

WOJSKOWA AKADEMIA TECHNICZNA

im. Jarosława Dąbrowskiego



Badanie sygnałów elektrycznych za pomocą oscyloskopu cyfrowego

Ćwiczenia Laboratoryjne - Metrologia II



ppłk dr inż. Mariusz WAŻNY

Warszawa 2013

1. Cel ćwiczenia laboratoryjnego

Celem ćwiczenia jest zapoznanie studentów z budową i zasadą działania oscyloskopu cyfrowego oraz jego praktycznym zastosowaniem. W trakcie ćwiczenia studenci mają za zadanie wykonać:

- pomiar charakterystyk napięciowych i czasowych badanych sygnałów,
- obserwacja przebiegów w układach cyfrowych.

2. Wymagania wstępne

Przed ćwiczeniem laboratoryjnym studenci muszą zapoznać się z instrukcją laboratoryjną oraz znać zawarty w niej materiał. Realizacja ćwiczenia możliwa jest dopiero po wcześniej weryfikacji znajomości materiału dotyczącego zarówno budowy i zasady działania oscyloskopu cyfrowego jak i samego przebiegu ćwiczenia laboratoryjnego.

3. Oscyloskopy cyfrowe

Choć spotyka się jeszcze szeroką gamę oscyloskopów analogowych, to jednak przyszłość należy do oscyloskopów cyfrowych, a więc każdy powinien poznać ich działanie i właściwości. Ponadto sposoby i rozwiązania zastosowane w oscyloskopach cyfrowych mogą być z powodzeniem użyte do konstruowania użytecznych przystawek przekształcających jakkolwiek, nawet najtańszy, komputer w oscyloskop, czy jeszcze bardziej wszechstronny przyrząd pomiarowy zawierający dodatkowo multimetr, analizator stanów logicznych czy analizator widma.

3.1. Read Out

Jak wspomniano wcześniej, wprowadzenie nowoczesnej techniki cyfrowej do wnętrza oscyloskopu, ogromnie zwiększa jego możliwości. Przykładowo „w wolnych chwilach”, to znaczy pomiędzy kolejnymi przebiegami podstawy czasu, można coś narysować na ekranie. Już od dawna wykorzystuje się to do wprowadzenia na ekran znaków i napisów. Względnie proste jest samo wprowadzanie takich znaków. Podczas wspomnianych przerw oscyloskop przełączany na pracę w trybie X-Y-Z i ze współpracującego układu cyfrowego wysyłane są przebiegi powodujące narysowanie na ekranie cyfr i liter. W niektórych oscyloskopach na ekranie podane są w postaci cyfrowej wartości współczynników wzmocnienia i czasu, wybrane w torach Y i X. Należy tu jasno powiedzieć, że nadal chodzi o zwykłe oscyloskopy analogowe, a jedyną funkcją cyfrową, szczerze mówiąc mało użyteczną, jest wyświetlanie na ekranie informacji o rodzaju pracy i współczynnikach wybranych pokrętkami i przełącznikami.

Kolejnym krokiem w „cyfryzacji” oscyloskopu jest dodanie układu (częściowo analogowego, częściowo cyfrowego), który narysuje na ekranie znaczniki, zwane kursorami ułatwiające pomiary napięć i czasu. Kursory mogą mieć postać pionowych i poziomych linii, strzałek lub nawet rozjaśnionych kropek. Dwa takie kursory można za pomocą pokrętła przesuwając po ekranie, a wspomniany układ automatycznie obliczy i wyświetli na ekranie w postaci cyfrowej odległość między nimi w pionie i w poziomie, czyli różnicę napięć i czas. Taką funkcję kursorów i cyfrowy odczyt nazywa

się po angielsku Read Out. Jeszcze raz trzeba podkreślić, że jest to cyfrowy dodatek do klasycznych analogowych oscyloskopów.

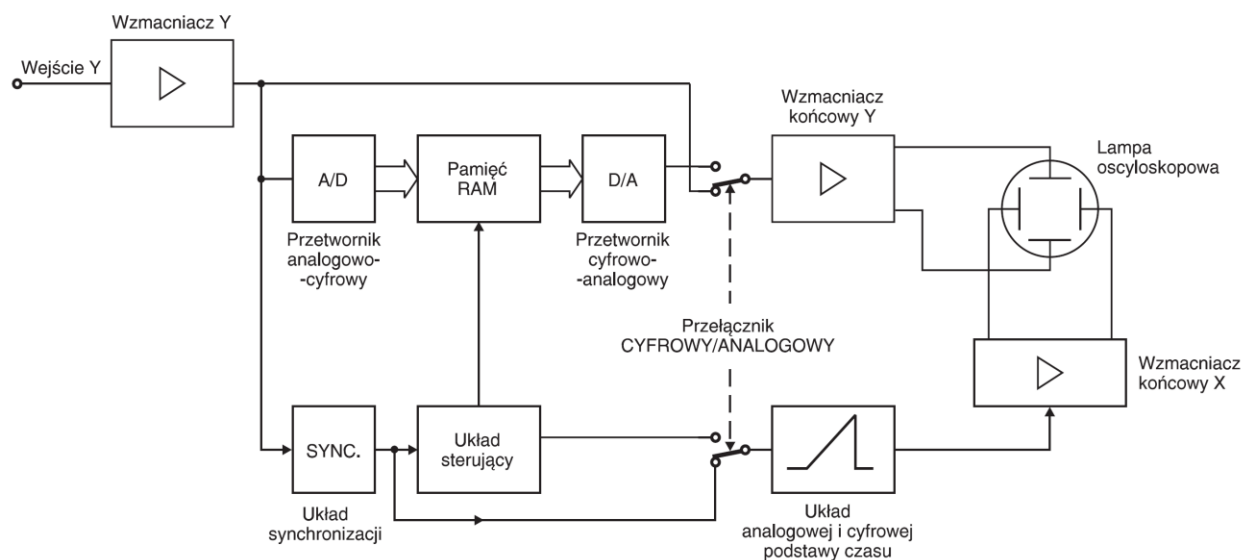
3.2. Oscyloskop analogowy z pamięcią cyfrową

Kolejnym krokiem we wprowadzaniu techniki cyfrowej do oscyloskopu było zastosowanie przetworników analogowo–cyfrowych, cyfrowo–analogowych i pamięci. Schemat blokowy oscyloskopu analogowo–cyfrowego pokazany jest na **rysunku 1**. Jest to schemat uproszczony do minimum, by pokazać zasadę działania. W rzeczywistości oscyloskop cyfrowy na pewno ma przynajmniej dwa kanały Y, a tor X jest znacznie rozbudowany.

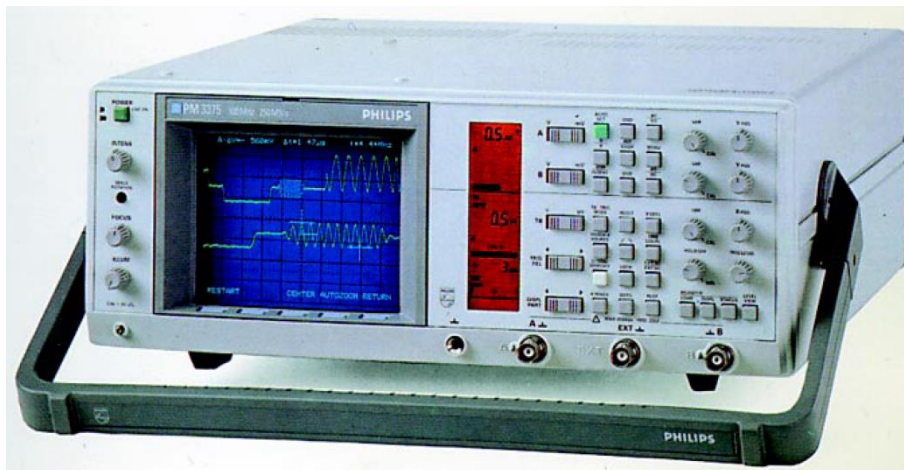
W pozycji przełącznika **ANALOGOWY** układ pracuje jak klasyczny oscyloskop. W pozycji przełącznika **CYFROWY** – układ ma dodatkowe możliwości. Przede wszystkim możliwe jest zapamiętanie przebiegu w pamięci półprzewodnikowej RAM.

Często pamięć pozwala zapamiętać kilka przebiegów. Jest oczywiste, że mogą to być także przebiegi jednorazowe, niepowtarzalne.

Choć wydawałoby się, że szczytem marzeń będzie oscyloskop całkowicie cyfrowy, gdzie przebieg badany byłby w każdym przypadku zamieniany na postać cyfrową (ułatwia to dokonanie od razu pomiarów amplitudy i czasu), jednak praktyka pokazuje, że oscyloskopy analogowe z pamięcią cyfrową cieszyły się i nawet teraz cieszą się dużym powodzeniem. Na poniższych fotografiach pokazano przykładowe analogowo-cyfrowe oscyloskopy.



Rys. 1. Schemat blokowy oscyloskopu analogowo-cyfrowego



Fot. 1. Przykładowy widok oscyloskopu analogowo-cyfrowego



Fot. 2. Przykładowy widok oscyloskopu analogowo-cyfrowego

3.3. Rozwój oscyloskopów cyfrowych

Jak wspomniano, wcześniej wydawało się, iż szczytem marzeń będzie oscyloskop całkowicie cyfrowy, w którym przebieg badany będzie zawsze zamieniany na postać cyfrową. Czas pokazał, że nie zawsze jest to pożądane, ale istotnie, zamiana przebiegu na postać cyfrową ma wiele niewątpliwych zalet. Przede wszystkim możliwe jest bezproblemowe dalsze przetwarzanie takiego sygnału. Na przykład sygnał cyfrowy może być przesłany do komputera, a potem wydrukowany na drukarce lub ploterze. To bardzo istotna sprawa – dawniej rejestracja przebiegów wymagała użycia aparatu fotograficznego, co oczywiście było kłopotliwe i kosztowne.

Drugą ogromną zaletą przetwarzania cyfrowego jest możliwość zapamiętywania nie tylko jednego przebiegu, ale wielu przebiegów w pamięci cyfrowej, czy to wbudowanej w oscyloskop, czy pamięci w dołączonym komputerze.

Nieocenioną zaletą jest także możliwość łatwego przetwarzania – określania napięć, czasów i częstotliwości, a także na przykład określania zawartości harmonicznego przebiegu (przy wykorzystaniu tak zwanej transformaty Fouriera).

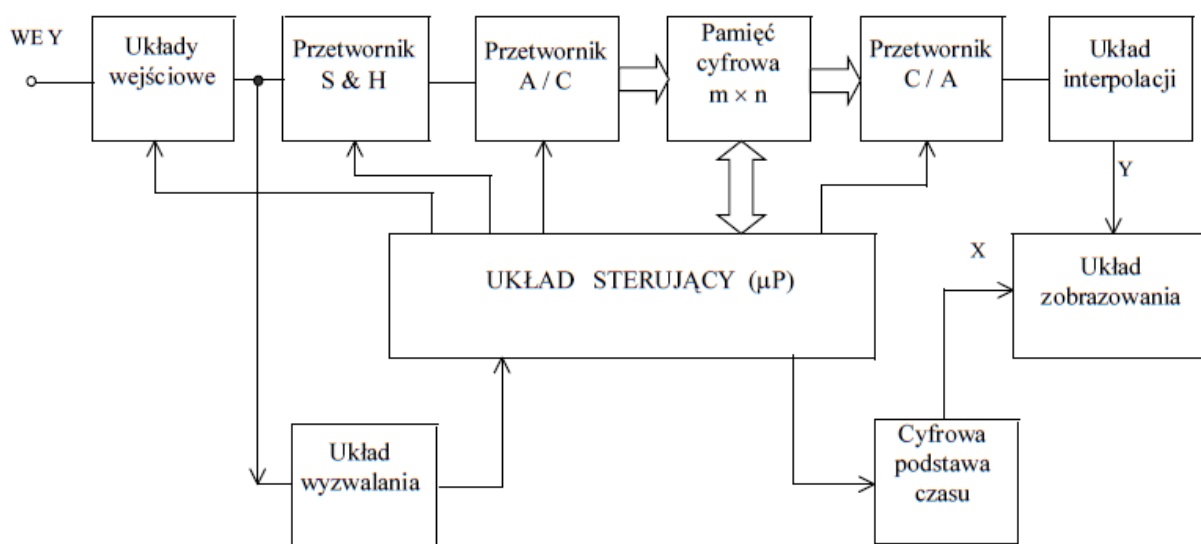
3.4. Oscyloskop cyfrowy

Oscyloskop cyfrowy jest to elektroniczny przyrząd pomiarowy służący do wizualnej obserwacji, pomiarów i rejestracji sygnałów napięciowych. Oscyloskop cyfrowy umożliwia również wykonywanie działań matematycznych na obserwowanych sygnałach (np. uśrednianie, sumowanie i odejmowanie sygnałów a także całkowanie, różniczkowanie, często obliczanie FFT).

Zasada działania oscyloskopu cyfrowego polega na przetworzeniu badanego sygnału napięciowego $u(t)$ na zbiór n -bitowych liczb, odpowiadających wartościom chwilowym napięcia, pobieranym w ściśle określonych momentach czasu. Zbiór ten jest zapamiętany w pamięci cyfrowej o pojemności $m \times n$ bitów. Następnie, za pomocą przetwornika C/A, zapisane w pamięci liczby są przetworzone na napięcie schodkowe $u(i \cdot \Delta t)$. Napięcie to aproksymuje napięcie badane $u(t)$.

Podstawowe parametry użytkowe oscyloskopu cyfrowego są takie same jak oscyloskopu analogowego.

Uproszczoną budowę oscyloskopu cyfrowego przedstawia schemat funkcjonalny pokazany na rys. 2. Pracę oscyloskopu można podzielić na dwa etapy: zbieranie informacji pomiarowej i odtworzenie badanego sygnału.



Rys. 2. Uproszczony schemat funkcjonalny oscyloskopu cyfrowego

Sygnał badany $u(t)$ po wzmocnieniu lub stłumieniu w układach wejściowych zostaje podany na przetwornik próbkująco-pamiętający (S&H). Na wyjściu przetwornika S&H otrzymywany jest sygnał schodkowy. Wartość napięcia i -tego schodka jest równa napięciu chwilowemu $u(t_i)$. Wartość ta utrzymuje się do przyścia następnego impulsu próbkującego. W tym czasie ($\Delta t = t_{i+1} - t_i$) przetwornik analogowo-cyfrowy (A/C) przetwarza napięcie $u(t_i)$ na sygnał cyfrowy wyrażony w odpowiednim kodzie. Sygnały cyfrowe z wyjścia przetwornika A/C zapisywane są jako kolejne n -bitowe słowa pamięci cyfrowej RAM. Każde słowo zawiera informację o wartości chwilowej napięcia badanego. W pamięci o pojemności m -słów zapisana jest informacja o m próbkach badanego sygnału. Po wypełnieniu wszystkich komórek pamięci są dwie możliwości dalszej pracy oscyloskopu.

- a) Sygnały pomiarowe z wyjścia przetwornika A/C są wpisywane w odpowiednie miejsca pamięci wymazując poprzednie wartości. Ten rodzaj pracy nazywany jest pracą aktywną (active trace – obraz aktywny) i stosowany jest przy obserwacji sygnałów powtarzalnych (np. okresowych).
- b) Wartości kolejnych próbek z wyjścia przetwornika A/C nie są wpisywane do pamięci. Informacje o badanym sygnale raz zapisane w pamięci są w niej zamrożone i mogą być przechowywane dowolnie długo (do wyłączenia zasilania). Ten rodzaj pracy nazywany jest pracą z zamrożeniem (stored trace) i stosowany jest przy badaniu sygnałów jednokrotnych.

3.5. Próbkowanie

Przy omawianiu oscyloskopów cyfrowych nie można zapominać, że ich podstawowym parametrem jest tak zwana szybkość próbkowania. Dobry oscyloskop powinien umożliwiać obserwację przebiegów o jak największych częstotliwościach, czyli bardzo szybkich. W klasycznym analogowym oscyloskopie z lampą elektronową ograniczeniem jest pasmo przenoszenia tłumików i wzmacniaczy w torze Y oraz sama lampa, która nie jest w stanie zobrazować bardzo szybkich przebiegów.

W oscyloskopach całkowicie cyfrowych sygnał ze wzmacniaczy czy tłumików wejściowych jest od razu podawany na przetwornik analogowo-cyfrowy, a potem zapamiętywany w pamięci półprzewodnikowej. Jeśli sygnał zostanie wpisany do pamięci, można go stamtąd odtworzyć w dowolnym czasie. To znaczy, że krótki impuls, który trwał przykładowo tylko ułamki mikrosekundy, można po zapisaniu w pamięci odtworzyć na ekranie w czasie powiedzmy kilku milisekund. Oznacza to, że lampa nie musi być już tak szybka, by zobrazować bardzo krótkie, szybkozmienne przebiegi. A trzeba wiedzieć, że wcale nie jest łatwo zbudować lampę o szerokim paśmie przenoszenia. Jeśli lampa nie musi być już taka szybka, to można zamiast niej zastosować nawet kolorowy kineskop telewizyjny. Są takie oscyloskopy z kolorowym ekranem – poszczególne przebiegi i napisy wyświetlane są w różnych kolorach ułatwiających ich rozróżnienie.

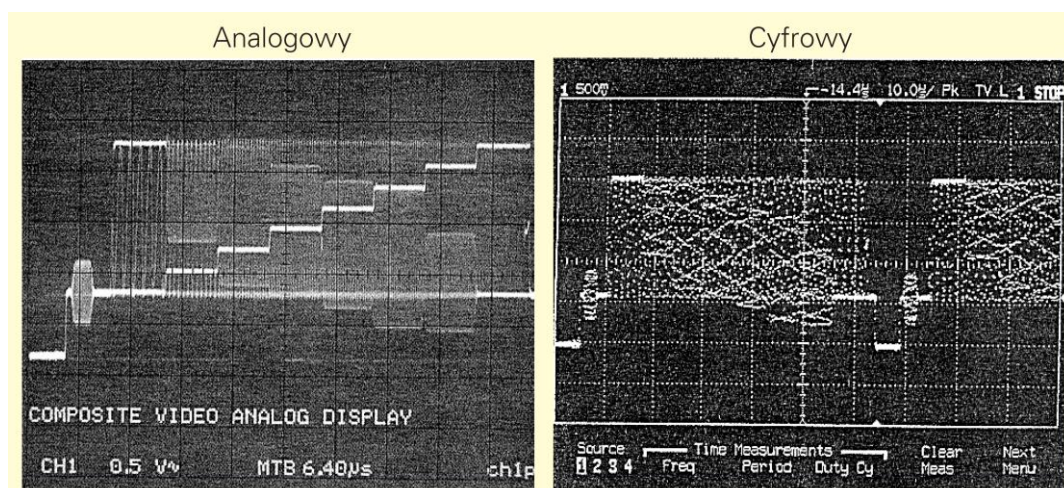
Producenci oscyloskopów poszli jeszcze dalej – zrezygnowali z lampy i zastosowali ekran z ciekłych kryształów (LCD).

W oscyloskopie cyfrowym ograniczeniem są nie tyle trudności z wykonaniem tłumików i wzmacniaczy o odpowiednim paśmie (wykonanie dobrego, szerokopasmowego tłumika wcale nie jest łatwiejsze, niż zbudowanie stosownego wzmacniacza), co parametry przetwornika analogowo-cyfrowego oraz właściwości układów wyzwalania. Problem ilustruje **rysunek 3**. Przebieg bez większych przeszkód (**3a**). Natomiast oscyloskop cyfrowy „ze swej natury” może wprowadzić pewne niejasności (**3b**). Jeszcze dobitniej pokazuje to **rysunek 4**. W oscyloskopie cyfrowym próbkowanie i przetwarzanie, czyli zamiana wartości napięcia na liczbę następuje tylko w ściśle określonych chwilach, zaznaczonych na **rysunku 4a** strzałkami. Do pamięci zapisywane są wartości napięcia, występujące tylko w tych wybranych momentach (**rysunek 4b**).

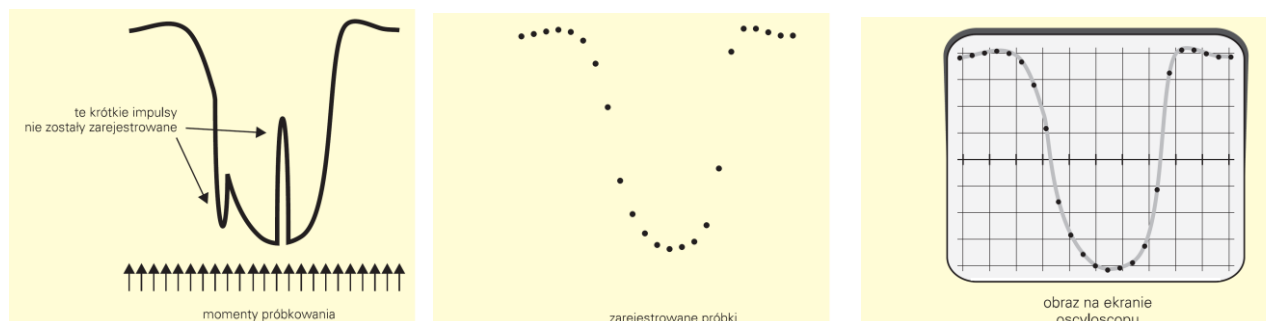
Co się stanie, jeśli w czasie pomiędzy kolejnymi próbkowaniami, w sygnale pojawią się zmiany (zaznaczone na rysunku strzałką)? Zmiany te „umkną uwadze oscyloskopu”, po prostu zostaną zignorowane i nie pojawią się na ekranie – zobacz **rysunek 4c**. W oscyloskopach cyfrowych obraz zwykle nie składa się z oddzielnych kropek (choć można też wybrać taki tryb wskazań), ponieważ wbudowany mikroprocesor łączy punkty odcinkami i linia na ekranie jest ciągła. Ktoś powie, że nie

ma problemu z takimi krótkimi impulsami – wystarczy zwiększyć częstotliwość próbkowania, a pojawią się one na ekranie. Jest to częściowo prawda, ale po pierwsze nie zawsze można zwiększać częstotliwości próbkowania (choćby ze względu na ograniczone możliwości przetwornika A/C), a ponadto w niektórych sytuacjach, na przykład przy obserwacji przebiegu zmodulowanego amplitudowo, nie ma to sensu.

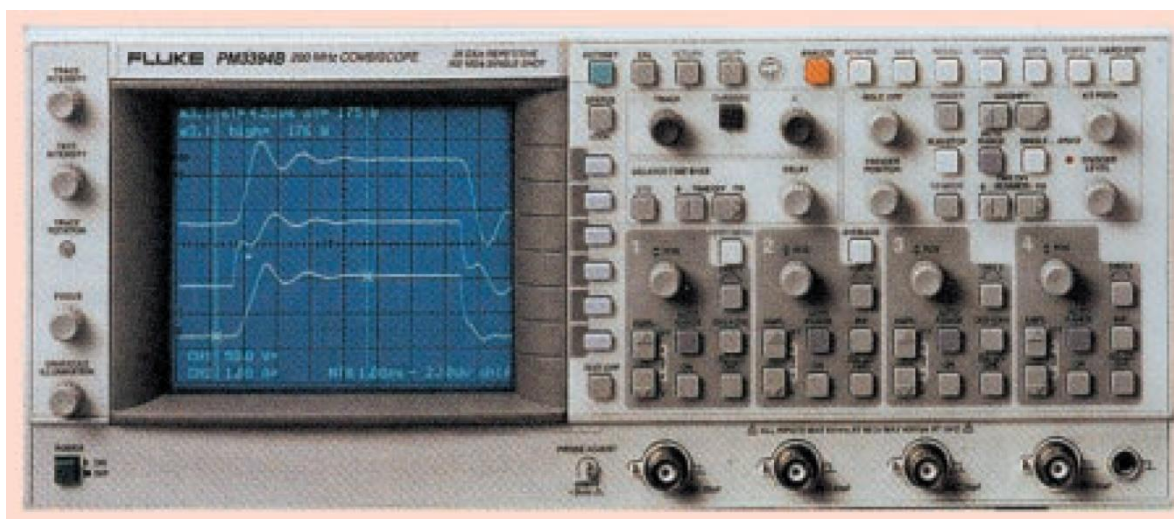
Taka ziarnista struktura sygnału zapamiętywanego w pamięci każdego oscyloskopu cyfrowego może więc wręcz wprowadzić błędy przy zobrazowaniu wyników. Aby uniknąć błędów tego typu, oscyloskopy cyfrowe wyposaża się w specjalne układy detekcji i wyzwalania. W opisach technicznych można potem spotkać określenia wskazujące, jakie impulsy są wykrywane przez te układy detekcji – zwykle rzędu kilku... kilkunastu nanosekund. Oscyloskopy cyfrowe zwykle mają też kilka rodzajów pracy, na przykład tak zwana praca z obwiednią (envelope), czy też zobrazowania wartości maksymalnych czy minimalnych występujących pomiędzy kolejnymi próbkowaniami. Ze względu na wspomniane trudności, niektóre firmy nie rezygnują z budowy oscyloskopów, które w zależności od potrzeb mogą pracować albo w trybie analogowym, albo cyfrowym. Przykładem jest nowoczesny oscyloskop COMBISCOPE PM3394B Firmy Fluke o paśmie przenoszenia 200MHz i częstotliwości próbkowania 20GS/s (przebiegi powtarzalne) i 200MS/s (przebiegi jednorazowe), pokazany na **fotografii 3**.



Rys. 3. Obrazy sygnału wideo na dwóch oscyloskopach



Rys. 4. „Nie zauważone” przebiegi w oscyloskopie cyfrowym



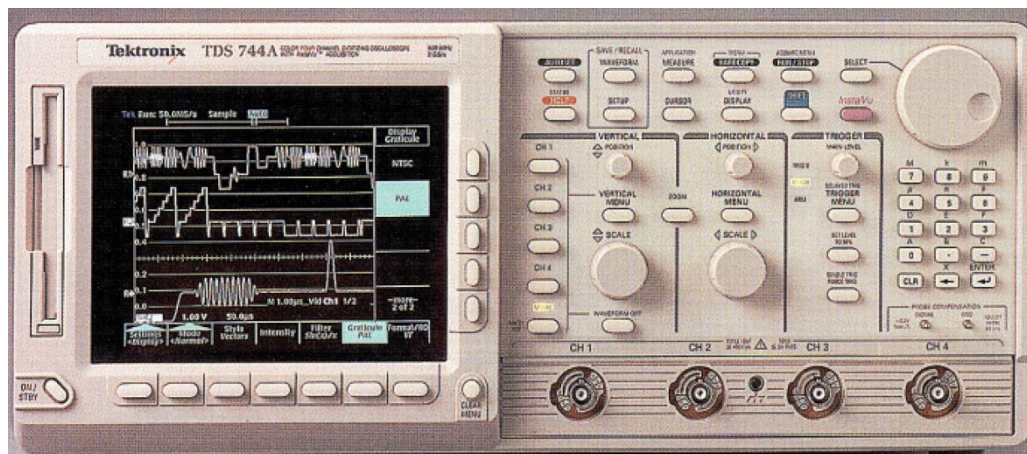
Fot. 3

Przy zakupie oscyloskopów analogowo–cyfrowych (a także wyłącznie cyfrowych) należy zwrócić baczną uwagę na kwestię pasma przenoszenia i maksymalnej częstotliwości próbkowania.

Wiele oscyloskopów analogowo–cyfrowych, szczególnie tych nieco starszych, ma określone, dość szerokie pasmo przenoszenia w trybie analogowym i znacznie węższe pasmo przenoszenia w trybie cyfrowym – jeszcze przed kilku laty dużym problemem było zbudowanie szybkiego przetwornika A/C.

Dzisiaj można znaleźć w postaci pojedynczych układów scalonych ośmiobitowe przetworniki typu flash o szybkości przetwarzania setek milionów próbek na sekundę. Jednak do danych podawanych w materiałach reklamowych oscyloskopów trzeba podchodzić bardzo ostrożnie. Przykładowo, w ulotce reklamowej jakiegoś niedrogiego oscyloskopu podano, że ma on maksymalną częstotliwość próbkowania równą 1GS/s (1 miliarda próbek na sekundę). Z częstotliwości próbkowania 1GS/s na pierwszy rzut oka mogłoby wynikać, że oscyloskop ma pasmo przenoszenia sięgające setek megaherców. Przy bliższym zapoznaniu się z instrukcją wyjdzie na jaw, że pasmo wynosi powiedzmy... 20MHz. Podano tu częstotliwość próbkowania przebiegów powtarzalnych, uzyskiwana przy pomocy pewnej, powiedzmy – prostej sztuczki. W istocie, przy bliższym przestudiowaniu katalogu okaże się, iż rzeczywista częstotliwość próbkowania przetwornika, istotna w przypadku rejestrowania przebiegu jednorazowego wynosi tylko 20MS/s (20 milionów próbek na sekundę). W przypadku obrazu na ekranie oscyloskopu, potrzeba przynajmniej dziesięciu próbek na jeden okres przebiegu rejestrowanego, aby z obrazu można było cokolwiek wywnioskować. W efekcie „cudowny” oscyloskop cyfrowy będzie w stanie zarejestrować przebiegi jednorazowe o częstotliwościach nie większych niż 1...2MHz. Oczywiście w przypadku przebiegów powtarzalnych pasmo sięgające będzie podanej w katalogu wartości 20MHz.

Obok wspomnianego PM3394B można tu podać jako przykład oscyloskop TDS744 z firmy Tektronix o paśmie 500MHz i szybkości próbkowania przebiegów jednorazowych (!) równym 2GS/s, co daje rozdzielczość kolejnych próbek rzędu 100 pikosekund! Pokazano go na **fotografii 4**. Takie wyrafinowane, szybkie i oczywiście bardzo drogie oscyloskopy cyfrowe rzeczywiście nie ustępują najlepszym oscyloskopom analogowym a przewyższają je pod wieloma względami. Należy jednak podkreślić, że do praktycznych zastosowań bardzo rzadko potrzebne są tak wspaniałe parametry.



Fot. 4.

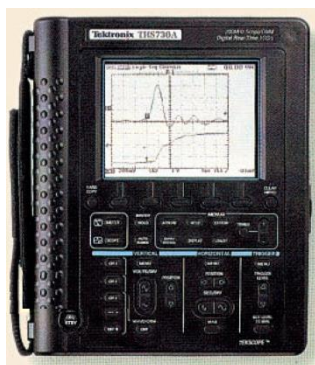
3.6. Oscyloskopy przenośne

Jak wspomniano, zastosowanie pamięci półprzewodnikowej (i mikroprocesora) umożliwiło rezygnację z lampy elektronowej i wykorzystanie ekranów ciekłokrystalicznych (LCD). Ekran taki zawiera matrycę punktów – poszczególne punkty mogą być jasne lub ciemne, można na nim wyświetlać zarówno litery i cyfry, jak również prostą grafikę. Ogólnie biorąc, ekran taki jest stosunkowo powolny i zupełnie nie nadawałby się do współpracy z bardzo szybkimi przebiegami.

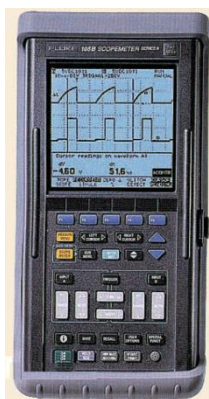
Dzięki zastosowaniu pamięci cyfrowej, możliwe stało się „zamrożenie” w niej nawet bardzo szybkich przebiegów i późniejsze stosunkowo powolne wyprowadzenie ich na „leniwy” ekran LCD. Taka możliwość otworzyła drogę do skonstruowania poręcznych, przenośnych oscyloskopów zasilanych z baterii. Co prawda, od dawna produkowano klasyczne oscyloskopy mające możliwość zasilania bateryjnego, ale oczywiście ze względu na gabaryty lampy nie były to przyrządy poręczne. Na **fotografiach 5÷7** można zobaczyć trzy oscyloskopy firm Tektronix i Fluke z ekranem ciekłokrystalicznym.

Dwa pierwsze są typowymi przyrządami przenośnymi. Oprócz funkcji dwukanałowego oscyloskopu pełnią funkcję wielofunkcyjnego multimetru oraz rejestratora. Są to naprawdę uniwersalne urządzenia pomiarowe – umożliwiają obserwację kształtu przebiegów, pomiary napięcia, prądu, częstotliwości, czasu impulsów, temperatury a także długoczasową rejestrację (do kilkudziesięciu godzin) wybranych wielkości.

W przypadku trzeciego, niewątpliwie stacjonarnego oscyloskopu laboratoryjnego warto zwrócić uwagę na małą głębokość obudowy. Przyrządy pokazane na fotografiach pochodzą z firm, cieszących się od lat ustaloną renomą.



Fot. 5.



Fot. 6.



Fot. 7.

3.7. Przystawki oscyloskopowe

Wszystkie współczesne oscyloskopy cyfrowe, nawet te przenośne, mają możliwość współpracy z komputerem. Niektóre mogą wprost obsługiwać drukarkę. Przesłanie danych do komputera umożliwia ich dalszą obróbkę – do przedstawianych oscyloskopów producenci proponują odpowiednie programy umożliwiające dalsze przetwarzanie wyników, na przykład określanie zawartości spektralnej (widmowej) przebiegu, czy zawartości harmonicznych.

W przypadku współpracy z komputerem, ekran oscyloskopu okazuje się zupełnie niepotrzebny, bo wszystkie przebiegi można wyświetlić na ekranie komputera. I tu rysuje się jeszcze inny kierunek rozwoju oscyloskopu. Coraz częściej spotyka się w literaturze reklamy przystawek oscyloskopowych do komputera. Trzeba stwierdzić, że wiele z nich zawiera tylko przetwornik A/C, a więc niewiele mają one do czynienia z oscyloskopem. Dobra przystawka oscyloskopowa musi mieć obwody tłumików i wzmacniaczy wejściowych oraz obwody wyzwalania, a także możliwość sterowania nimi od strony komputera. Bez takich obwodów przystawka taka będzie pełnił jedynie rolę zabawki.

3.8. Pomiary

Każdy kto dokonuje pomiarów jakimkolwiek przyrządem powinien sobie zadać dwa podstawowe pytania:

1. Czy dołączenie przyrządu pomiarowego nie wpływa na pracę i parametry badanego układu?
2. Czy przyrząd dokładnie pokazuje mierzone wielkości, czy może „po drodze” do sygnału badanego przenikają zakłócenia, fałszujące wynik.

Pytania te są jak najbardziej na miejscu w przypadku pomiarów dokonywanych przy użyciu oscyloskopu.

Początkujący użytkownik oscyloskopu zwykle bagatelizuje sprawę wpływu dołączenia oscyloskopu na pracę badanego układu. Wie przecież, że rezystancja wejściowa każdego oscyloskopu wynosi aż 1 MΩ. 1 megaom to rzeczywiście bardzo duża rezystancja, a więc wpływ jej dołączenia powinien być znikomy, prawie niezauważalny. Przecież rezystancje, z jakimi zwykle mamy do czynienia w układach są rzędu omów, ewentualnie kiloomów...

To wszystko prawda, ale tylko w odniesieniu do prądu stałego i małych częstotliwości, nie większych niż kilkadziesiąt kiloherców. Przy większych częstotliwościach oscyloskop ma oporność znacznie mniejszą niż $1M\Omega$! Dlaczego?

Po pierwsze nie wolno zapominać o pojemności wejściowej samego oscyloskopu. Wynosi ona 20...50pF w tanich oscyloskopach, i 6...30pF w dobrych oscyloskopach profesjonalnych.

Po drugie trzeba pamiętać, że do tego dochodzi jeszcze pojemność kabla pomiarowego. Przewód ekranowany (lub koncentryczny) o długości 1m może mieć pojemność dochodzącą do 100pF. Wraz z pojemnością wejściową oscyloskopu daje to, powiedzmy, 140pF. Dołączając kabel oscyloskopu do jakiegoś punktu, dołączamy więc między ten punkt a masę pojemność 140pF.

Czy to może coś zmienić w układzie? Obliczmy, jaką oporność (reaktancję) będzie mieć taka pojemność przy częstotliwości powiedzmy 15MHz:

$$X_c = \frac{1}{2\pi f C}$$

podstawiamy:

$$X_c = \frac{1}{2 * 3,14 * 15MHz * 140pF} = 75,8\Omega$$

Tylko 75 omów?!

I jak to się ma do rezystancji wejściowej $1M\Omega$, podanej w danych katalogowych? Wyobraźmy sobie jeszcze, co się stanie, gdy oscyloskopem z takim kablem spróbujemy zmierzyć przebiegi w obwodzie rezonansowym generatora LC o częstotliwości, powiedzmy, 15MHz. Tam pojemności w układzie są rzędu kilkadziesiąt pikofaradów. Najprawdopodobniej po dołączeniu oscyloskopu generator przestanie pracować. Natkniemy się na paradoksalną sytuację – oscyloskop pokaże, że generator nie pracuje, jednak po odłączeniu oscyloskopu układ, którego częścią jest ten generator, może dawać „oznaki życia”.

Nieświadomy użytkownik dołączy oscyloskop na stałe i będzie próbował ustalić, który element jest przyczyną milczenia generatora. Wymieni wszystkie elementy i zniechęci się zupełnie. Nabierze przekonania, że to schemat jest zły, a winę za niepowodzenie ponosi konstruktor układu, czy autor książki, z której pochodzi schemat. Być może generator jednak zadziała. Wtedy jednak pojemność oscyloskopu i kabla niewątpliwie zmieni częstotliwość drgań (w stopniu zależnym od tego, w którym punkcie układu został dołączony oscyloskop). Próba nastrojenia takiego generatora przy użyciu oscyloskopu nie da więc zadowalającego rezultatu.

To jest bardzo jaskrawy i skrajny przykład. Ma on pokazać, że bezkrytyczne podejście do pomiarów może dać błędne wyniki, dlatego też trzeba mieć świadomość, że dołączenie przyrządu pomiarowego zawsze coś zmienia w badanym układzie.

Przykład z generatorem w.cz. może niektórych wręcz przeraził. Oporność wejściowa równa 75Ω , zamiast spodziewanej 1000000Ω to rzeczywiście spora niespodzianka. Ale, żeby nie demonizować, policzmy oporność (reaktancję) naszego oscyloskopu ze wspomnianym kablem, dla częstotliwości 20kHz, czyli dla górnej częstotliwości pasma akustycznego.

$$X_c = \frac{1}{2 * 3,14 * 20kHz * 140pF} = 56,84k\Omega$$

To wprawdzie też nie jest zachwycający wynik, ale oporność 56 kiloomów nie stanowi już takiego zagrożenia dla układu małej częstotliwości. Z pewnością możemy mierzyć przy użyciu zwykłego kabla przebiegi na wyjściach wzmacniacza czy nawet przedwzmacniacza. Ale niewątpliwie należy zachować ostrożność przy dołączaniu oscyloskopu do obwodów małej częstotliwości, gdzie występują rezystancje o porównywalnej lub większej wartości.

Z tego widać, że nawet w układach m.cz. należy uwzględnić obciążenie wnoszone przez oscyloskop. Czy jest jakieś wyjście i możliwość poprawy sytuacji? Jest, i to nie jedno!

Przy dotychczasowych obliczeniach przyjęliśmy skrajnie niekorzystne warunki. Nawet gdy oscyloskop ma pojemność wejściową równą 40pF, możemy zastosować krótki kabel (10...20cm) i wypadkowa pojemność nie przekroczy 60pF. Da to ponad dwukrotne zwiększenie szkodliwej oporności (impedancji) obciążenia, czyli znaczne zmniejszenie wpływu dołączenia oscyloskopu. Rozważaniami dotyczącymi rodzaju stosowanego kabla zajmiemy się później.

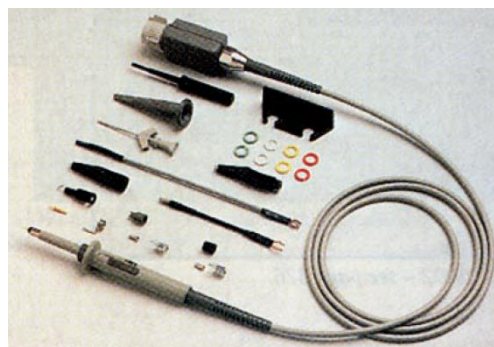
Z tego, co zostało powiedziane, wynika wniosek, że w większości układów małej częstotliwości można przeprowadzać pomiary oscyloskopowe przy użyciu możliwie krótkiego kabla pomiarowego. Czy jednak można jeszcze bardziej zmniejszyć wpływ szkodliwego obciążenia wprowadzanego przez oscyloskop? Przecież barierą jest tu pojemność samego oscyloskopu – nawet z króciutkim kablem nie uda się jej zmniejszyć poniżej 40pF... Czy oby na pewno?

Istnieją proste sposoby zmniejszenia pojemności, poniżej pojemności samego oscyloskopu! Wystarczy zastosować sondę tłumiącą sygnał.

Fotografie 8 i 9 pokazują różne sondy. Najpopularniejsze są sondy bierne RC, tłumiące sygnał 10–krotnie. Często takie sondy stanowią standardowe wyposażenie oscyloskopu. W opisie takiej sondy zawsze występuje określenie 1:10. Nieświadomi użytkownicy mogą sądzić, że takie sondy buduje się jedynie po to, by móc mierzyć większe napięcia. To prawda, że sondy 1:10 umożliwiają pomiar wyższych napięć, nawet do kilkuset voltów. Buduje się także sondy o współczynnikach tłumienia 1:100 i 1:1000, które umożliwiają pomiar przebiegów o amplitudach rzędu kilowoltów. Ale sondy tłumiące sygnał stosuje się przede wszystkim ze względu na zmniejszenie pojemności obciążającej układ. Podstawowy schemat sondy pokazany jest na **rysunku 5**. Teoretycznie potrzebne są tylko rezystory dzielnika, jednak wskutek istnienia różnych szkodliwych pojemności montażowych, do wyrównania charakterystyki częstotliwościowej niezbędne są niestety kondensatory. Niestety, bo kondensatory te obniżają oporność wejściową sondy przy większych częstotliwościach. Nie wchodząc w szczegóły podany zostanie tylko jeden prosty wzór. Jeśli $R1C1=R2C2$ to dzielnik jest skompensowany częstotliwościowo, czyli jednakowo tłumি sygnały w szerokim paśmie częstotliwości. Ponieważ rezystancja $R1$ jest dziewięciokrotnie większa niż $R2$, więc pojemność $C1$ będzie dziewięciokrotnie mniejsza niż $C2$! To oznacza, że w idealnym przypadku za pomocą sondy 1:10 moglibyśmy zmniejszyć pojemność wejściową dziesięciokrotnie, a z pomocą sondy 1:100 – aż stukrotnie! W praktyce nie udaje się co prawda zmniejszyć pojemności aż tyle razy, jednak efekt jest godny uwagi.

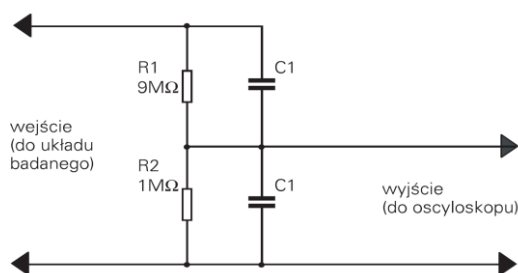


Fot. 8. Widok sondy 1:10



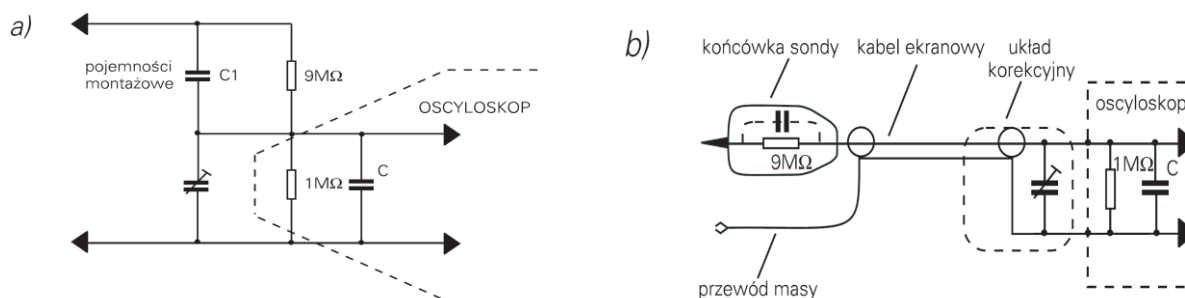
Fot. 9. Przełączana sonda 1:1/1:10

Budowa typowej biernej sondy oscyloskopowej jest nieco odmienna od postaci, pokazanej na rysunku 5. Rzecz w tym, że sam oscyloskop ma rezystancję $1M\Omega$ i jakąś pojemność – stają się one częścią dzielnika napięcia. Typowy schemat sondy 1:10 współpracującej z oscyloskopem pokazany jest na rysunku 6a i 6b. Jak widać, sonda zawiera w zasadzie tylko rezystor i trymer (kondensator zmienny), a pojemność C1 jest zwykle pojemnością montażową rezystora i obudowy.



Rys. 5. Sonda bierna RC 1:10

Trymer jest potrzebny, by prawidłowo skompensować sondę dołączoną do różnych oscyloskopów, różniących się wartością pojemności wejściowej. Przy bliższym przeanalizowaniu rysunku 6 okazuje się, że aby sonda była prawidłowo skompensowana dla różnych pozycji przełącznika czułości toru Y w oscyloskopie, pojemność wejściowa oscyloskopu musi być jednakowa we wszystkich położeniach przełącznika czułości.



Rys. 6. Praktyczny układ sondy 1:10

Ściśle biorąc, przy zakupie drogich sond dobrych firm należy zwrócić uwagę, dla jakich pojemności wejściowych oscyloskopu sonda może być skompensowana. Przykładowo sondy Hewlett Packard 1:10 mogą pracować z oscyloskopami o pojemności (tylko) 6...22pF, bo przeznaczone są do

oscyloskopów tejże firmy, mających tak małą pojemność wejściową. Oczywiście przy małej pojemności oscyloskopu uzyskuje się także małą pojemność wejściową sondy, wynoszącą kilka pikofaradów.

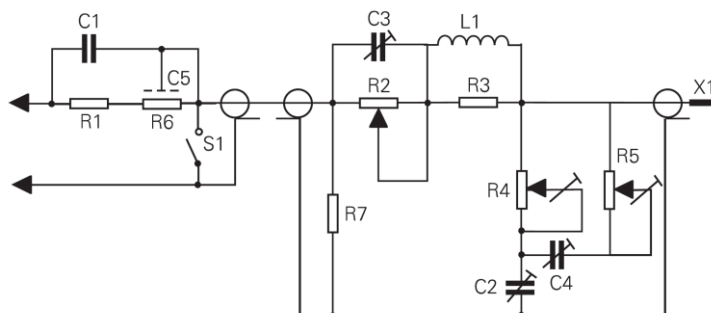
Typowe sondy 1:10, jakie można powszechnie kupić na rynku, nadają się do oscyloskopów o większych pojemnościach (do 40...50pF), jednak uzyskana wartość pojemności wejściowej sondy wynosi nie kilka, ale od kilkunastu do 20 pikofaradów. Stosując typową sondę 1:10 można więc zmniejszyć pojemność obciążającą badany układ 2...3-krotnie. Natomiast zastosowanie sondy 1:100 dobrej firmy pozwoli zmniejszyć szkodliwą pojemność obciążającą układ badany do 2...3pF, czyli nawet ponad dziesięciokrotnie.

Dość popularne ostatnio są sondy z przełącznikiem o tłumieniu 1:1 i 1:10. Jest to pożyteczne rozwiązanie, ale zgodnie z podanymi właśnie informacjami, w miarę możliwości należy stale pracować przy tłumieniu 1:10, bo sonda ma wtedy rezystancję (dla prądu stałego) równą $10M\Omega$ i pojemność nie większą niż 20pF. Natomiast w pozycji 1:1 zwierany jest po prostu rezystor ($9M\Omega$), a pojemność wejściowa sondy wzrasta wtedy do 130...160pF! A więc sondę w pozycji 1:1 należy stosować tylko w razie konieczności badania małych sygnałów, o amplitudach rzędu pojedynczych miliwoltów, w punktach układu, gdzie oporność wewnętrzna jest niewielka.

Budowa dobrej sondy 1:10 lub 1:100, przenoszącej równomiernie sygnały o częstotliwościach do setek megaherców wcale nie jest łatwa. Dlatego w opisie takich sond zwykle znajduje się informacja, przy jakich największych częstotliwościach może pracować dana sonda bez obawy wprowadzenia znacznego błędu. Na **rysunku 7** można znaleźć schemat wewnętrzny sondy 1:100 pokazanej na **fotografii 10**. Oczywiście nie można skopiować takiej sondy w warunkach domowych, stosując jakiegokolwiek elementy – nie tylko podzespoły muszą mieć ściśle określone parametry, ale i szczegóły konstrukcji mechanicznej mają tu duże znaczenie. W każdym razie sonda PM8932 o schemacie z **rysunku 7** może pracować przy napięciach do 5,6kV, a jej pasmo przenoszenia sięga kilkuset MHz.



Fot. 10. Sonda 1:100



Rys. 7. Schemat ideowy sondy biernej 1:100

Przedstawiony materiał ma przekonać każdego użytkownika oscyloskopu, jak ważna jest, bardzo często lekceważona sprawa „kabelków”. Niewłaściwy „kabelek” może nie tylko zaburzyć lub uniemożliwić pracę badanego układu, ale też uniemożliwić wykorzystanie w pełni pasma przenoszenia używanego oscyloskopu.

Każda sonda bierna 1:10, 1:100 i 1:1000 musi być przed pomiarem skalibrowana częstotliwościowo. Korzystając ze źródła sygnału prostokątnego (1kHz) należy pokręcając wbudowanym w sondę pokrętkiem, ustawić na oscyloskopie obraz jak najbardziej zbliżony do prostokątnego.

3.9. Zakłócenia i błędy

Należy jeszcze wspomnieć, że w pewnych sytuacjach nie stosuje się ani żadnych fabrycznych sond, ani „samoróbki” z przewodu ekranowanego, tylko łączy się badany układ z gniazdem wejściowym oscyloskopu za pomocą dwóch krótkich (do 10cm) jednożyłowych przewodów; jedna żyła to masa, druga – sygnał. Jeśli przewody nie są ze sobą skręcone, pojemność takiej „sondy” jest praktycznie żadna, poniżej 1pF, i badany układ obciążony jest tylko pojemnością i rezystancją wejściową oscyloskopu.

Takie dwa przewody mogą jednak działać jak antena i zbierać z otoczenia różne „śmieci”, w tym zakłócenia. Dlatego metoda z gołymi krótkimi przewodami może być stosowana przy sygnałach o większej amplitudzie. Przy badaniu małych sygnałów w obecności silnych zakłóceń, zapewne konieczny będzie przewód ekranowany lub koncentryczny. I tu warto zwrócić uwagę na kilka istotnych spraw.

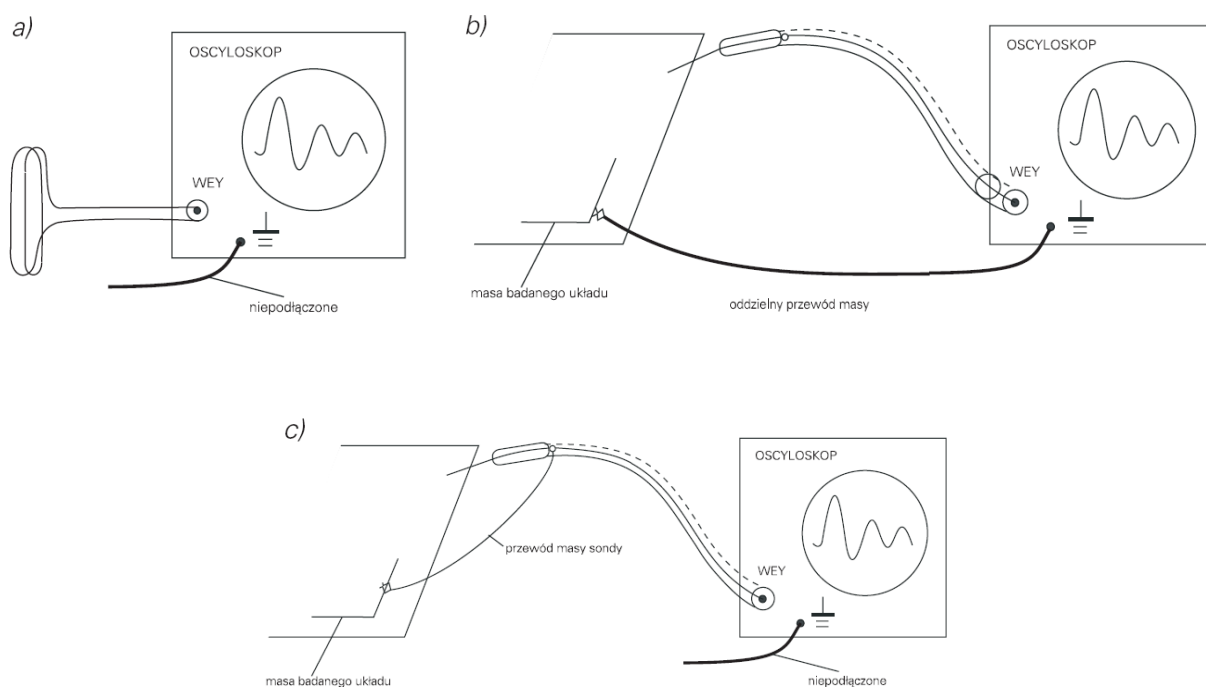
Wśród użytkowników przyrządów pomiarowych panuje powszechne przekonanie, że przewód ekranowany całkowicie likwiduje wszelkie problemy z przenikaniem, czy „zbieraniem” zakłóceń z otoczenia. Jest w tym sporo prawdy, ale jak zwykle nie jest to prawda ostateczna. Rzeczywiście, ekranowany przewód, którego ekran jest podłączony do masy układu, nie dopuszcza do środkowej żyły zakłóceń przedostających się przez pole elektrostatyczne i elektromagnetyczne. Ale należy tu jeszcze wziąć pod uwagę wpływ pola magnetycznego. Jak podają mądre książki, żeby wyeliminować wpływ pola magnetycznego, należy zastosować ekran, a właściwie pancierz, stalowy o grubości powyżej 10mm lub miedziany jeszcze grubszy...

W praktyce wcale nie jest to potrzebne, trzeba tylko rozumieć pewną ważną sprawę. O ile pod wpływem pola elektrycznego, zakłócenie może się zaindukować w jednym przewodzie, o tyle pole

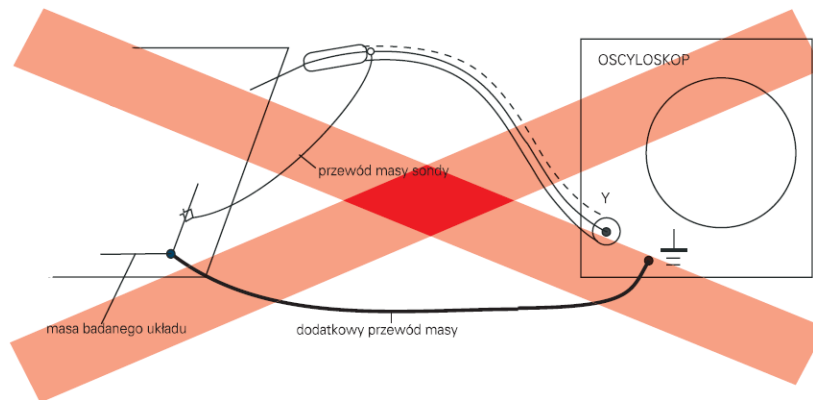
magnetyczne może zaindukować napięcie i prąd tylko w pętli czyli w zwoju lub zwojach. Pętla lub wielozwojowa cewka podłączona do wejścia oscyloskopu może więc pełnić rolę czujnika pola magnetycznego.

Na **rysunku 8** pokazano trzy sytuacje. **Rysunek 8a** pokazuje jak zrobić pętlę do pomiaru pól magnetycznych. Tymczasem wielu użytkowników stosując fabryczną sondę lub przewód ekranowany, nie podłącza do badanego układu masy sondy, tylko dla wygody, do połączenia masy oscyloskopu i układu stosuje oddzielny przewód, jak pokazano na **rysunku 8b**. Tworzą tym samym większą lub mniejszą pętlę, która zbiera z otoczenia zakłócenia przenoszone przez pole magnetyczne. Należy tu podkreślić, że zakłócenia te nie są duże, i problem pojawia się tylko przy pomiarach małych napięć, rzędu miliwoltów. Przy dużych sygnałach można stosować sposób z **rysunku 8b**, bo rzeczywiście jest wygodny.

Natomiast przy małych sygnałach należy minimalizować powierzchnię pętli tworzonej przez przewód masy, jak pokazano to na **rysunku 8c**. Sprawa połączenia masy ma też bardzo duże znaczenie przy obserwacji krótkich impulsów. Przy niewłaściwym połączeniu, np. wg **rysunku 8b**, obraz zbczy impulsów będzie zniekształcony i może wprowadzić w błąd obserwatora. Będzie on potem szukał w układzie przyczyny zniekształceń impulsów, gdy tymczasem impulsy w układzie będą prawidłowe, natomiast przyczyną zniekształceń obrazu w oscyloskopie będzie właśnie niepoprawne prowadzenie obwodu masy. Błędne jest także dwukrotne połączenie obwodu masy, tak „na wszelki wypadek”. Dlatego **rysunek 9** jest przekreślony. W takiej sytuacji ekran kabla i dodatkowy przewód tworzą pętlę. W pętli tej indukuje się prąd, być może o znacznej wartości, który na rezystancji ekranu kabla może wywołać zauważalny spadek napięcia.



Rys. 8. Szkodliwa pętla w pomiarach oscyloskopowych



Rys. 9. Błędne prowadzenie „podwójnej” masy

Przy okazji omawiania zakłóceń warto jeszcze wspomnieć o kolejnej możliwości utworzenia pętli masy. Większość oscyloskopów ma wtyczkę „z uziemieniem”. Bolec uziemiający jest połączony z obudową oscyloskopu, czyli masą. Jeśli używany zasilacz ma takie same połączenie obwodu „uziemienia”, wtedy połączenie przewodami masy zasilacza, masy układu i masy oscyloskopu zamknie takową pętlę. Na problemy z taką pętlą masy można się natknąć bardzo często i nie ma jednoznacznej reguły, jak wtedy postąpić. W każdym razie generalnie należy unikać pętli masy i stosować sposób z **rysunku 8c**.

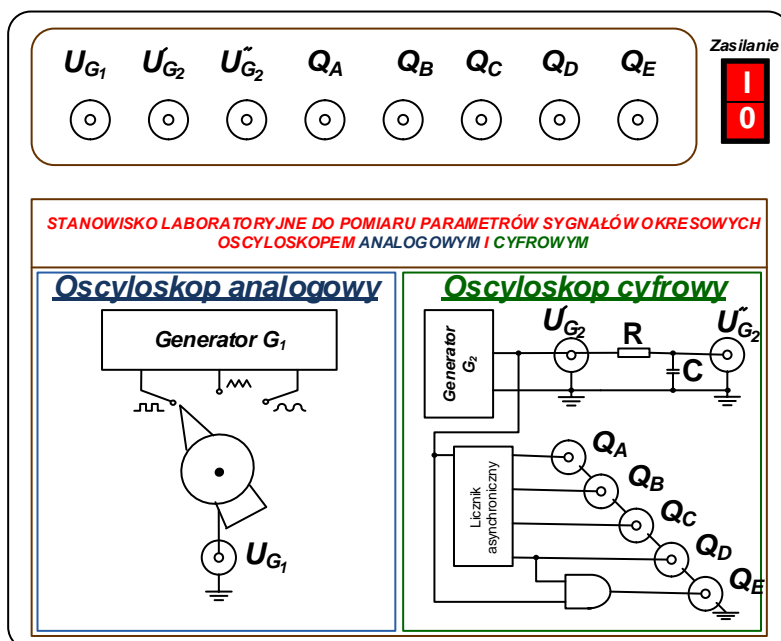
UWAGA!!!

Powyższy materiał opracowano na podstawie materiałów zawartych w czasopiśmie „Elektronika dla Wszystkich”.

4. Opis stanowiska laboratoryjnego

Stanowisko laboratoryjne zbudowane jest do realizacji pomiarów zarówno przy pomocy oscyloskopu analogowego jak i cyfrowego. W niniejszym ćwiczeniu laboratoryjnym wykorzystujemy tylko te gniazda pomiarowe które związane są z prawą jego częścią, przeznaczoną do pomiarów przy pomocy oscyloskopu cyfrowego.

Stanowisko laboratoryjne wyposażone jest w generator przebiegów okresowych których parametry kształtowane są poprzez dołączaną do jego obudowy skrzynkę kodującą. Umożliwia ona zmianę parametrów generowanych przebiegów co pozwala na ustawienie każdej grupie szkoleniowej innych nastaw generatora.



Rys. 10. Widok płyty czołowej stanowiska laboratoryjnego do badania sygnałów elektrycznych za pomocą oscyloskopu cyfrowego

5. Przebieg ćwiczenia laboratoryjnego

5.1. Pomiary parametrów impulsów w przebiegu okresowym

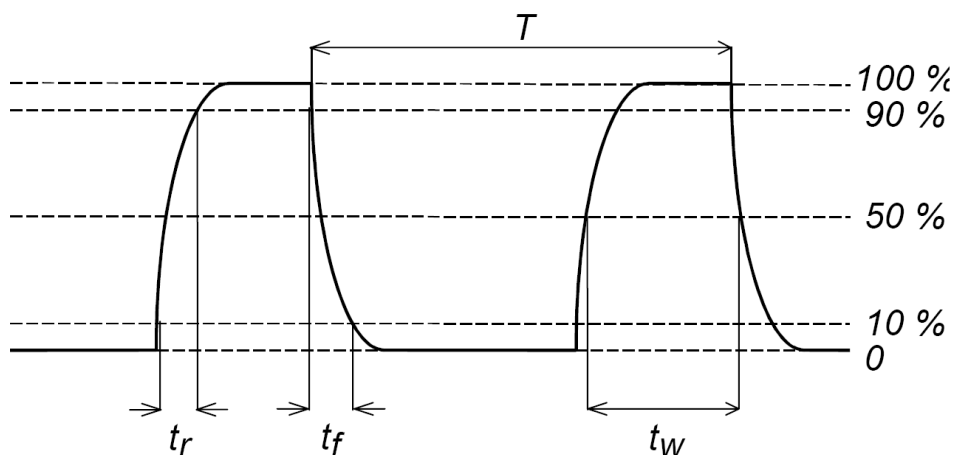
Do podstawowych parametrów przykładowego przebiegu należą:

- kształt przebiegu, polaryzacja impulsu, amplituda maksymalna i minimalna,
- maksymalna i minimalna szerokość impulsu,
- częstotliwość powtarzania i maksymalny współczynnik wypełnienia,
- składowa stała impulsu wyjściowego,
- czas narostu i czas opadania.

Generator impulsów prostokątnych zainstalowany w stanowisku laboratoryjnym w rzeczywistości generuje impulsy, których kształt odbiega od idealnego prostokąta. Dokonując rejestracji i obserwacji przebiegu sygnału na ekranie oscyloskopu, w ramach niniejszego podpunktu należy dokonać pomiaru następujących parametrów:

- napięcia międzyszczytowego V_{pp} (100%, 90%, 50%, 10%, 0, t_r , T , t_w , t_f),
- napięcia skutecznego V_{rms} ,
- napięcia średniego V_{avg} ,
- częstotliwości f ,
- okresu T ,
- czas trwania dodatnich impulsów t_w ,

- współczynnika wypełnienia k ,
- czasu narastania t_r ,
- czasu opadania t_f .

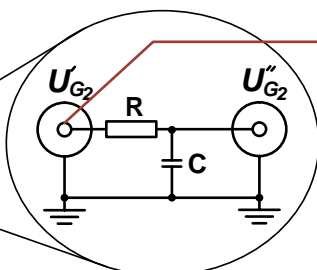
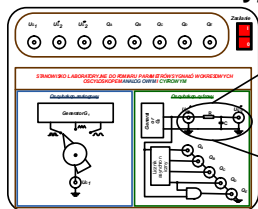


Rys. 11. Graficzny przykład sposób pomiaru wybranych parametrów przebiegu o charakterze impulsowym

Pomiar powyższych wartości należy zrealizować wykonując poniższe punkty.

1. Połączyć układ pomiarowy zgodnie ze schematem przedstawionym na **rys. 12**.

Stanowisko laboratoryjne



Oscyloskop



Rys. 12. Widok płyty czołowej stanowiska laboratoryjnego do badania sygnałów elektrycznych za pomocą oscyloskopu cyfrowego

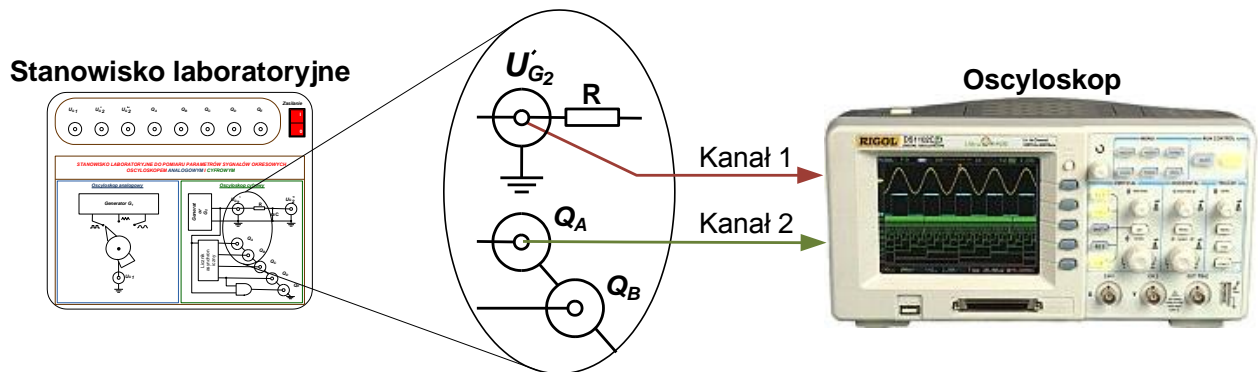
2. Włączyć zasilanie oscyloskopu i stanowiska laboratoryjnego.
3. Dobrać optymalne warunki pracy oscyloskopu w celu jak najlepszego zobrazowania przebiegu na ekranie oscyloskopu.
4. Zatrzymać przebieg na ekranie oscyloskopu i przy pomocy kursorów i funkcji zaimplementowanych w oscyloskopie wyznaczyć wartości wielkości charakteryzujących przebieg impulsowy.
5. Wydrukować zarejestrowane przebiegi i pod rysunkiem zapisać zmierzone wartości.

5.2. Obserwacja przebiegów w układach cyfrowych

Celem niniejszego podpunktu jest obserwacja przebiegów na wyjściu licznika binarnego 7493 oraz na bramce typu AND.

Przebieg ćwiczenia:

1. Połączyć układ pomiarowy zgodnie ze schematem przedstawionym na **rys. 13**.
2. Włączyć zasilanie oscyloskopu i stanowiska laboratoryjnego.
3. Dobrać optymalne warunki pracy oscyloskopu w celu jak najlepszego zobrazowania przebiegów na ekranie oscyloskopu.
4. Zatrzymać przebiegi na ekranie oscyloskopu i dokonać pomiaru ich podstawowych wartości charakteryzujących ich przebieg.
5. Zmieniając podłączenia przewodów sygnałowych pomiędzy wyjściami U'_{G2} , Q_A , Q_B , Q_C , Q_D , Q_E , odwzorować przebiegi na poszczególnych wyjściach licznika w odniesieniu do sygnału zegarowego.
6. Na podstawie uzyskanych przebiegów określić w jakim trybie pracuje licznik (modulo ile)?
7. Przedstawić w sprawozdaniu, na wspólnej osi czasu, przebiegi zarejestrowane na poszczególnych wyjściach licznika asynchronicznego, zobrazowując tryb pracy licznika.



Rys. 13. Schemat ogólny układu do obserwacji przebiegów w układach cyfrowych

6. Sprawozdanie

Sprawozdanie powinno zawierać notatkę z treścią zawierającą wyniki pomiarów zrealizowanych w trakcie ćwiczenia oraz rysunki zarejestrowanych przebiegów.