawana niekiedy w jednostkach wfms/s (ang. *waveforms per seconds*). Podawana maksymalna liczba rejestracji odnosi się do konkretnych ustawień oscyloskopu. Należy pamiętać, że liczba rejestracji, długość rekordu, częstotliwość próbkowania i ustawienia podstawy czasu są ze sobą wzajemnie powiązane. Wartość każdego z parametrów zależy od pozostałych. Liczba rejestrowanych przebiegów w jednostce czasu ma znaczenie przy detekcji zakłóceń impulsowych w sygnale. Im większa, tym bardziej skraca się czas obserwacji potrzebny na wykrycie zakłócenia. Typowo we współczesnych oscyloskopach liczba rejestracji przebiegów wynosi od kilkadziesiąt na sekundę do kilkadziesiąt tysięcy na sekundę.

9. Rozdzielczość przetwornika A/C

Podawana najczęściej w postaci liczby bitów, czyli długości słowa binarnego. Typowa wartość to 8-bitów, rzadziej 10-bitów, czy 12-bitów. Przekłada się to na liczbę poziomów kwantyzacji, na które dzielony jest zakres napięcia wejściowego odpowiednio 2^8 (256), 2^{10} (1024), 2^{12} (4096).

Rozdzielczość w osi napięcia

Rozdzielczość przetwornika wpływa na zdolność rozdzielczą oscyloskopu w pionowej osi napięcia oraz dokładność pomiaru parametrów napięciowych. W typowych konstrukcjach 8-bitowy przetwornik daje 256 poziomów kwantyzacji, przy rozdzielczości wyświetlacza 400 pikseli. Ograniczenie rozdzielczości napięcia wynika więc z zastosowanego przetwornika. W tym przypadku daje to rozdzielczość w osi napięcia $\sim 0,4\%$.

10.5. Pomiary parametrów sygnałów

Oscyloskopy cyfrowe oprócz podstawowej metody pomiarów z wykorzystaniem siatki współrzędnych, omówionej w ćwiczeniu 2, udostępniają jeszcze dwie inne metody pomiaru parametrów sygnału.

Metoda kursorów

Metod kursorów polega na wykonywaniu pomiarów za pomocą przesuwania kursorów występujących parami i odczytywania wartości liczbowych z ekranu. Kursory napięciowe pojawiają się jako poziome linie na ekranie i mierzą parametry amplitudowe. Kursory czasowe pojawiają się jako pionowe linie na ekranie i mierzą parametry czasowe. Położenie każdego z kursorów podczas przesuwania pokazywane jest w postaci liczbowej na ekranie. Podobnie pokazywana jest odległość między kursorami oznaczająca bezpośrednią wartość mierzonej odległości w osi napięcia, bądź czasu. Aktywacji metody pomiaru z użyciem kursorów dokonuje się poprzez naciśnięcie przycisku zwykle oznaczonego napisem CURSOR. Dokładność pomiaru metodą kursorów jest zbliżona do pomiaru metodą siatki.

Metoda automatyczna

Oscyloskopy cyfrowe mają wbudowane automatyczne funkcje pomiarowe uruchamiane zwykle poprzez naciśnięcie przycisku MEASURE. Pojawia się wówczas menu na ekranie, w którym możemy wybrać źródło pomiaru (kanał oscyloskopu, w którym chcemy mierzyć parametry sygnału), typ pomiaru w osi napięcia, bądź czasu, a następnie jedną z predefiniowanych wielkości mierzonych. W przypadku parametrów napięciowych są to najczęściej: wartości max(+)/max(-), wartość średnia, wartość skuteczna, wartość międzyszczytowa. W przypadku parametrów czasowych: częstotliwość, okres, czas narastania i opadania, czas trwania impulsu dodatniego i ujemnego. W metodzie automatycznej eliminowany jest błąd wynikający z dokładności wzrokowego odczytu ekranu, więc ogólna dokładność pomiarów może być wyższa, szczególnie dla parametrów czasowych. W przypadku parametrów napięciowych należy pamiętać o ograniczeniu dokładności przez błąd całkowity przetwornika analogowo/cyfrowego. Operacje matematyczne przeprowadzane na próbkach sygnału mogą być również źródłem dodatkowego błędu, który jednak można odpowiednio minimalizować.

10.6. Badania laboratoryjne

Cel ćwiczenia:

- poznanie parametrów i funkcji oscyloskopów cyfrowych,
- zapoznanie z podstawową obsługą oscyloskopów cyfrowych,
- nabywanie umiejętności poprawnej konfiguracji pracy oscyloskopu dla:
 - właściwej obserwacji oscylogramów różnych sygnałów,
 - wykorzystania różnych metod pomiaru parametrów napięciowych i czasowych sygnałów,
 - wykorzystania specyficznych funkcji oscyloskopów cyfrowych.

Wykaz przyrządów na stanowisku pomiarowym

Lp.	Nazwa przyrządu
1	Oscyloskop cyfrowy
2	Generatory pomiarowe – źródła sygnałów

Przebieg ćwiczenia:

1. Zapoznanie się z panelem czołowym oscyloskopu

Włączyć zasilanie oscyloskopu cyfrowego. Zapoznać się z klawiszami i pokrętlami dostępnymi na panelu czołowym oscyloskopu, określić ich funkcje. Uzupełnić tabelę z parametrami i właściwościami badanego przyrządu.

2. Wykrycie oscylogramu sygnału doprowadzonego do oscyloskopu

Połączyć układ pomiarowy zgodnie ze schematem zamieszczonym na rysunku 10.11.



Rys. 10.11. Schemat blokowy połączenia źródła sygnału z oscyloskopem

Ustawić w generatorze sygnał o zadanych parametrach. W oscyloskopie wybrać funkcję automatycznego doboru nastaw przyrządu. Naszkicować otrzymany oscylogram. Odczytać i zanotować wartości współczynników czasu i napięcia, wysokość oscylogramu w działkach oraz liczbę pełnych okresów przebiegu widocznych na ekranie. Powyższą procedurę powtórzyć dla kilku zadanych sygnałów.

3. Pomiarów wybranych parametrów sygnałów

Ustawić w generatorze sygnał o zadanych parametrach. Uzyskać na oscyloskopie stabilny oscylogram badanego sygnału. Zmierzyć wybrane parametry czasowe i amplitudowe przebiegu

stosując dostępne metody pomiarowe: z wykorzystaniem siatki pomiarowej, za pomocą kursorów i przy użyciu pomiarów automatycznych. Uzyskane wyniki pomiarów dla każdej metody zanotować w tabeli. Należy pamiętać, że w trakcie pomiarów fragment oscylogramu odpowiadający mierzonemu parametrowi powinien zajmować jak największą część pola pomiarowego.

4. Pomiar częstotliwości próbkowania

Do oscyloskopu doprowadzić sygnał o zadanych parametrach. Włączyć próbkowanie w czasie rzeczywistym. Wybrać funkcję automatycznego doboru nastaw oscyloskopu. Wyłączyć funkcję interpolacji w celu uzyskania oscylogramu reprezentującego kolejne próbki sygnału. Zatrzymać akwizycję danych (odświeżanie obrazu). Zmniejszać wartość współczynnika czasu do momentu otrzymania na ekranie zaledwie kilku próbek przebiegu. Metodą kursorów zmierzyć przedział czasu pomiędzy dwoma kolejnymi próbkami sygnału (okres próbkowania), na jego podstawie wyznaczyć częstotliwość próbkowania (f_s). Wyniki zapisać w tabeli. W ramach opracowania sprawozdania wyznaczyć pasmo częstotliwościowe toru Y (Δf) za pomocą wzoru:

$$\Delta f = \frac{1}{2} f_s \quad (10.8)$$

Powyższą procedurę powtórzyć dla kilku zadanych wartości częstotliwości sygnału z generatora.

5. Wykorzystanie „opóźnionej” podstawy czasu do pomiaru parametrów sygnałów impulsowych

Ustawić w generatorze sygnał o zadanych parametrach. Wybrać funkcję automatycznego doboru nastaw oscyloskopu. Włączyć funkcję „opóźnionej” podstawy czasu („lupy czasowej”). Z jej pomocą zmierzyć wybrane parametry obserwowanego przebiegu z wykorzystaniem metody kursorów lub automatycznej. W trakcie pomiarów, przy użyciu odpowiednich pokręteł ustawiać „lupę czasową” tak, aby obejmowała fragment oscylogramu odpowiadający mierzonemu parametrowi. Pomocna może być również regulacja poziomu wyzwalania oraz zmiana zbocza wyzwalającego. Wyniki pomiarów zanotować w tabeli. Naszkicować oscylogramy.

6. Obserwacja sygnałów jednokrotnych

Do oscyloskopu podłączyć wyjście generatora pomiarowego umożliwiającego wyzwalanie pojedynczych impulsów prostokątnych. Wybrać pojedynczy tryb pracy układu wyzwalania oscyloskopu (SINGLE). Ustawić w generatorze zadane parametry sygnału. Ustawić odpowiednie wartości współczynników czasu i napięcia oraz poziomu wyzwalania (dopasowane do ustawionych parametrów sygnału). Uruchomić akwizycję danych w oscyloskopie. Wyzwolić generator pomiarowy. Jeśli to konieczne, wykonać korektę nastaw oscyloskopu i ponownie zarejestrować sygnał. Na podstawie oscylogramu zmierzyć czas trwania i amplitudę wygenerowanego impulsu z wykorzystaniem metody siatki lub kursorów. Powyższą procedurę powtórzyć dla kilku zadanych nastaw generatora. Wyniki pomiarów zamieścić w tabeli.

Dla impulsu o najkrótszym czasie trwania naszkicować oscylogramy przy włączonej i wyłączonej funkcji interpolacji otrzymanego przebiegu.

7. Wykorzystanie pamięci w oscyloskopie

Na kanał 1 oscyloskopu podawać kolejno trzy sygnały o różnych kształtach, częstotliwościach i amplitudach. Zmierzyć wybrane parametry wygenerowanych przebiegów. Wykorzystując wewnętrzną pamięć oscyloskopu zapisać ich oscylogramy. Odłączyć przewód pomiarowy od oscyloskopu. Kolejno odczytywać z pamięci oscyloskopu zapisane oscylogramy. Powtórzyć pomiary wybranych parametrów zarejestrowanych przebiegów. Wyniki pomiarów zapisać w tabeli. Naszkicować oscylogramy odczytane z pamięci oscyloskopu.

8. Obserwacja sygnałów wolnozmiennych

a) Wykorzystanie pojedynczego trybu pracy układu wyzwalania

Wybrać pojedynczy tryb pracy układu wyzwalania oscyloskopu (SINGLE). Ustawić w generatorze zadane parametry sygnału. Dopasować ustawienia oscyloskopu do parametrów sygnału (ustawić odpowiednią wartości współczynników czasu i napięcia oraz poziomu wyzwalania). Uruchomić akwizycję danych. Jeśli to konieczne, wykonać korektę nastaw oscyloskopu i ponownie zarejestrować sygnał. Zmierzyć wybrane parametry przebiegu. Powyższą procedurę powtórzyć dla kilku zadanych sygnałów. Wyniki pomiarów zamieścić w tabeli. Naszkicować otrzymane oscylogramy.

b) Wykorzystanie pracy bloku akwizycji w trybie przewijania

Włączyć pracę bloku akwizycji w trybie przewijania (ROLL). Ustawić w generatorze sygnał o zadanych parametrach. Ręcznie dobrać odpowiednie nastawy oscyloskopu. Zatrzymać akwizycję danych. Zmierzyć wybrane parametry przebiegu. Powyższą procedurę powtórzyć dla kilku zadanych sygnałów. Wyniki pomiarów zamieścić w tabeli. Naszkicować otrzymane oscylogramy.

Opracowanie sprawozdania:

1. Wykonać odpowiednie obliczenia. Ich wyniki zamieścić w odpowiednich tabelach. Przedstawić przykłady przeprowadzonych obliczeń.
2. Zamieścić wymagane szkice oscylogramów.
3. Sformułować wnioski oraz spostrzeżenia dotyczące wszystkich punktów pomiarowych.

Przykładowe pytania kontrolne:

1. Budowa oscyloskopu cyfrowego.
2. Powstawanie oscylogramu: faza akwizycji i rekonstrukcji.
3. Tryby pracy bloku akwizycji sygnałów
4. Wyzwalanie w oscyloskopach cyfrowych.
5. Częstotliwość próbkowania i pasmo przenoszenia oscyloskopów cyfrowych

6. Metody próbkowania stosowane w oscyloskopach cyfrowych.
7. Parametry oscyloskopów cyfrowych.
8. Parametry czasowe i amplitudowe sygnałów. (patrz: wstęp teoretyczny do ćw. 2)
9. Metody pomiarów parametrów sygnałów z wykorzystaniem oscyloskopu cyfrowego.
10. Sondy pomiarowe. (patrz: wstęp teoretyczny do ćw. 2)

10.7. Literatura

1. A. Chwaleba, M. Poniński, A. Siedlecki, *Metrologia elektryczna*, Wyd. 10, WNT, 2010.
2. A. Kamieniecki, *Współczesny oscyloskop. Budowa i pomiary*, BTC, 2009.
3. J. Rydzewski, *Pomiary oscyloskopowe*, WNT, 2007.