



Uniwersytet
Wrocławski

**Wydział Fizyki
i Astronomii**
Instytut Fizyki Doświadczalnej

pl. M. Borna 9
50-204 Wrocław
tel. +48 71 375 93 02, +48 71 328 73 65
fax +48 71 328 73 65
e-mail: sekr@ifd.uni.wroc.pl
www.ifd.uni.wroc.pl

Elektronika (konspekt)

Franciszek Gołek (golek@ifd.uni.wroc.pl)

www.pe.ifd.uni.wroc.pl

Wykład 14

Pomiar i podstawowe przyrządy pomiarowe w elektronice

Oscyloskopy.

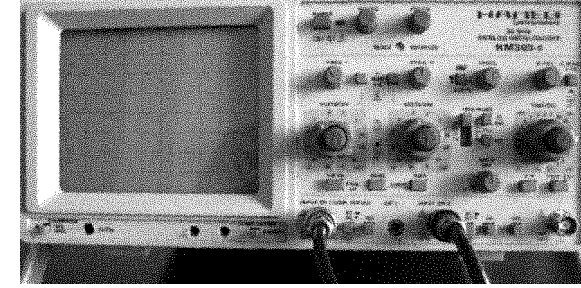
Oscyloskopy to najbardziej rozpowszechnione przyrządy przeznaczone do obrazowania sygnałów elektrycznych. Wyróżnia się oscyloskopy analogowe oraz cyfrowe (są też oscyloskopy analogowo-cyfrowe i analizatory sygnałowe).

Oscyloskopy służą do obserwacji i rejestracji sygnałów elektrycznych, nawet kilku jednocześnie. Oscyloskop wykorzystywany jest też do badania przebiegów rozmaitych wielkości fizycznych (po ich zamianie na sygnał elektryczny). Oscyloskopy są często stosowane do uruchomienia i diagnozowania nawet bardzo skomplikowanych układów elektrycznych i elektronicznych. W oscyloskopie wyróżniamy cztery podstawowe systemy: system wyświetlania, odchylenia w pionie, podstawa czasu i system synchronizacji. Zakończeniem systemu wyświetlania jest ekran lub lampa oscyloskopowa, na której ekranie wyświetlany jest obraz badanych wielkości fizycznych. Schemat blokowy prostego (jednokanałowego) oscyloskopu analogowego wraz ze szkicem lampy oscyloskopowej zamieszczono na rysunku poniżej (następna strona). Dla uzyskania świecenia luminoforu w lampie oscyloskopowej konieczne jest wytworzenie wiązki elektronowej, w której energie kinetyczne elektronów wynoszą kilka do 20 keV. Oznacza to, że w oscyloskopach starszego typu (z lampą oscyloskopową) wytwarzane są napięcia do około 20 kV!

Najważniejsze parametry: Rozmiary ekranu, Pasma częstotliwości, Liczba kanałów, Czas narastania, Rozdzielczość, Czułość, Maksymalne napięcie wejściowe. W oscyloskopach cyfrowych – głębokość pamięci i szybkość próbkowania,

Analogowy oscyloskop 2-kanałowy.

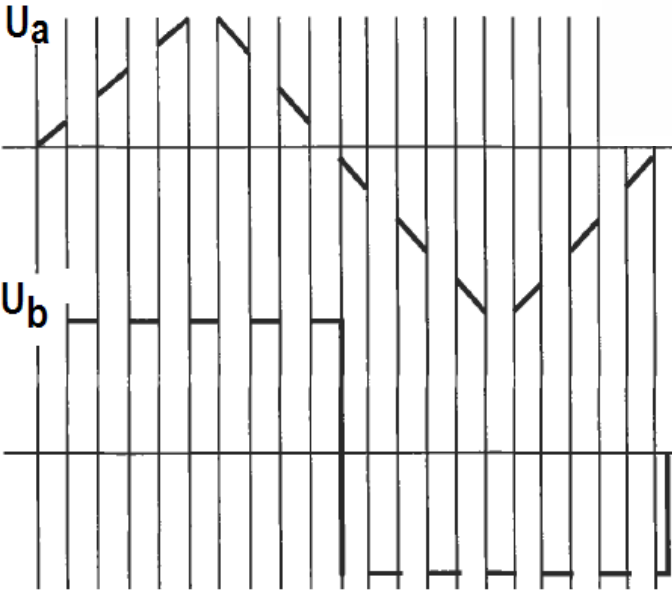
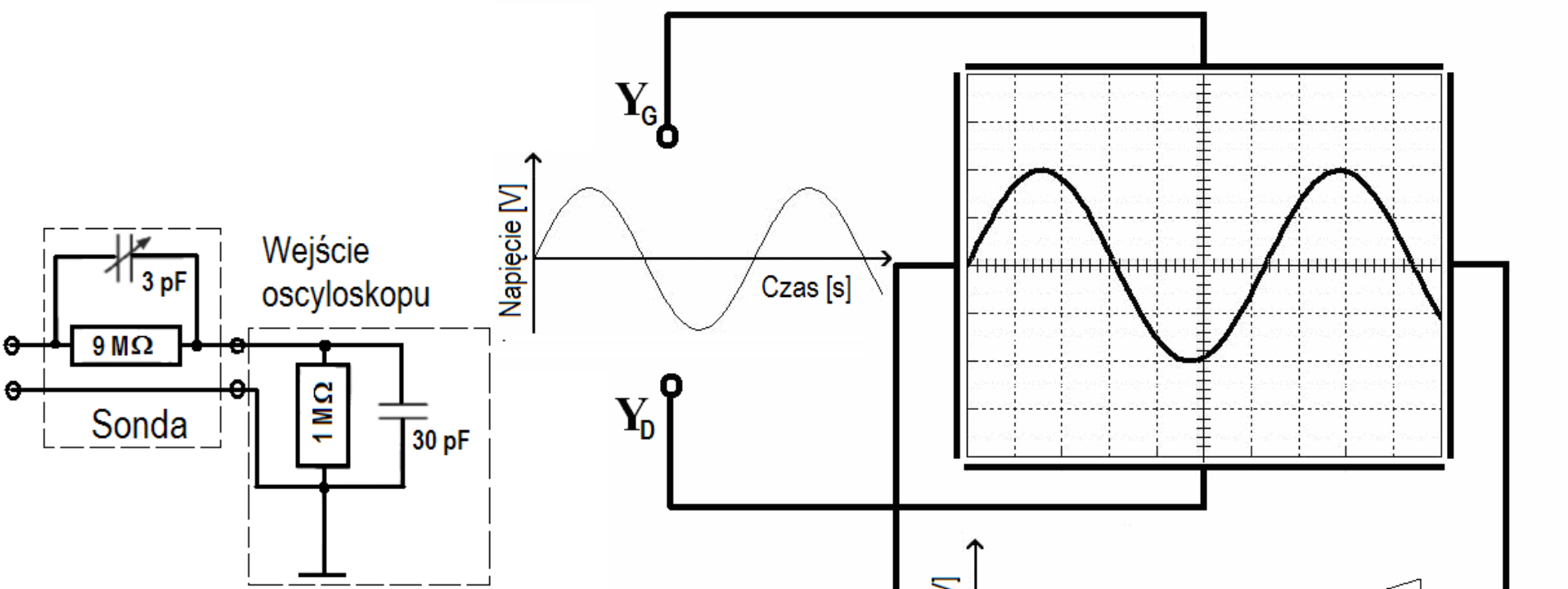
Badany sygnał jest po wzmocnieniu kierowany bezpośrednio do odchyłania wiązki elektronowej przemieszczającej się po luminoforze ekranu co powoduje kreślenie świecącej linii obrazującej przebieg sygnału. Mamy tu bezpośrednie obrazowanie sygnału.



Cyfrowy oscyloskop 2-kanałowy.

Oscyloskop cyfrowy próbkuje sygnał elektryczny, dokonuje konwersji wartości analogowych na cyfrowe przy pomocy przetwornika analogowo-cyfrowego ADC, a następnie zapamiętane cyfrowe wartości wykorzystuje do obrazowania zbadanego sygnału. W oscyloskopach cyfrowych stosowane są ekrany płaskie np. ciekłokrystalicznym – LCD.

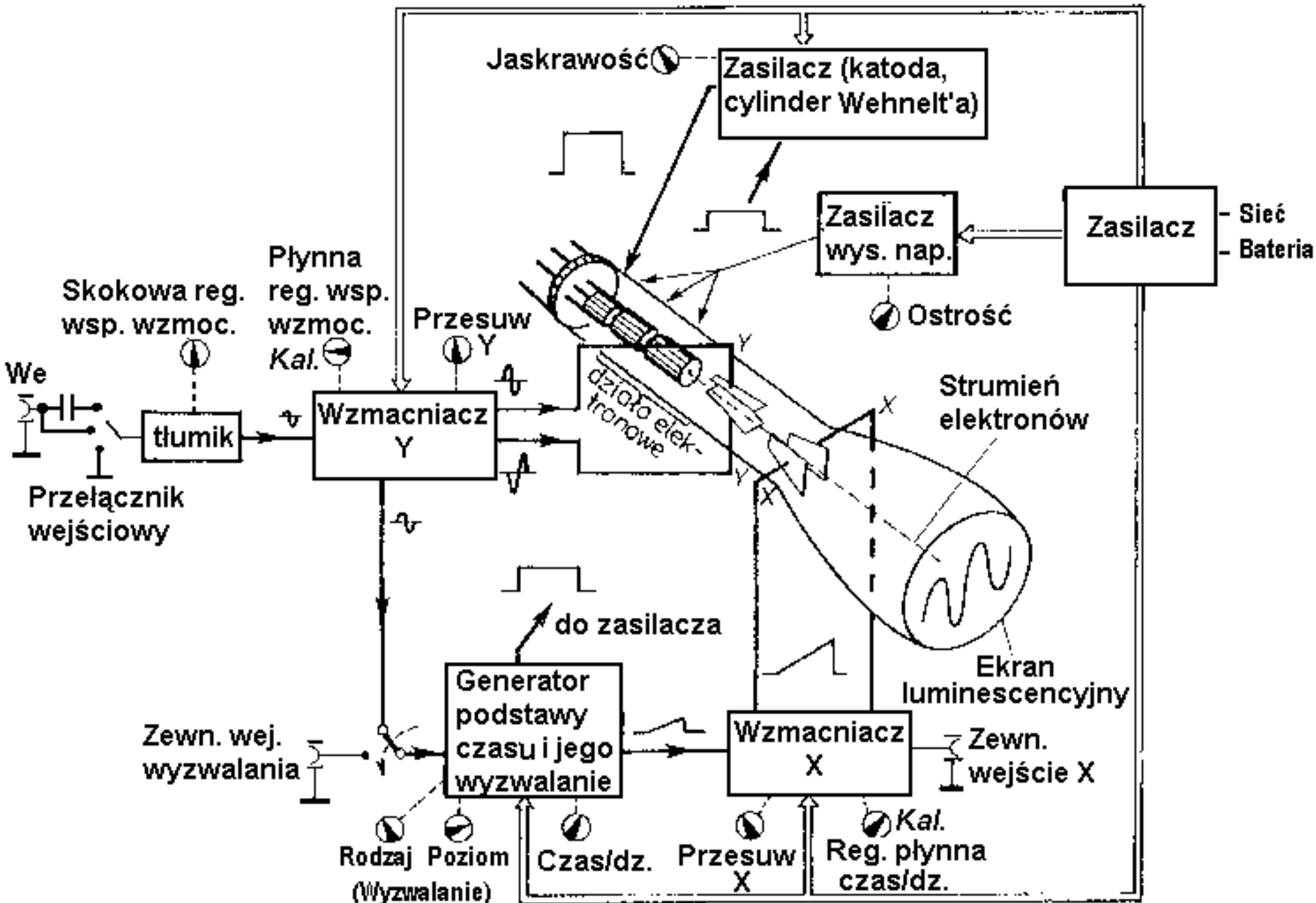




Idea wyświetlania dwóch napięć w modzie czopowania

Idea wyświetlania napięć doprowadzonych do płytek odchylających lampy scyloskopowej (Y w pionie i X w poziomie).

Uproszczony schemat oscyloskopu



Badany sygnał poprzez tłumik o regulowanym tłumieniu dociera do wzmacniacza odchylenia pionowego Y, na wyjściu którego uzyskuje się wzmocniony (i ewentualnie uzupełniony o kompensację składowej stałej) przebieg napięcia sterujący odchyleniem wiązki elektronicznej poprzez płytki Y. Dla dokonania pomiaru wielkości napięcia należy pamiętać, że opis przełącznika skokowego (np. 1V/działkę, 10mV/działkę czyli 1V/cm, 10mV/cm itd.) jest aktualny tylko przy skróceniu regulacji ciągłej w pozycję **“kalibr”** tj. pozycję kalibracji. Na powierzchni ekranu oscyloskopu znajduje się podziałka w postaci kratek i kresek. Tu jedna działka = 1 cm a nie 2 mm! Opisy przełączników przy gniazdach wejściowych: **AC** – oznacza, że wejście przyjmuje tylko sygnał zmienny (sprzężenie pojemnościowe), **DC** – oznacza, że wejście przyjmuje również składową stałą, **GND** – oznacza, że sygnał jest odłączony a wejście jest zwarte do masy. Aby obraz na ekranie lampy był stabilny tj. aby wiązka elektroniczna periodycznie powtarzała ten sam rysunek konieczna jest synchronizacja odchylenia poziomego (podstawy czasu) z badanym sygnałem.

Zatem część sygnału badanego kierowana jest do układu wyzwalań, który steruje generatorem podstawy czasu i modulacją jaskrawości (tj. intensywności wiązki elektronowej docierającej do luminoforu).

Pokrętem **poziom** (ang. *level* lub *trigger level*) wybieramy wartość napięcia sygnału, przy którym następuje wyzwalań tj. rozpoczynanie piło-zębnych impulsów dla płytek odchylenia poziomego i impulsów prostokątnych podawanych na cylinder Wehnelta (elektroda z otworem otaczająca katodę) dla wypuszczania wiązki elektronowej. W przypadku oscyloskopu wielokanałowego należy odpowiednim przełącznikiem wybrać kanał, z którego pobierany jest sygnał synchronizujący (należy wybrać sygnał najmocniejszy). W przypadku gdy mają być oglądane sygnały bardzo słabe na wszystkich kanałach dobrą synchronizację uzyskamy gdy odpowiedni sygnał podamy na wejście wyzwalań zewnętrznych. Wejście wyzwalań zewnętrznych jest przydatne w badaniach układów cyfrowych i przy obserwacji nieperiodycznych sygnałów.

Podstawa czasu może być wyzwalana narastającym zboczem (znak +) lub opadającym zboczem sygnału (znak -). Wśród rodzajów wyzwalań można wymienić: a) normalne, b) automatyczne, c) sygnałem telewizyjnym, d) jednorazowe. Szybkość ruchu plamki w kierunku osi X można zmieniać w szerokim zakresie. Należy pamiętać, że opis przełącznika skokowego (np. 1s/cm czy 10ns/cm itd.) jest obowiązujący tylko przy ustawieniu pokrętki regulacji ciągłej w pozycję *kalibr*. W oscyloskopach wielokanałowych (zwykle dwu-kanałowych lub czterokanałowych) zastosowane są przełączniki elektroniczne przełączające sygnały z kilku wzmacniaczy wejściowych na jeden wspólny tor sterujący lampą oscyloskopową. Przełączniki te mogą mieć dwa rodzaje pracy: a) praca przemienna (*alternating*) – przełączenie odbywa się podczas ruchu powrotnego plamki; b) praca siekana (*chopped*) – przełączenie odbywa się wielokrotnie podczas każdego kreślenia plamką od lewego do prawego brzegu ekranu. Dla ochrony przed uszkodzeniami należy unikać podawania napięć większych niż kilkadziesiąt V na wejścia oscyloskopu a kabel sieciowy włączać tylko do gniazda z dobrym (tj. sprawnym) uziemieniem.

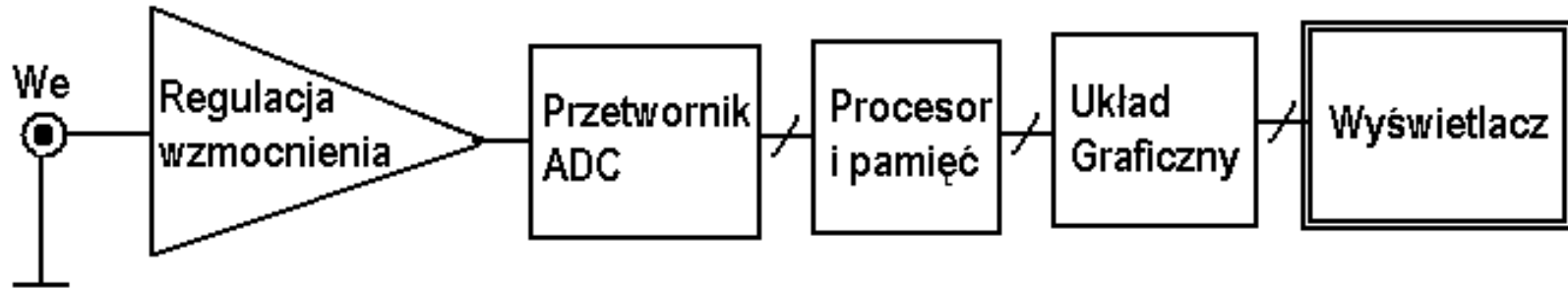
Brak obrazu badanego przebiegu lub plamki na ekranie oscyloskopu może mieć następujące przyczyny: a) pokrętłem przesuwu X lub Y przesunięto obraz poza obszar ekranu; b) przy stałonapięciowym sprzężeniu podano na wejście Y (lub X) sygnał o zbyt dużej wartości składowej stałej; c) podstawa czasu nie jest wyzwalana; d) pokrętło jaskrawości skręcono do minimum.

W nowocześniejszych oscyloskopach cyfrowych instalowane są liczne udogodnienia np. a) na ekranie pojawiają się napisy informujące o aktualnych zakresach podstawy czasu, czułości itp.; b) kursory (zwykle dwie pionowe i dwie poziome linie) ułatwiają wyznaczenie czasu trwania wybranego fragmentu badanego przebiegu, jego częstotliwości, fazy oraz zmiany napięcia; c) stosowane są tzw.

ekrany dotykowe, u których wybór funkcji oscyloskopu dokonuje się przez dotyk palcem odpowiednio opisanego miejsca na ekranie.

Oscyloskop

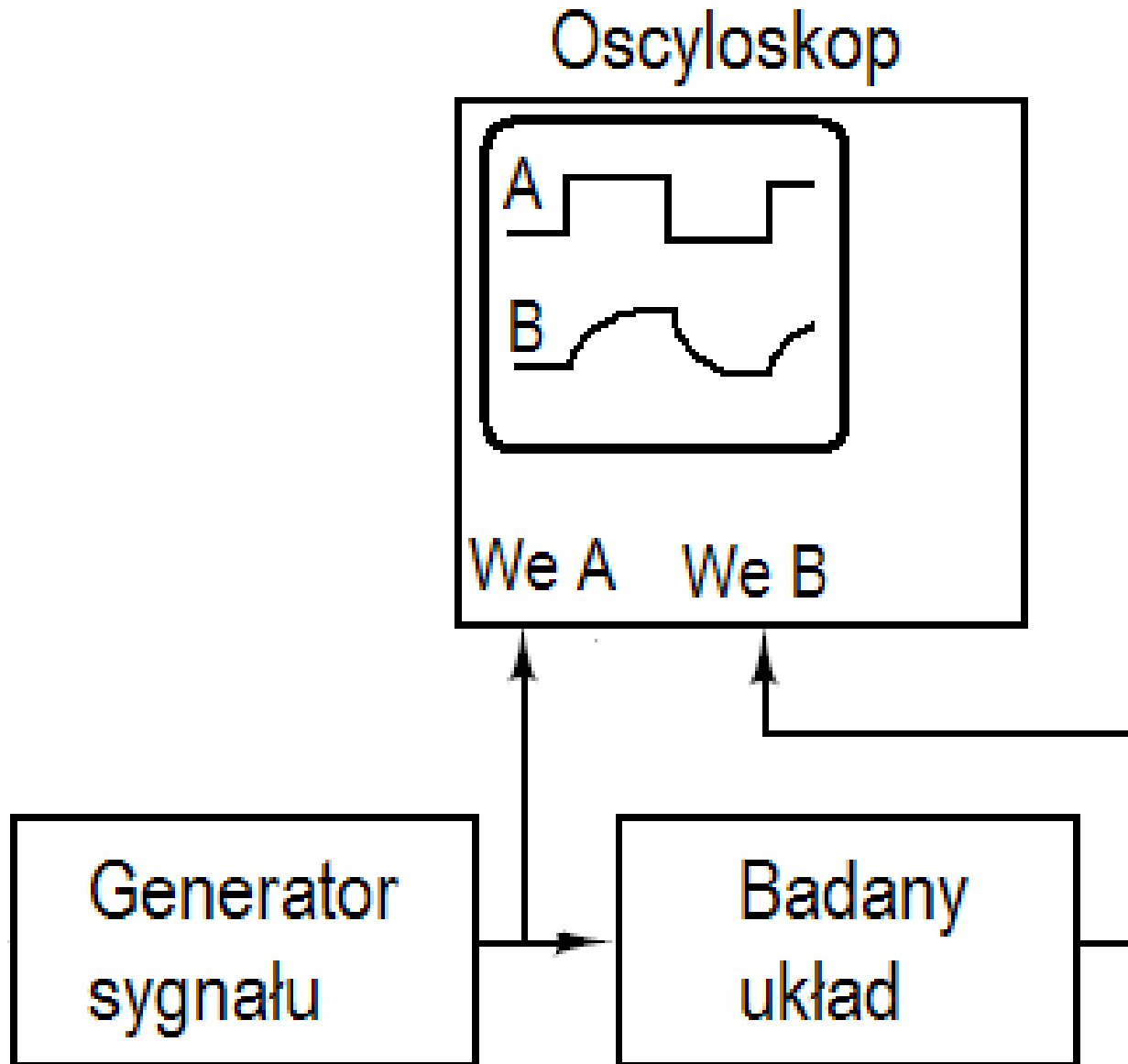
cyfrowy



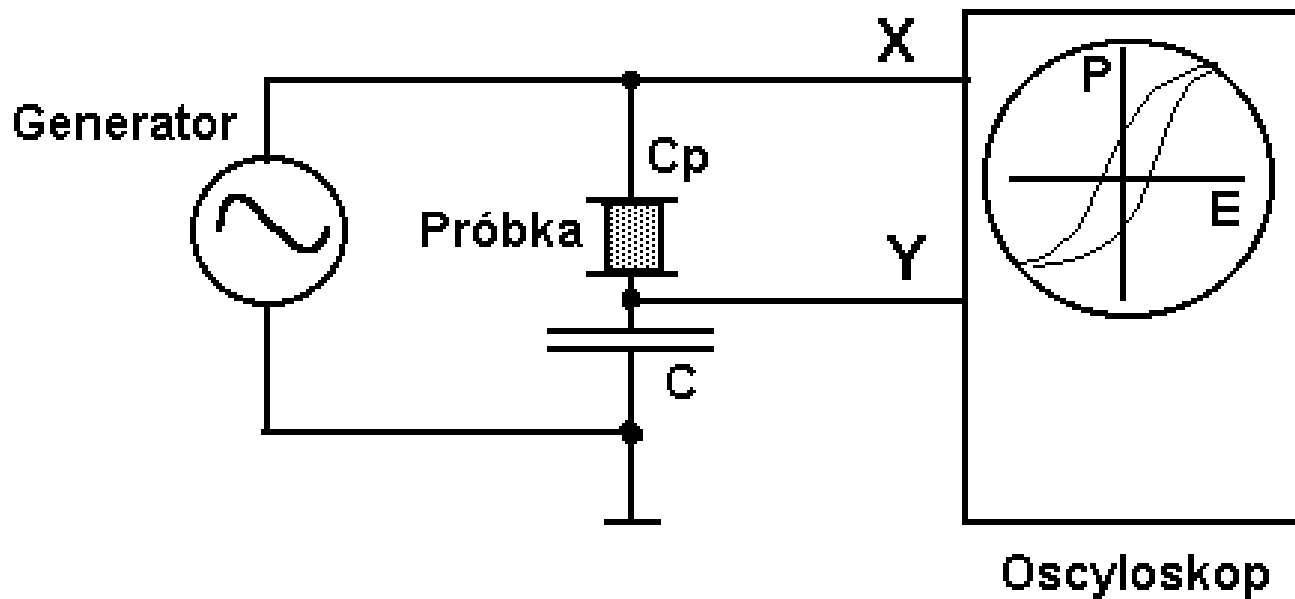
Dzięki szybkim przetwornikom analogowo-cyfrowym budowane są oscyloskopy cyfrowe o częstotliwościach pobierania próbek ponad 1 GHz i paśmie przenoszenia ponad 10 GHz. Działanie takich oscyloskopów polega na pobraniu n (np. 10^6) próbek i zapisaniu ich w pamięci. Pracę układu kontroluje układ mikroprocesorowy pozwalający na wielostronną analizę badanych sygnałów. Oscyloskopy cyfrowe budowane są również jako karty komputerowe a także jako kieszonkowe (wielkości kalkulatora z ekranem ciekłokrystalicznym) do celów diagnostycznych w warunkach terenowych. Często oscyloskopy konstruowane są jako oscyloskopy analogowo-cyfrowe. Zamiast lampy oscyloskopowej mogą być stosowane kineskopy monochromatyczne lub kolorowe. W oscyloskopach tych dzięki cyfrowym podstawom czasu (zliczanie impulsów zegara kwarcowego) możliwe są bardzo precyzyjne pomiary relacji czasowych badanych sygnałów. Precyzja pomiaru wielkości napięć zależy od długości słowa przetwornika A/D, które często są 8-bitowe i dające dokładność $1/2^8$ tj. $1/256$ zakresu.

W oscyloskopach cyfrowych oprócz obserwacji sygnału na bieżąco można oglądać sygnał zamrożony w pamięci nieprzetworzony lub przetworzony układem mikroprocesorowym w dowolnie pożądanym sposobie (wygładzony, uśredniony z wielu sekwencji, w postaci diagramu zawartości harmonicznym, różniczkowany itd.). W oscyloskopie cyfrowym zbieranie danych może zachodzić niezależnie od chwili wyzwania i przebieg może być zapamiętany w dowolnej (regulowanej) relacji czasowej do impulsu wyzwania. Zwykle tzw. rekord rejestracji (tj. n zamrożonych w pamięci próbek) jest wielokrotnie dłuższy od rekordu obrazowania na ekranie. Pozwala to swobodnie obrazować dowolne fragmenty i szczegóły raz zarejestrowanego przebiegu. Oscyloskopy cyfrowe dysponują wieloma funkcjami, których brak w oscyloskopach analogowych. Np. czuwanie (baby-sitting) oscyloskopu tak długo, jak długo nie pojawi się impuls wyzwalający, który spowoduje zamrożenie w pamięci tylko interesującej części ciągle próbkowanego sygnału z wyprzedzeniem czasowym takim jakie zostało z góry ustalone. Należy zaznaczyć, iż wyprzedzenia czasowe ograniczone jest głębokością pamięci natomiast opóźnienie czasowe może być dowolne.

Oscyloskop jako przyrząd diagnostyczny

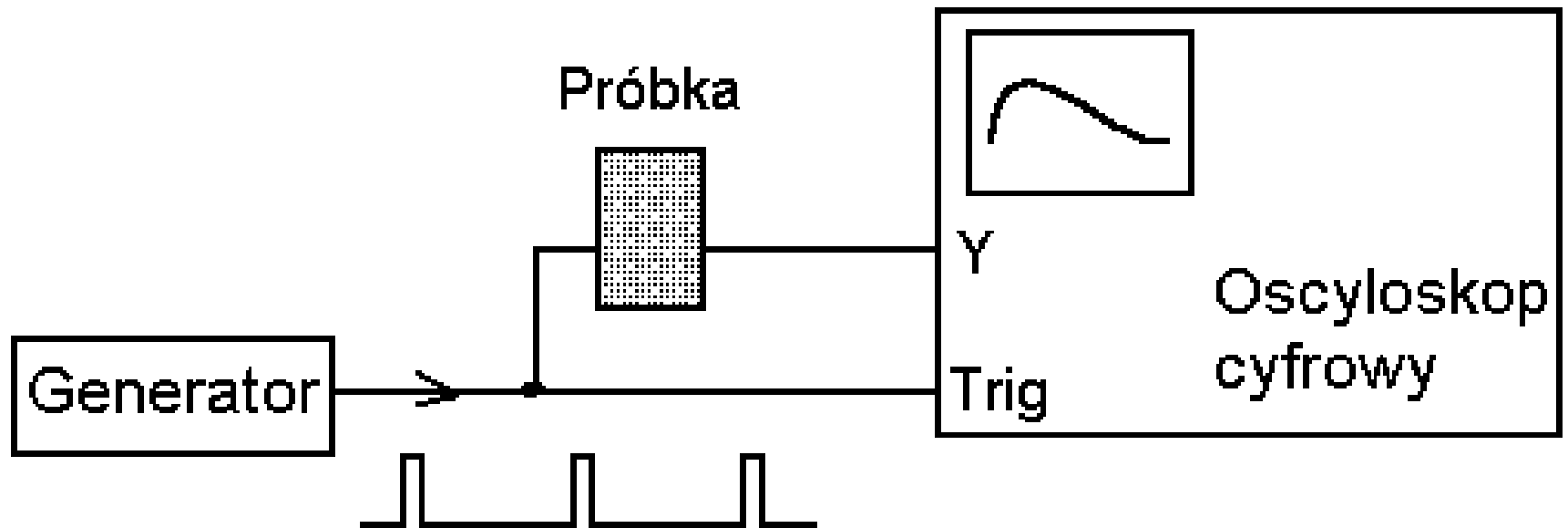


Układ Sawyera-Towera służy do badania zjawiska histerezy dielektrycznej dielektryków. Na wejście X oscyloskopu (odchylenie poziome) podane jest napięcie na próbce, z dobrym przybliżeniem bo $C \gg C_p$. Napięcie to jest proporcjonalne do wektora E (natężenia pola elektrycznego) w próbce. Na wejście Y podane jest napięcie na pojemności C . To napięcie jest proporcjonalna do ładunku Q na okładkach kondensatora C_p (z badanym dielektrykiem), a zatem i do wielkości wektora polaryzacji próbki P ($P = Q/A$). Zamieniając kondensator C opornikiem można badać tzw. pętle prądowe próbek ferroelektrycznych $I = I(E)$.



Dla poprawienia stosunku **Sygnal/Szum** można uczynić badany sygnał periodycznym. Np. periodycznie pobudzamy próbkę otrzymujemy periodyczną odpowiedź próbki. Sygnał pobudzający próbkę musi jednocześnie synchronizować podstawę czasu oscyloskopu cyfrowego.

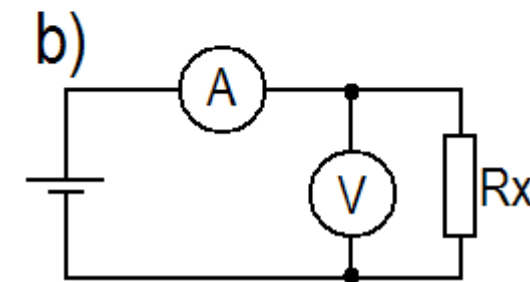
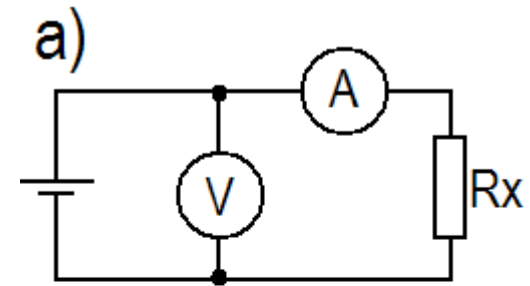
Odpowiedzi są sumowane przez oscyloskop (wszystkie odpowiedzi w tej samej relacji czasowej do impulsu pobudzającego). Przy sumowaniu szumy nie mają szans się kumulować tak jak sygnał synchroniczny.



Przykłady prostych pomiarów wielkości elektrycznych

Techniczny pomiar rezystancji polega na jednoczesnym zmierzeniu napięcia na zaciskach rezystora i natężenia prądu w rezystorze a następnie obliczeniu rezystancji z prawa Ohma.

Dwa możliwe warianty podłączenia mierników (woltomierza i amperomierza) pokazują rysunki a i b. W przypadku „a” pomiar napięcia na R_x jest obarczony dodatkowym błędem wynikającym z ze spadku napięcia na amperomierzu „A”. A w przypadku b pomiar natężenia prądu w R_x jest obarczony dodatkowym błędem wynikającym z prądu



płynącego przez woltomierz V. Dysponując amperomierzem i woltomierzem o wewnętrznych rezystancjach przykładowo $R_A \leq 1\Omega$ i $R_V \geq 10^6\Omega$ z łatwością dostrzegamy, że do pomiaru wartości R_x większych od 1000Ω dokładniejszy jest wariant z rys. „a” natomiast do pomiaru R_x o wartościach mniejszych od 1000Ω lepszy będzie wariant „b”.

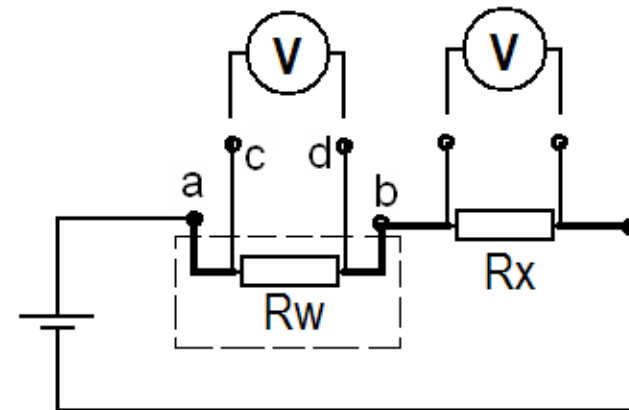
Pomiar małych oporności

Przy pomiarze małych rezystancji bardzo ważne staje się wyeliminowanie oporności styków i doprowadzeń.

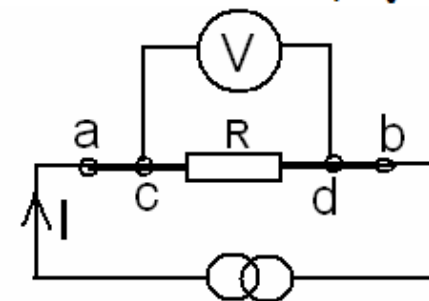
Można to uczynić w układzie z czterema zaciskami (dwoma prądowymi i dwoma napięciowymi) wówczas woltomierz „nie łapie” niepożądanych spadków napięć na stykach i doprowadzeniach prądu.

Dla wyeliminowania sił termoelektrycznych należy w pomiarze zastosować prąd przemienny i wykorzystać wzmacniacz fazo-czuły. (ang. Lock-in amplifier).

Pomiar z rezystorem wzorcowym R_w

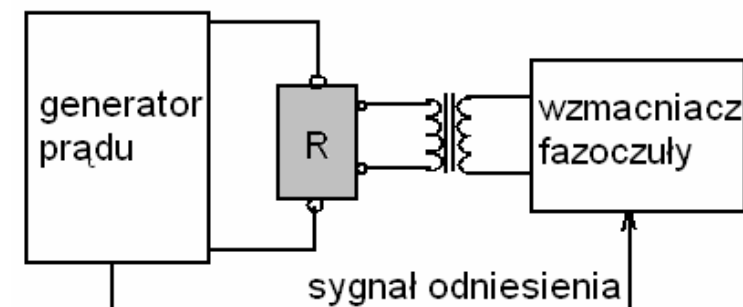


Pomiar ze źródłem prądowym



a, b - zaciski prądowe
c, d - zaciski napięciowe

Pomiar z prądem przemiennym



Cztero-kontaktowa metoda pomiaru rezystancji (właściwej) materiałów półprzewodnikowych

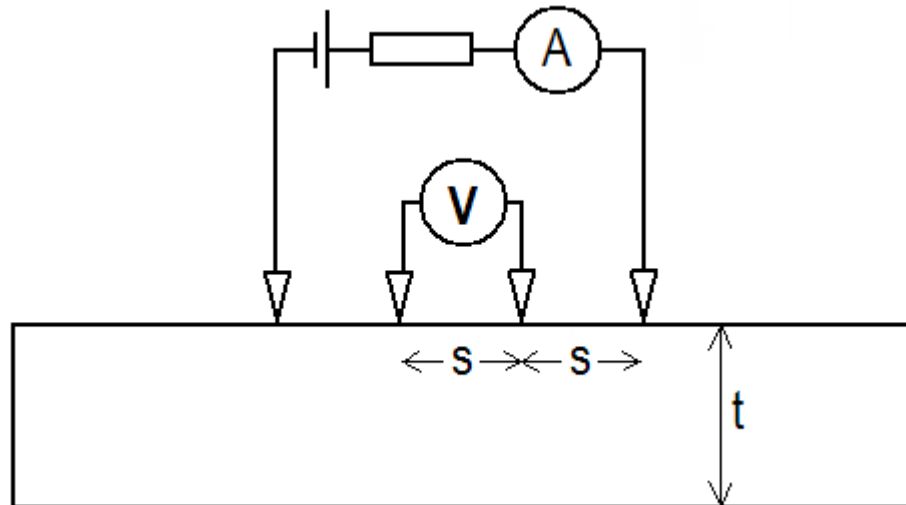
Schemat do pomiaru tą metodą pokazany jest na rysunku. Woltomierz V mierzy skok potencjału między dwoma wewnętrznymi z czterech punktów kontaktowych rozmieszczonych w odstępach „ s ” na powierzchni materiału badanego. Prąd elektryczny w materiale wymuszany jest obwodem zawierającym dwa zewnętrzne kontakty punktowe.

Gdy grubość „ t ” materiału jest dużo większa od odstępów elektrod „ s ”: $t \gg s$ to

$$\rho \cong 2\pi s(V/I).$$

Gdy grubość „ t ” materiału jest dużo mniejsza od odstępów elektrod „ s ”: $t \ll s$ to

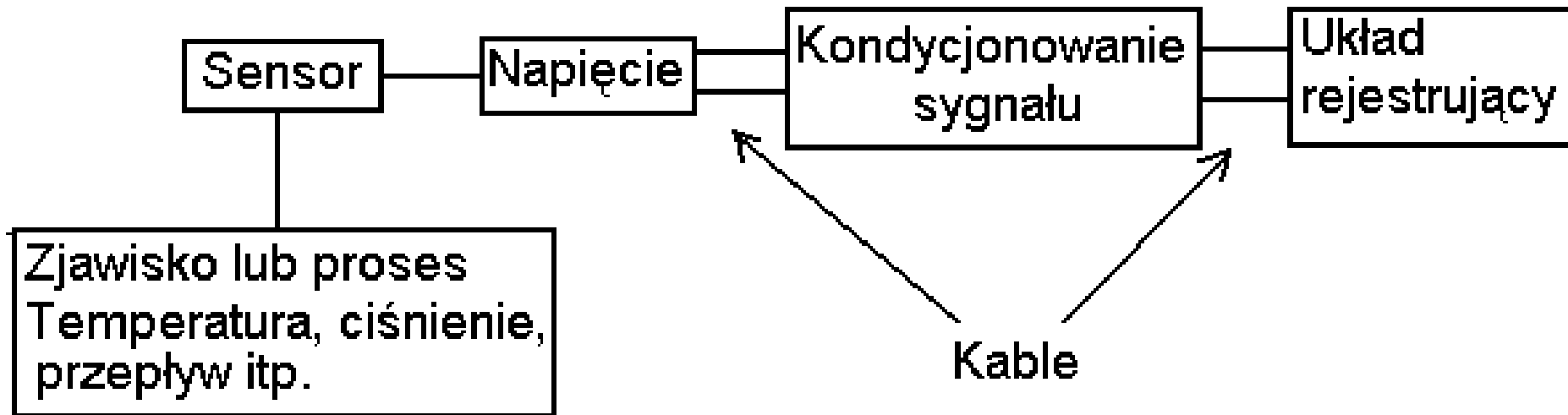
$$\rho \cong (\pi t / \ln 2)(V/I).$$



Uwagi o pomiarach i zakłóceniach

Zwykle wiedza o naturze źródła sygnału oraz o konfiguracji odpowiedniego układu pomiarowego jest konieczna do osiągnięcia wolnego od zakłóceń pomiaru.

Schemat blokowy typowego układu pomiarowego



W zasadzie w każdym z przedstawionych na schemacie bloków może pojawić się zakłócenie (tj. niepożądany sygnał zewnętrzny) oraz szумы (generowane przez elementy układu pomiarowego). W laboratoriach najczęściej jednak usiłuje się zredukować zakłócenia poprzez optymalizację połączeń przenoszących mierzony sygnał (ekranowania, izolacje, stosowanie wejść różnicowych i eliminowanie składowej wspólnej, równoważenie, uziemienie, oddzielanie galwaniczne, detekcja selektywna i fazoczuła, filtracja itp.).

Najczęściej występującymi szumami są szумы ciepłne, szумы śrutowe oraz szумы typu 1/f.

Szумы ciepłne (szумы Johnsona), biorą się z drgań i ruchów ciepłnych nośników ładunku. Szумы te opisuje wzór Nyquista:

$$U = \sqrt{(4kTR\Delta f)}$$

Gdzie: k – stała Boltzmana ($1,38 \cdot 10^{-23}$ Ws/K), T – temperatura, R – rezystancja, Δf – pasmo częstotliwości.

Szum śrutowy powstaje przy przepływie prądu zwłaszcza przy przepływie przez złącza półprzewodnikowe. Opiswany jest przez wzór Schottky'ego:

$$I_s = \sqrt{(2qI\Delta f)}$$

Gdzie: q – ładunek nośnika (tu $1,6 \cdot 10^{-19}$ C), I – natężenie prądu, Δf - pasmo.

Szумы 1/f dominują w zakresie niskich częstotliwości. Na tego typu szумы składają się przypadkowe zmiany gęstości ładunku, tzw. pełzanie zera (biorące się z rozmaitych przyczyn: upływności, niestabilne styki, zjawiska elektrochemiczne itp.). Szum ten opiswany jest przez tzw. widmową gęstość mocy S :

$$S = (U/\sqrt{\Delta f})^2$$

Obniżenie szumów można uzyskać przez dobór odpowiednich (zwykle droższych) elementów niskoszumowych, obniżanie mocy, obniżanie temperatury. Zwykle ważniejszym w eksperymencie jest uzyskanie lepszego stosunku: sygnał/szum. Oczywiście poprawę tego stosunku uzyskuje się również poprzez poprawianie wielkości sygnału użytkowego.

Przy pomiarach małych sygnałów nawet komputer czy monitor komputerowy są intensywnym źródłem sygnałów zakłócających. Przed przystąpieniem do eliminowania zakłóceń należy, w miarę możliwości, ustalić i zlokalizować ich źródła (poprzez zwieranie wejść, przemieszczanie elementów itp.).

Jednym z najpowszechniejszych źródeł zakłóceń jest szybkie przełączanie dużych prądów (źle sterowane piece - włączenia i wyłączenia grzałek).

Inną przyczyną powstawania zakłóceń może być przemieszczanie się przewodu powodujące zmianę strumienia indukcji magnetycznej przenikającego przez dany obwód, co zgodnie z prawem Faradaya prowadzi do powstawania zakłócającej siły elektromotorycznej. Dodatkowe zakłócenia wnosi tutaj efekt tryboelektryczny, polegający na indukowaniu w danym układzie napięcia (dochodzącego do kilkuset miliwoltów) wywołanego przez odkształcanie dielektryka.

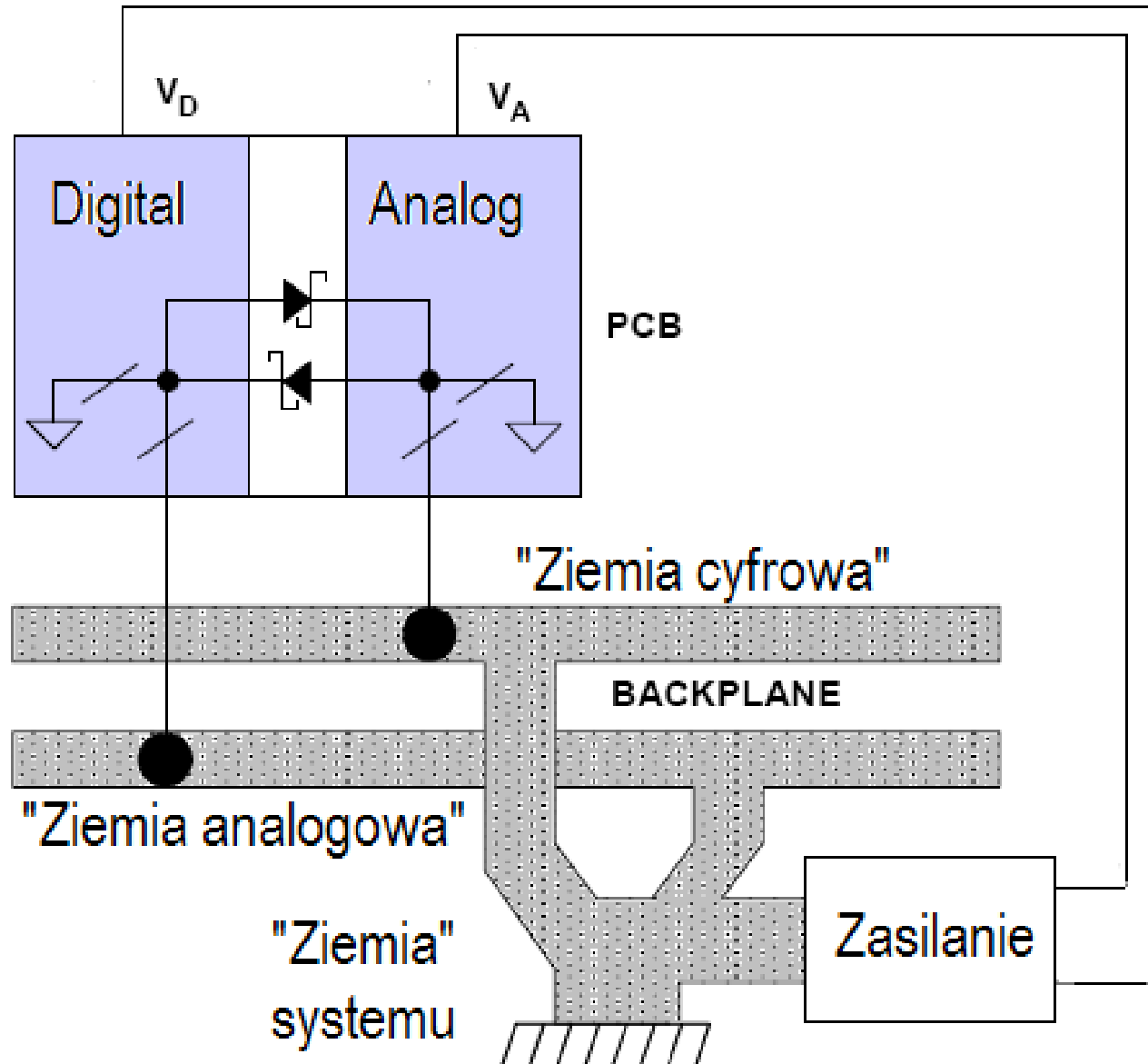
Pojemnościowe sprzężenie zakłóceń. Walka z tym typem przenikania niepożądanych sygnałów polega na zmniejszaniu pojemności C między źródłem zakłóceń a odbiornikiem. Dobrym środkiem przeciwdziałającym pojemnościowemu sprzężeniu obwodów jest ekranowanie elektrostatyczne.

Magnetyczne sprzężenie zakłóceń. Walka z tym typem przenikania niepożądanych sygnałów polega na zmniejszeniu indukcyjności wzajemnej obwodów. Zwykle pola magnetyczne indukują napięcia zakłóceń w pętłach układów elektronicznych.

Czasem udaje się zredukować zakłócenie poprzez dodanie sygnału zakłócającego o przeciwnej fazie. Innym razem pomocne staje się stosowanie rozmaitych filtrów przeciwzakłóceń. Generalnie należy starać się separować silnie zakłócające kable energetyczne od przewodów pomiarowych. Niekiedy jedynym sposobem pozbycia się zakłóceń w pracowni pomiarowej jest przeniesienie ich źródła (silnika, lasera impulsowego, generatora, pieca itd.) do innego, odpowiednio oddalonego i najlepiej ekranowanego pomieszczenia.

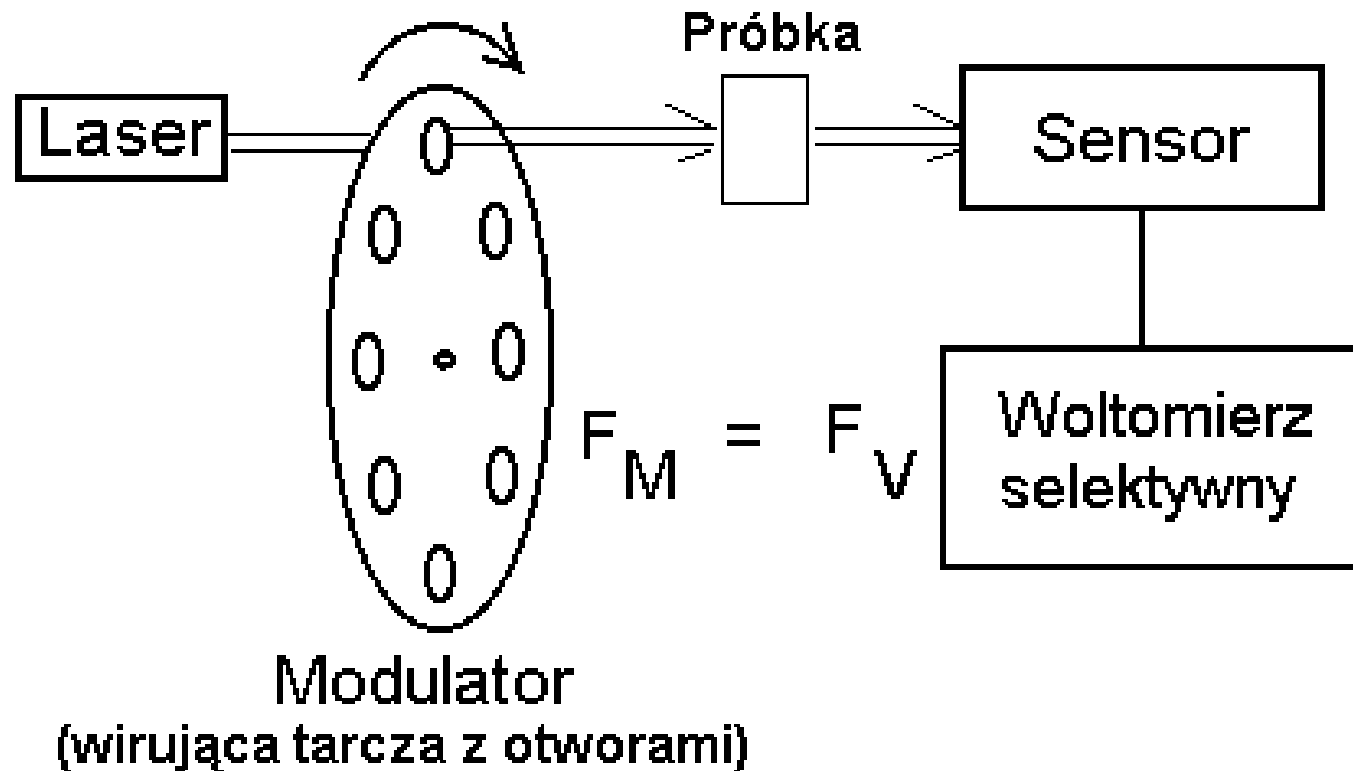
Należy unikać uziemiania układu w więcej niż jednym punkcie. Unikamy w ten sposób spadków napięć na kablach uziemiających i pochodzących od znacznych i niekontrolowanych prądów płynących w uziemieniach.

Obowiązuje też zasada separacji ziemi czułych układów analogowych od ziemi zakłócających obwodów cyfrowych.



Uzmiennianie sygnału z pomocą modulatora

Jednym ze sposobów pomiaru słabych i zatopionych w szumach sygnałów stałych lub wolnozmiennych jest tzw. uzmiennianie sygnału. Woltomierz mierzy tylko sygnał z wąskiego pasma częstotliwości zawierającego częstotliwość z jaką jest pobudzana próbka (lub jej harmoniczną np. $2f$).



Woltomierz fazoczuły (Lock-in amplifier, phase sensitive detector). Woltomierze fazoczułe (zwane też wzmacniaczami homodynowymi z filtrem dolnoprzepustowym) służą do pomiaru słabych, silnie zakłóconych szumem, sygnałów. Sprawdzają się nawet w sytuacji, gdy amplitudy sygnałów zakłócających są o kilka rzędów większe od sygnału właściwego.

Zasada działania tych woltomierzy polega na ortogonalności napięć sinusoidalnych o różnych częstotliwościach. Ortogonalność oznacza tu, że iloczyn dwóch sinusoid o różnych częstotliwościach f_1 i f_2 wycałkowany (uśredniony) w czasie znacznie dłuższym niż okres każdej z sinusoid wynosi zero. Natomiast, gdy częstotliwości i fazy obu sinusoid są identyczne całka ich iloczynu wynosi połowę iloczynu ich amplitud. Szum o przypadkowych częstotliwościach i fazach (nie zgodnych z sygnałem odniesienia) w wyniku uśrednienia jest eliminowany.

Pomiary fazoczułe

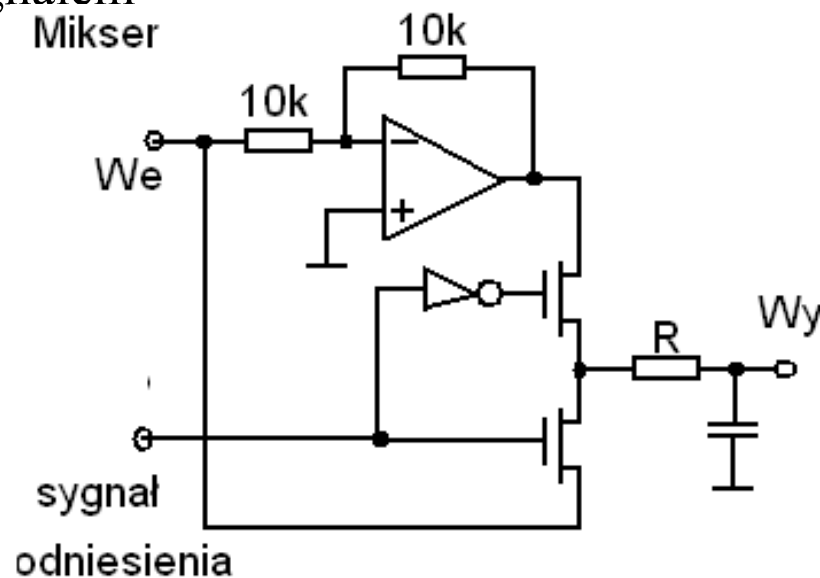
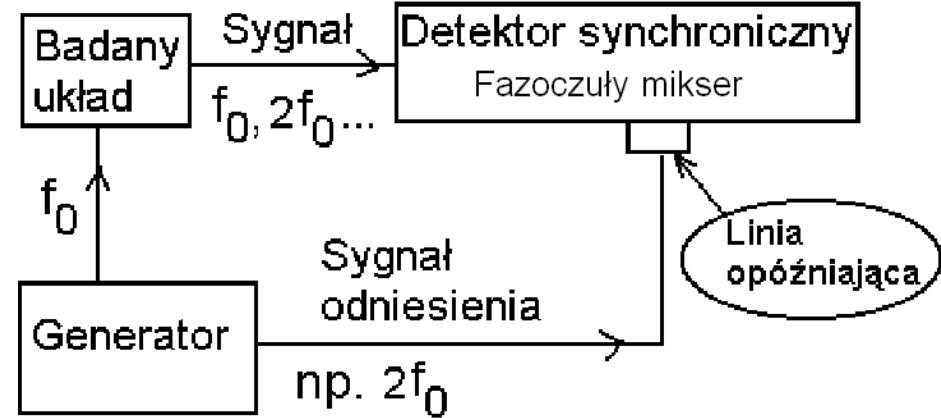
W tej metodzie mierzony jest sygnał o częstotliwości identycznej z częstotliwością pobudzenia f_0 lub jej częstotliwością harmoniczną f_n w sposób synchroniczny. To znaczy mierzony jest

albo sygnał w postaci jednej składowej zgodnej w fazie z sygnałem odniesienia.

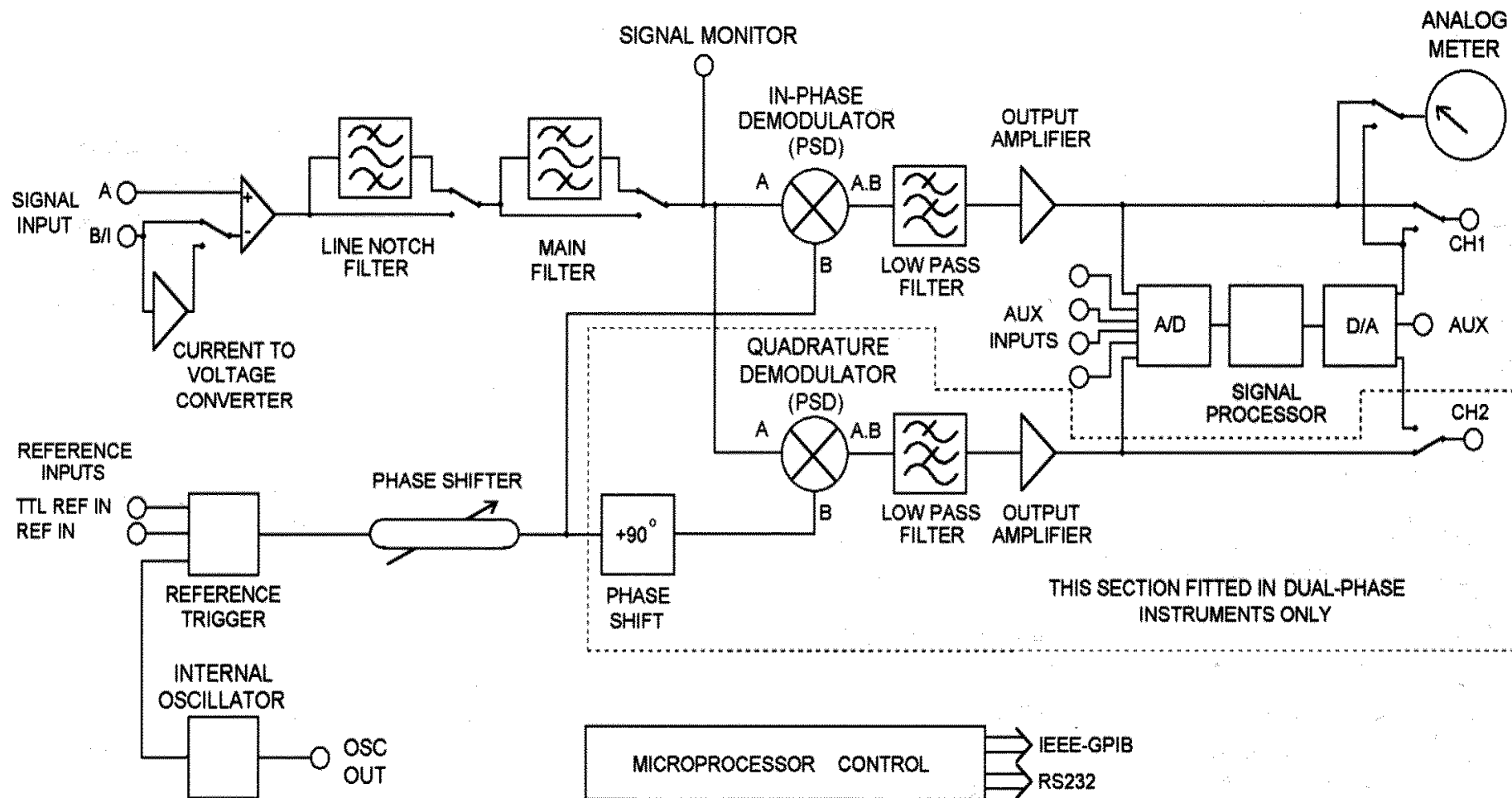
Mamy wtedy do czynienia z Lock-in'em jednokanałowym. Albo mierzone są dwie składowe: jedna zgodna w fazie z sygnałem odniesienia i druga o przesuniętej fazie o 90° (opóźniona o $T/4$). Mamy wtedy do czynienia z Lock-in'em dwukanałowym.

Można jednak przy pomocy regulacji względnego opóźnienia sygnałów doprowadzić do ich idealnej zgodności fazowej (i wyzerować drugą, opóźnioną składową). Lock-in wykonuje mnożenie sygnału wejściowego z sygnałem

odniesienia a sygnał wyjściowy jest uśrednieniem tego iloczynu w czasie równym dużej wielokrotności okresu sygnału odniesienia. Przy pomocy wzmacniaczy fazo-czułych można badać bardzo słabe sygnały i przesunięcia fazy sygnału (opóźnienia).



Wzmacniacz fazoczuły (www.signalrecovery.com) Lock-in analogowy podobnie jak i cyfrowy mierzy iloczyn sygnałów: A - sygnał mierzony i B - sygnał odniesienia. Gdy w eksperymencie do pobudzenia próbki stosujemy sygnał ω a jako sygnał doniesienia stosujemy wyższą harmoniczną np. 2ω to uzyskujemy efekt różniczkowania – bardzo ważny przy badaniu układów nieliniowych i w różnych rodzajach spektroskopii. Lock-in 2-kanalowy pozwala również śledzić przesunięcie fazowe.



Elektronika. Lista – 13

1. zaproponuj układ złożony z przerzutników, który będzie dzielił częstotliwości przebiegu prostokątnego przez 8.
2. zaproponuj licznik złożony z przerzutników i bramek liczący do 12.
3. zaproponuj układ (złożony z przerzutników i bramek), który będzie reagował stanem wysokim na codziesiąty impuls.
4. Ilo bitowego przetwornika należy użyć aby mierząc napięcia o 0 do 5 V uzyskać rozdzielczość 1 mV.