Rozdział 2

Przyrządy pomiarowe

Andrzej Zięba

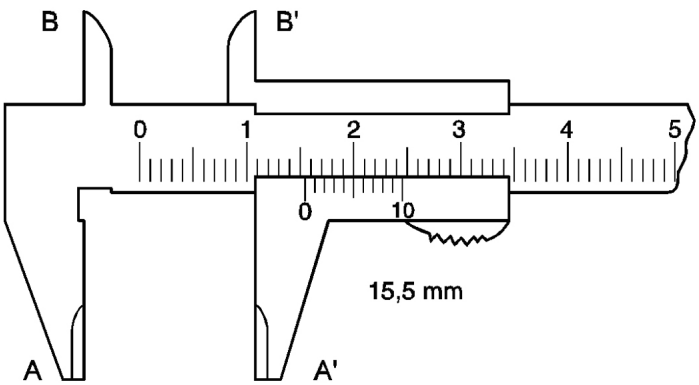
Układ SI wyróżnia jako podstawowe jednostki mechaniczne metr, sekundę i kilogram. Nie jest to przypadek, gdyż długość, czas i masa są wielkościami mechanicznymi dostępnymi bezpośrednim pomiarom. Inne wielkości mechaniczne takie jak pęd, moment bezwładności, etc., będące ich funkcjami, wyznaczamy na ogół poprzez pomiar wymienionych wielkości podstawowych. w rozdziale 2 omówiono najpierw – używane w różnych ćwiczeniach – przyrządy do pomiaru długości, czasu i masy. Następnie podane są podstawowe informacje nt. elektronicznych mierników cyfrowych i zastosowania komputera do wykonywania pomiarów napięcia.

2.1 Pomiar długości

W zależności od wielkości mierzonych długości i potrzebnej dokładności pomiaru stosujemy przymiar milimetrowy, suwmiarkę, śrubę mikrometryczną lub czujnik.

Pomiar długości przy pomocy przymiaru milimetrowego (czyli linijki) nie wymaga komentarza. Dokładność pomiaru jest rzędu 1 mm. Pomiary długości do kilkunastu cm z niepewnością $0,1 \div 0,05$ mm jest możliwe przy użyciu *suwmiarki* (rys. 2.1).

Rysunek 2.1: Suwmiarka i zasada odczytu noniusza



Podwyższenie dokładności pomiaru przy użyciu suwmiarki jest możliwe z dwu powodów. Po pierwsze, suwmiarka zaopatrzona jest w szczęki (nieruchoma i połączona z ruchomym suwakiem przyrządu), które umożliwiają dobre „przeniesienie” rozmiarów mierzonego przedmiotu na skalę suwmiarki. Szczęki A–A’, najczęściej używane, służą do pomiaru rozmiarów zewnętrznych mierzonych przedmiotów. Za pomocą szczęk

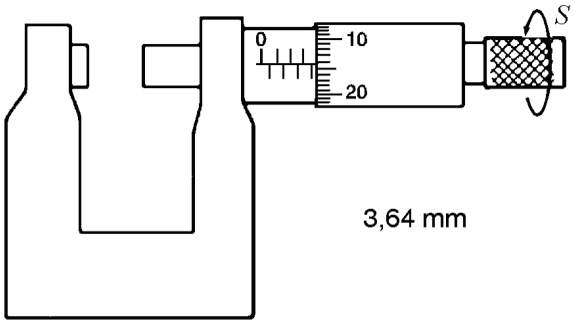
B–B' mierzymy średnice otworów i inne wymiary wewnętrzne. Większość suwmiarek posiada ponadto sztyft (nie pokazany na rysunku 2.1) do pomiaru głębokości otworów.

Drugim elementem umożliwiającym zwiększenie dokładności jest *noniusz*. Jest to dodatkowa skala na suwaku suwmiarki. Skala noniusza suwmiarki pokazanej na rysunku 2.1 posiada długość 9 mm, podzieloną na 10 części – zatem każda działka noniusza jest o $0,1$ mm mniejsza od działek skali głównej. Jeżeli suwmiarka nastawiona jest na dokładną wielokrotność milimetra, zerowa kreska noniusza przedłuża zerową kreskę skali milimetrowej. Po przesunięciu noniusza o np. $0,5$ mm piąta kreska skali noniusza przedłuża jedną z kresek skali głównej (piątą). Zatem zerowa kreska noniusza wskazuje ilość całych milimetrów, a numer kreski skali noniusza przedłużającej jedną z kresek skali milimetrowej jest równy ilości dziesiętnych milimetra. Przedstawiony noniusz o 10 kreskach umożliwia odczyt z dokładnością $0,1$ mm, w przypadku noniusza o 20 kreskach rozdzielczość wynosi $0,05$ mm.

Zasada noniusza bywa również stosowana do pomiaru kątów. W naszej pracowni spotyka się noniusz w spektrometrze z siatką dyfrakcyjną i w polarymetrze.

Śruba mikrometryczna (rys. 2.2) pozwala mierzyć z dokładnością do $0,01$ mm. Zgodnie z nazwą zasadniczym elementem przyrządu jest (niewidoczna z zewnątrz) precyzyjna śruba o skoku $0,5$ mm.

Rysunek 2.2: Śruba mikrometryczna



Mierzony przedmiot umieszcza się między nieruchomym i ruchomym kowadełkiem przyrządu i delikatnie dokręca śrubę. Dla zabezpieczenia śruby przed przesuwaniem się punktu zerowego na skutek zbyt mocnego dociskania szczęk, śruba jest zaopatrzona w sprzęgiełko (oznaczone przez S na rysunku 2.2) zapewniające zawsze ten sam nacisk. Zabezpiecza to również mierzony przedmiot przed zgnieceniem. Obrotu bębna z podziałką należy dokonywać obracając główkę sprzęgiełka.

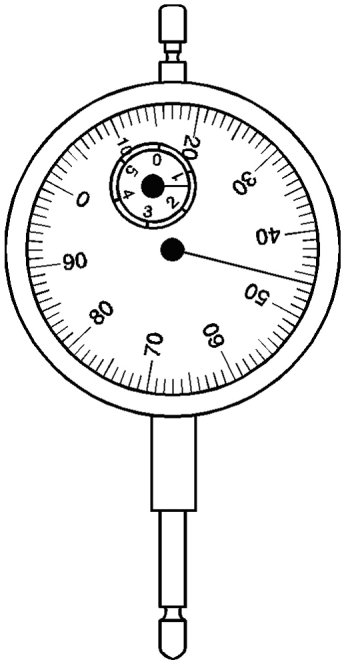
Wynik pomiaru odczytujemy przy użyciu dwu skal. Jedna – nieruchoma, ma podziałkę milimetrową z zaznaczonymi połówkami milimetrów. Druga skala znajduje się na bębnie mierzącym kąt obrotu śruby. Skala bębna jest podzielona na 50 działek. Ilość całych milimetrów i ewentualnie połówek milimetra mierzonej długości odczytuje się na skali nieruchomej. Do tej długości należy dodać wskazania bębna w zakresie od zera do $0,50$ mm.

Uwaga. *Patrz rysunek 2.2 pokazujący pomiar długości 3,64mm. Typowym błędem grubym przy pomiarze jest właśnie nieuwzględnienie połówki milimetra przy odczycie.!*

Przed przystąpieniem do pomiarów należy sprawdzić, czy przy zetknięciu się kowadełek wskazanie skali jest zerowe. Jeśli nie, należy przy pomiarach uwzględnić odpowiednią poprawkę.

Czujnik zegarowy (rys. 2.3) podobnie jak śruba mikrometryczna ma dokładność $0,01$ mm. Pomiar przy pomocy czujnika jest szybki i wygodny, ale w praktyce czujnikiem można mierzyć tylko przesunięcie czyli zmianę długości, jak np. wydłużenie drutu pod wpływem przyłożonej siły. Przesunięcie suwaka czujnika za pomocą układu kół zębatych przenosi się na dwie wskazówki. Wskazówka duża wykonuje pełny obrót przy przesunięciu o 1 mm. Skala wskazówki dużej podzielona jest na 100 części, więc jednej działce odpowiada $0,01$ mm. Wskazówka mała pokazuje liczbę całych milimetrów.

Rysunek 2.3: Czujnik zegarowy



2.2 Pomiar czasu

Podstawową metodą pomiaru czasu jest porównanie badanego interwału czasu z liczbą okresów zjawisk periodycznych. Przykładowo, Galileusz mierzył czas w swoich doświadczeniach nad ruchem jednostajnie przyśpieszonym przez liczenie własnego pulsu. W *zegarach mechanicznych* tym zjawiskiem okresowym są oscylacje balansu zegara, zależne od momentu bezwładności balansu i momentu siły wytworzonego przez spiralną sprężynkę. Drgania balansu zliczane są przez układ kół zębatych sprzężonych ze wskazówkami.

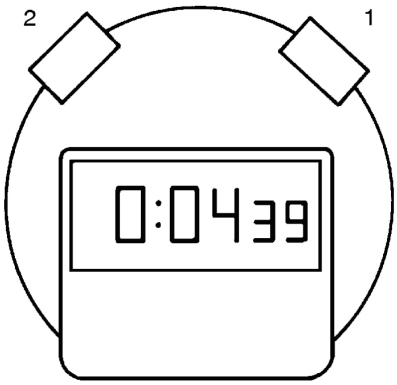
Obecnie prawie wszystkie pomiary czasu wykonuje się przy użyciu *elektronicznych zegarów kwarcowych*. Podstawą wysokiej dokładności czasomierzy kwarcowych jest też zjawisko mechaniczne – szybkie drgania małej płytki wyciętej z kryształu kwarcu (SiO_2). Odpowiedni układ elektroniczny potrzebny jest natomiast – jak wychwyt w zegarku mechanicznym – do podtrzymania drgań płytki, przy czym sprzężenie mechanicznych drgań płytki z odpowiednim obwodem elektrycznym jest możliwe dzięki piezoelektrycznym własnościom kwarcu. Rezultat pomiaru przedstawiony jest zwykle na wyświetlaczu cyfrowym, może być wtórnie przetworzony na ruch wskazówki. Niepewność względna nawet najtańszych zegarów kwarcowych jest rzędu 10^{-6}.

Sekundomierz (stoper) stanowi rodzaj zegarka przystosowanego do pomiaru krótkich odstępów czasu. Istotną cechą sekundomierza jest układ przycisków umożliwiających jego jak najłatwiejsze uruchamianie i zatrzymywanie.

Rysunek 2.4 pokazuje schemat wyglądu sekundomierza kwarcowego. Rezultat pomiaru odczytujemy na wskaźniku ciekłokrystalicznym. Rozdzielczość przyrządu, równa $0,01$ s, nie oznacza dokładności pomiaru. Niepewność pomiaru czasu, określona przez czas ludzkiej reakcji, jest rzędu $0,1$ s.

Obok zegarów zwykłych i sekundomierzy, oscylator kwarcowy znajduje się w każdym *komputerze*. Jego częstotliwość określa szybkość działania mikroprocesora komputera. Przy okazji komputer pełni rolę zegara z datownikiem. Przyrządem do pomiaru czasu w szybkich przebiegach elektrycznych może być *karta oscyloskopowa* (omawiana w podrozdziale 2.5), której działanie jest też sterowane wewnętrznym zegarem kwarcowym.

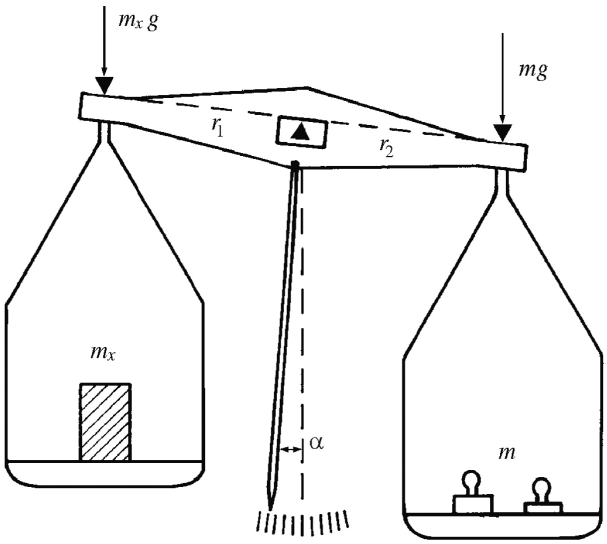
Rysunek 2.4: Sekundomierz elektroniczny. Przycisk (1) służy do uruchamiania i zatrzymywania stopera, przycisk (2) do zerowania jego wskazań



2.3 Pomiar masy

Waga mechaniczna jest przyrządem do pomiaru masy używanym przez ludzkość od niepamiętnych czasów. Rysunek 2.5 przedstawia schemat używanej w Pracowni *szalkowej wagi laboratoryjnej*. Przyrząd składa się z belki, szalek, wskaźnika równowagi i urządzenia do aretowania, czyli unieruchamiania wagi (nie pokazane na rysunku). Belka i szalki wsparte są na ostrzach pryzmatów, co ogranicza do minimum wpływ tarcia i pozwala na dokładne określenie długości ramion.

Rysunek 2.5: Waga szalkowa



Waga jest rodzajem dźwigni dwuramiennej, o ramionach równych r_1 i r_2. W stanie równowagi zachodzi równość momentów sił pochodzących od ważonej masy m_x i masy odważników m

$$m_x g r_2 = m g r_1 \tag{2.1}$$

W przypadku *wagi elektronicznej* ciężar $m_x g$ ważonego przedmiotu równoważony jest przez siłę elek-

trodynamiczną wytwarzaną przez cewkę z prądem umieszczoną w polu magnetycznym wytwarzanym przez magnes trwały (konstrukcja siłownika jest podobna do konstrukcji głośnika). Równowagę ciężaru ciała i siły elektrodynamicznej można zapisać w postaci równania

$$m_x\, g = B\, i\, l \tag{2.2}$$

gdzie:
B – indukcja pola,
i – natężenie prądu,
l – długość przewodnika.

Stan równowagi wagi elektronicznej uzyskiwany jest w sposób automatyczny za pomocą układu elektronicznego, który generuje prąd o takim natężeniu, by uzyskać zerowanie wskaźnika równowagi wagi. Wartość prądu przeliczona na jednostki masy jest wyświetlana w postaci cyfrowej.

Wielką zaletą wag elektronicznych jest szybkość i wygoda odczytu.

2.4 Mierniki cyfrowe

Ostatnie trzy dziesięciolecia są okresem rewolucji w miernictwie polegającej na zastąpieniu przyrządów analogowych przez elektroniczne mierniki cyfrowe, tak w praktycznie wszystkich pomiarach elektrycznych, jak i w wielu innych pomiarach (np. zegarki, wagi elektroniczne, termometry). W porównaniu do przyrządów mechanicznych i elektrycznych mierników wskazówkowych elektroniczne przyrządy cyfrowe charakteryzują się:

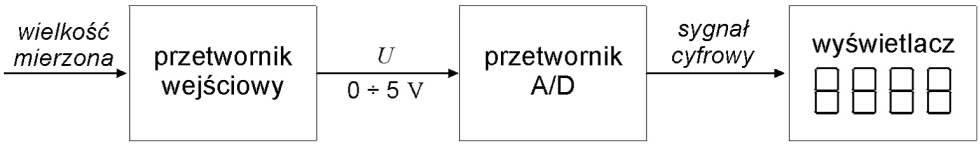
– wielką dokładnością, przewyższającą dokładność przyrządów tradycyjnych;

– wygodnym odczytem, pozbawionym błędów wynikających z niestaranności obserwatora.

Zasada działania

Ogólny schemat blokowy miernika cyfrowego[1] przedstawia rysunek 2.6. Mierzona wielkość fizyczna (napięcie, natężenie prądu, rezystancja, temperatura, masa) powoduje w *przetworniku wejściowym* wygenerowanie napięcia stałego (zwykle w przedziale ± 5 V). W miernikach elektrycznych: *amperomierzach*, *woltomierzach*, *omomierzach*, *miernikach pojemności* etc., przetwornikiem wejściowym jest odpowiedni układ elektroniczny. W przypadku mierników wielkości nieelektrycznych bywa różnie – kluczowym elementem przetwornika wagi elektronicznej jest opisany poprzednio przetwornik magnetoelektryczny, działanie cyfrowego termometru opiera się elemencie, którego rezystancja zależy od temperatury.

Rysunek 2.6: Ogólny schemat blokowy miernika cyfrowego



[1] Przyrządem, który wyłamuje się z przedstawionego schematu jest zegar kwarcowy. Sygnał pochodzący z drgającej płytki SiO_2 ma od początku charakter cyfrowy i wymaga tylko przeliczenia.

Napięcie stałe (proporcjonalne do mierzonej wielkości) jest następnie przetworzone na sygnał cyfrowy w przetworniku analogowo-cyfrowym (A/D). Przetwornik taki jest bardzo złożonym przyrządem elektronicznym, ale możliwość jego produkcji w postaci obwodu scalonego powoduje tak niską cenę jak i pewność działania tego elementu.

Sygnał cyfrowy jest uwidoczniony za pomocą wyświetlacza (displeja). Zasada działania wyświetlaczy jest różna: displeje ciekłokrystaliczne wymagają oświetlenia zewnętrznego, wyświetlacze złożone z lamp neonowych i diod elektroluminescencyjnych świecą własnym światłem. Wiele przyrządów cyfrowych umożliwia wprowadzenie sygnału cyfrowego – przy użyciu specjalnego złącza – do pamięci komputera.

Z przedstawionego ogólnego schematu miernika cyfrowego (rys. 2.6) wynika, że tylko przetwornik wejściowy określa rodzaj mierzonej wielkości. Logiczne jest połączenie różnych funkcji pomiarowych w jednym przyrządzie, przy wykorzystaniu tego samego przetwornika A/D i wyświetlacza. Przyrząd do pomiaru napięcia, prądu, rezystancji, etc. nazywany jest krótko multimetrem. Miernik LCR jest, jak łatwo zgadnąć, przyrządem umożliwiającym pomiar indukcyjności, pojemności i rezystancji.

Parametry mierników cyfrowych

Omówione poniżej cechy są wspólne dla wszystkich (lub prawie wszystkich) mierników cyfrowych. Określone typy mierników mogą się ponadto charakteryzować specyficznymi parametrami. Na przykład dla amperomierzy i woltomierzy parametrem takim jest oporność wewnętrzna.

Zakres pomiarowy

Zakresem nazywamy największą wartość mierzoną x, jaką miernik może zmierzyć. Większość przyrządów cyfrowych jest wielozakresowa, np. woltomierz laboratoryjny V540 i podobne mierzą napięcie stałe na zakresach: 100 mV, 1 V, 10 V, 100 V i 1000 V. Zakres zmieniamy za pomocą przełącznika.

Właściwym sposobem postępowania jest rozpoczynanie pomiaru nieznanej wielkości na maksymalnym zakresie. Następnie zakres zmniejszamy, gdyż na najniższym możliwym zakresie tak rozdzielczość jak i dokładność pomiaru jest największa.

Rozdzielczość

Oznacza zdolność przyrządu do wykrycia zmiany wielkości mierzonej. W przyrządach cyfrowych jest określona jako zmiana wielkości mierzonej odpowiadająca przeskokowi ostatniej cyfry, oznaczana symbolem δx, i zwana też działką elementarną (wzór 9, rozdziału pierwszego).

Dla tego samego zakresu rozdzielczość jest tym większa im większa jest liczba cyfr. Miernik n-cyfrowy dzieli zakres pomiarowy na 10^n części. Przykładowo, dla 4-cyfrowego woltomierza laboratoryjnego V540 działka elementarna przyrządu pracującego na zakresie 10 V wynosi

$$\delta U = 10\ \mathrm{V}/10^4 = 1\ \mathrm{mV}$$

Określenie „miernik $3\frac{1}{2}$ – cyfrowy” oznacza miernik o zakresie wyświetlanych cyfr od 0 do 1999. Zatem pierwsza cyfra jest „niepełnowartościowa”, δU= zakres/2000. Większość cyfrowych przyrządów podręcznych stanowią właśnie mierniki $3\frac{1}{2}$ – cyfrowe.

Niepewność pomiaru

Rozdzielczość przyrządu nie jest równoznaczna z niepewnością pomiaru. Sposób określania niepewności przyrządów cyfrowych omówiony był w podrozdziale 4 rozdziału 1. Dwa składniki podanego tamże wzoru 10 to:

1) składnik proporcjonalny do mierzonej wielkości; zależny przede wszystkim od jakości przetwornika wejściowego;

2) składnik proporcjonalny do zakresu; powodowany głównie przez przetwornik analogowo–cyfrowy i często równy działce elementarnej δx.

Wzór 10 (rozdział 1) podany jest zwykle w instrukcji obsługi w postaci słownej. Np. dla woltomierzy V540 maksymalna niepewność pomiaru napięcia stałego określony jest jako $0,05\,\%$ wartości mierzonej $+0,01\,\%$ zakresu. Przykładowo, przy pomiarze napięcia np. 6 V na zakresie 10 V maksymalna niepewność pomiaru wynosi

$$\Delta U = \frac{0,05\,\%}{100\,\%}\,6\ \mathrm{V} + \frac{0,01\,\%}{100\,\%}\,10\ \mathrm{V} = 4\ \mathrm{mV}$$

Zerowanie przyrządu

Dla wielkości mierzonej równej zeru miernik winien wskazywać zero – jest to warunkiem uzyskania znamionowej dokładności wskazań. Przyrząd zeruje się za pomocą odpowiedniego pokrętła lub sztyftu obracanego śrubokrętem.

2.5 Komputer jako miernik napięcia

Komputer dokonał przełomu w miernictwie, gdyż umożliwia: automatyczny zapis wyników pomiaru, ich analizę matematyczną, wykonanie wykresu i nierzadko sterowanie procesem pomiaru. Komputeryzacja pomiarów jest zatem obszerną dziedziną wiedzy. Poniżej podajemy podstawowe informacje niezbędne do wykonania tych ćwiczeń, w których komputer wykorzystywany jest jako miernik szybkich przebiegów napięciowych.

W celu wprowadzenia badanego napięcia do komputera używamy odpowiedniej karty umieszczonej w jego obudowie. Podstawowym elementem karty jest przetwornik analogowo–cyfrowy (A/D), zamieniający badane napięcie na sygnał cyfrowy. Działaniem karty steruje odpowiedni program komputerowy.

Kartą oscyloskopową nazywamy kartę do zbierania danych, którą cechuje niezbyt duża rozdzielczość, natomiast wielka szybkość zbierania danych. Przy dużej szybkości próbkowania informacja cyfrowa musi być najpierw zapisana w pamięci buforowej karty i dopiero po wykonaniu pomiaru przesłana do komputera. Nazwa karty wynika stąd, że komputer z kartą oscyloskopową zastępuje wszystkie funkcje tradycyjnego oscyloskopu analogowego. Zestaw karta–komputer cechuje zdecydowanie wyższa dokładność, łatwość obsługi (brak kłopotów z synchronizacją), możliwość obserwacji przebiegów jednorazowych, i w sumie niższa cena. Komputer z kartą oscyloskopową można też uważać za szybki woltomierz, który wykonuje w zadanym przez użytkownika czasie kolejno np. 8192 pomiary napięcia i wyświetla w formie krzywej $U(t)$ na monitorze komputera.

Rysunek 2.7 przedstawia rzeczywisty wygląd używanej w Pracowni karty produkcji krakowskiej firmy ARCO. Mierzony sygnał podajemy przewodem koncentrycznym do górnego gniazda wejściowego (a). Napięcie jest następnie wzmocnione przez wzmacniacz (b) i przetworzone na sygnał cyfrowy w przetworniku A/C (c). Przetwornik posiada rozdzielczość 8 bitów, co oznacza, że mierzone napięcie przetworzone jest na liczby binarne od 0 do 255. Parametry wzmacniacza dobrano tak, by 1 bitowi odpowiadało napięcie równo $0,01$ V, w rezultacie zakres mierzonych napięć wynosi $\pm 1,28$ V. W celu rozszerzenia zakresu zastosować należy kabel wejściowy z dodatkowym opornikiem, który razem z opornością wejściową wzmacniacza równą 1 MΩ utworzy oporowy dzielnik napięcia.

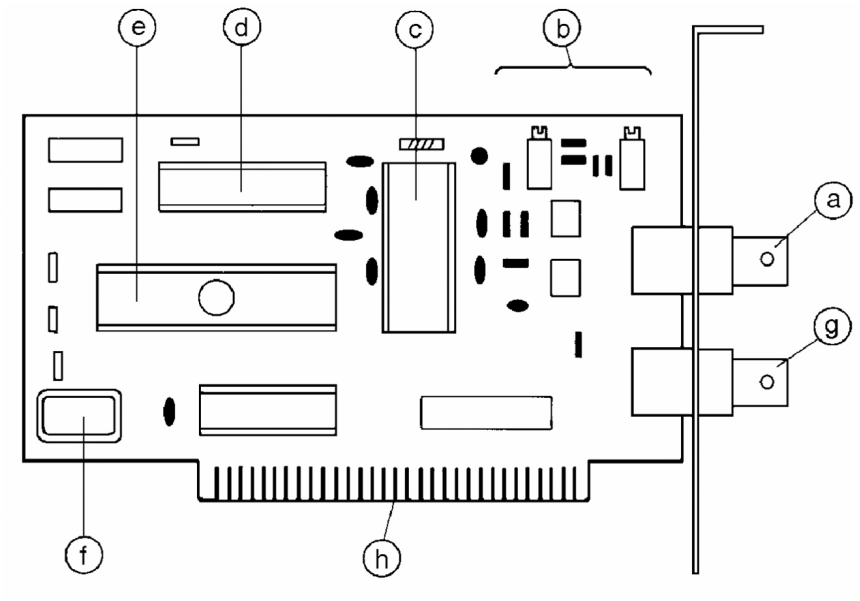
Pamięć buforowa (d) ma pojemność 8 kilobajtów, co umożliwia zapamiętanie $2^{13} = 8192$ wartości napięcia. Działaniem karty steruje programowalny sterownik (e), dokładność pomiaru czasu zapewnia zegar 20 MHz stabilizowany kwarcem (f). Zasilanie karty w napięcie oraz przesyłanie sygnałów cyfrowych do komputera odbywa się za pośrednictwem złącza krawędziowego (h). Początek pomiaru określa sygnał z klawiatury komputera, wejście wyzwalające (g) nie jest używane.

Działaniem karty steruje program OSC.EXE, maksymalnie uproszczony, aby mógł być używany przez osoby nie obeznane z informatyką. w przypadku komputerów bez twardego dysku program zgłasza się samoczynnie po jego włączeniu. Dalsze czynności podawane są kolejno na monitorze, ale opiszemy je pokrótce.

– Jedyną czynnością przed wyzwoleniem pomiaru jest wybór szybkości pomiaru określonej przez częstotliwość próbkowania f, względnie całkowity czas pomiaru równy $8192/f$. Wybór czasu pomiaru: $40,96$ ms, $80,92$ ms, $819,2$ ms lub $8,192$ s następuje przy użyciu klawiszów $\uparrow$ i $\downarrow$.

– Wyzwolenie pomiaru następuje przez naciśnięcie ENTER. Po zarejestrowaniu pomiaru przebieg $U(t)$ jest od razu wyświetlony na monitorze.

Rysunek 2.7: Karta oscyloskopowa OSC-20



– Oprócz przebiegu w polu wykresu znajduje się pionowa kreska zwana kursorem. Główną funkcją kursora jest odczyt wartości napięcia U (w woltach) i czasu t (w ms) dla wskazywanego przez kursor punktu krzywej $U(t)$. Kursor przesuwany jest w lewo lub prawo klawiszami >, < (przesuw szybki) oraz $\rightarrow$, $\leftarrow$, (przesuw wolny).

– Kolejne użycie klawisza „+” powoduje 2-, 4-, 8- i 16-krotne rozciągnięcie skali czasu. Przed użyciem „lupy czasowej” najechać należy kursorem na interesujący nas fragment $U(t)$. (Warto wiedzieć, że linia wykresu $U(t)$ na ekranie składa się z 512 punktów, początkowo wyświetlany jest co 16 punkt zarejestrowany w pamięci karty. Użycie lupy czasowej umożliwia pokazanie i odczyt współrzędnych każdego z 8192 punktów). Powrót do pierwotnej skali czasu przez naciskanie klawisza „−”.

– Powrót do przygotowania następnego pomiaru przy użyciu klawisza HOME.

Prostym testem działania układu karta–komputer jest wyzwolenie pomiaru z wtyczką kabelka wejściowego trzymaną w ręce. Nasze ciało działa jako antena, powinniśmy zarejestrować okresowy przebieg o częstotliwości sieci 50 Hz.