

Pomiary metodami cyfrowymi

Wszystkie wielkości fizyczne , które mogą być przedmiotem pomiaru, dzielimy na :

- **Ciągłe**
- **Ziarniste** (dyskretne lub skwantowane)

-Do ciągłych zaliczamy takie , które są ciągłymi funkcjami w funkcji czasu np. napięcie przemienne i zmienne, przemieszczenie liniowe i kątowe , ciśnienie itp..

-Do wielkości ziarnistych zaliczamy takie , które mogą tylko przybierać skończoną liczbę wartości będących wielokrotnością pewnej wielkości minimalnej (tzw. ziarno lub kwant). Przykładami takich wielkości są częstotliwość , liczba obrotów , liczba przedmiotów na taśmie itp..

Pomiary wielkości ziarnistych

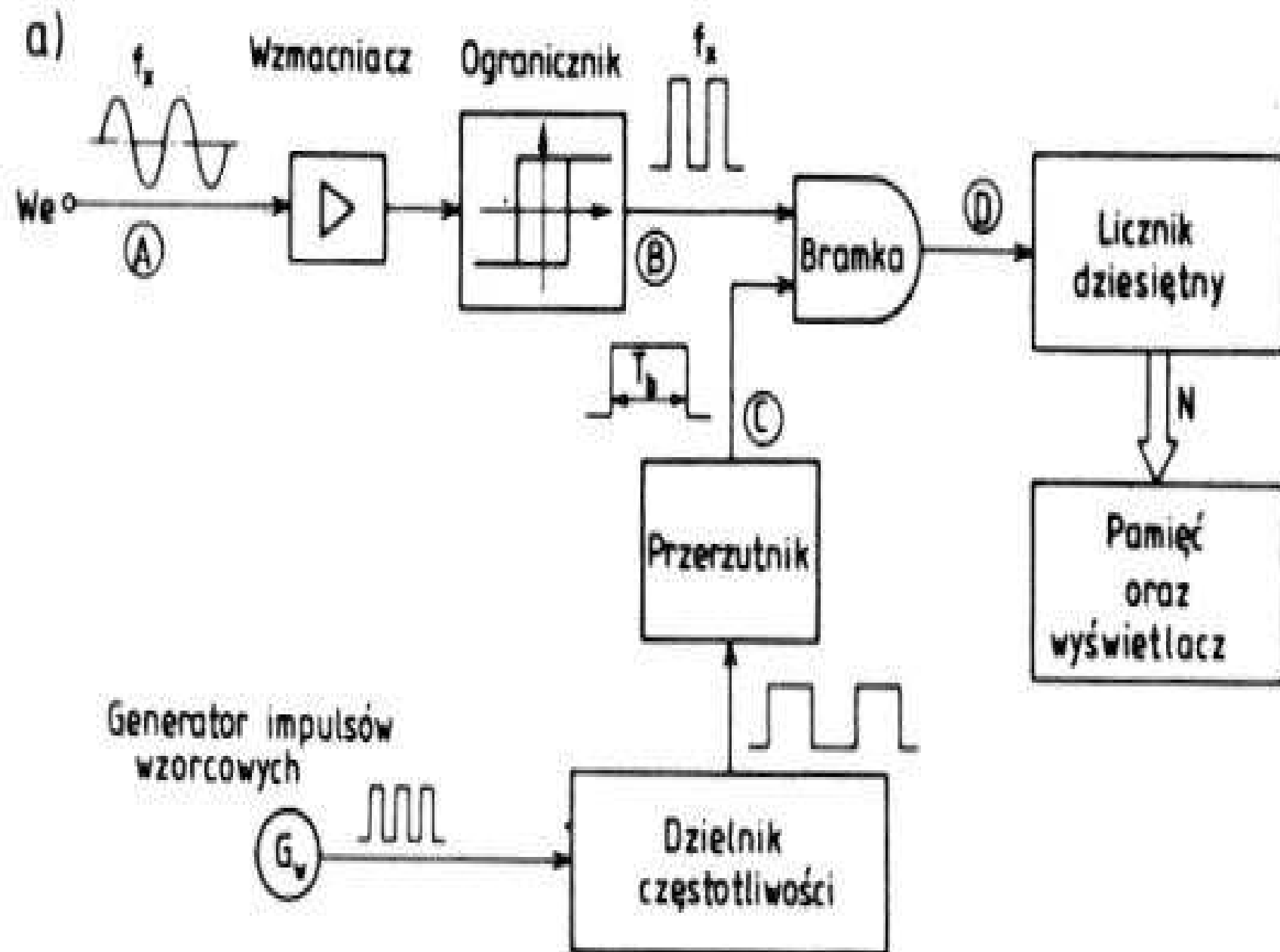
1. Pomiar częstotliwości

polega na zliczaniu okresów sygnału w ściśle określonym czasie, zwanym czasem otwarcia bramki [11]. Schemat blokowy układu realizującego to zliczanie pokazano na rys.1. Jest to najprostszy układ częstotściomierza cyfrowego. Częstotliwość mierzona f_x jest określana na podstawie wskazań stanu licznika N i czasu otwarcia bramki T_b ze wzoru :

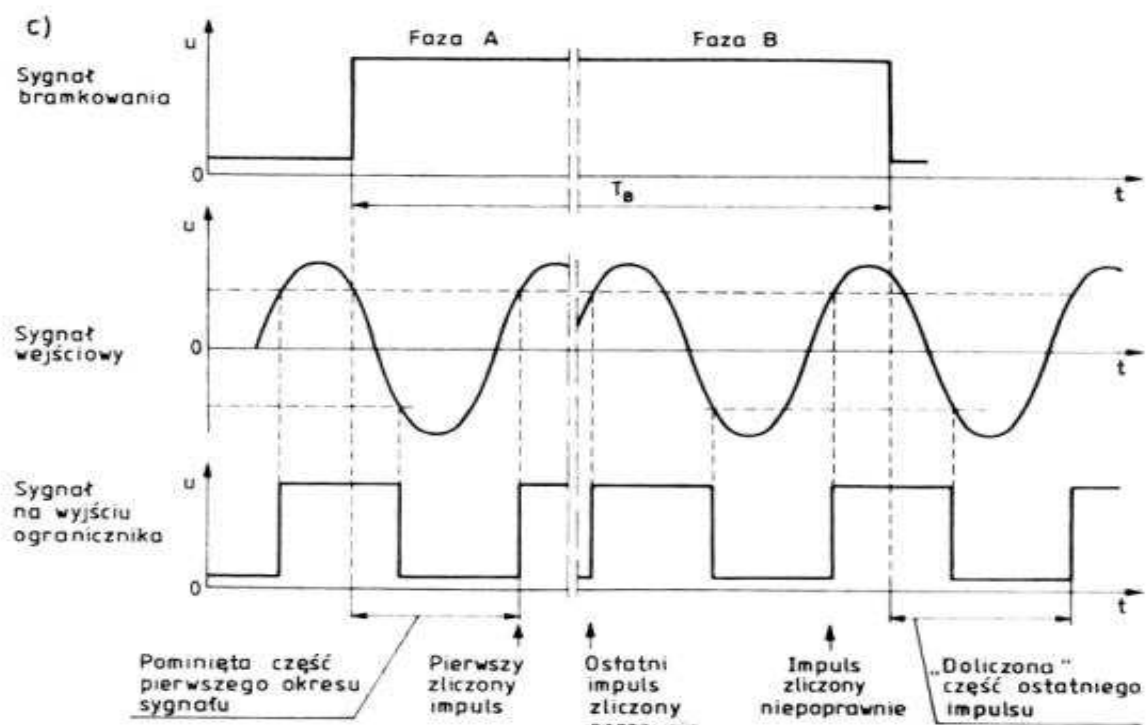
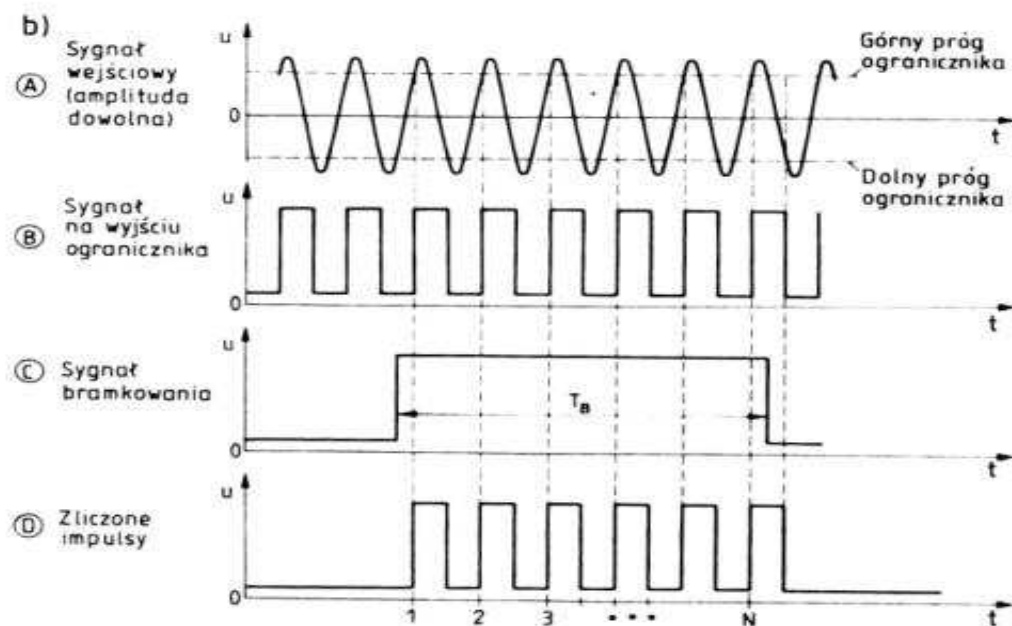
$$f = N / T_{\text{bramki}}$$

Zasadę pomiaru częstotliwości ilustruje rysunek. Bramka pozostaje otwarta przez czas T_b , przepuszczając impulsy z wyjścia układu wejściowego na wejście licznika dziesiętnego.

Wzmacniacz wejściowy z układem ogranicznika przetwarza sygnał wejściowy o dowolnym kształcie i dowolnej wartości amplitudy (w zakresie odpowiednim dla danego przyrządu) na sygnał prostokątny o takiej samej częstotliwości. Progi przełączania w układzie ogranicznika mogą być dobierane ręcznie lub regulowane automatycznie, co umożliwia prawidłowy pomiar częstotliwości niezależnie od wartości amplitudy sygnału wejściowego.



Przebiegi czasowe
w poszczególnych
punktach układu



Generator impulsów wzorcowych jest oscylatorem, najczęściej kwarcowym, o bardzo dużej stabilności i dokładnie znanej częstotliwości sygnału wyjściowego.

Typowe wartości częstotliwości tych generatorów wynoszą 1,5 - 10 MHz.

Dekadowy dzielnik częstotliwości impulsów wzorcowych umożliwia odmierzanie czasu otwarcia bramki T_b równego pewnej, ustawionej na tym dzielniku, krotności okresu impulsów wzorcowych. Stosowanie dekadowego (tj. dziesiętnego) podziału pozwala na uzyskanie zmiany zakresów w stosunku 1:10 k , ($k = 0, 1, 2, \dots$).

Bramka jest układem umożliwiającym odblokowanie wejścia licznika dziesiętnego na czas T_b oraz zablokowanie wejścia poza tym czasem.

Bramka jest układem umożliwiającym odblokowanie wejścia licznika dziesiętnego na czas T_b oraz zablokowanie wejścia poza tym czasem.

Licznik dziesiętny zlicza impulsy prostokątne "przepuszczane" przez bramkę w czasie T_b . Po zakończeniu tego czasu stan licznika jest proporcjonalny do mierzonej częstotliwości.

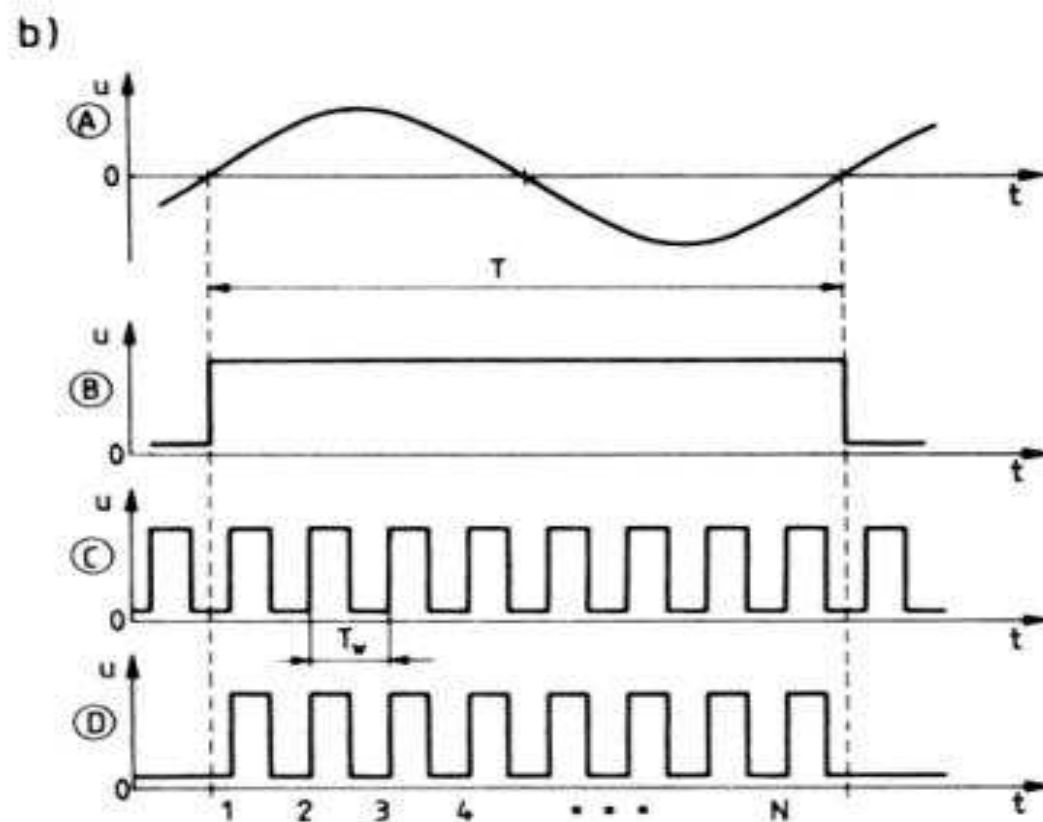
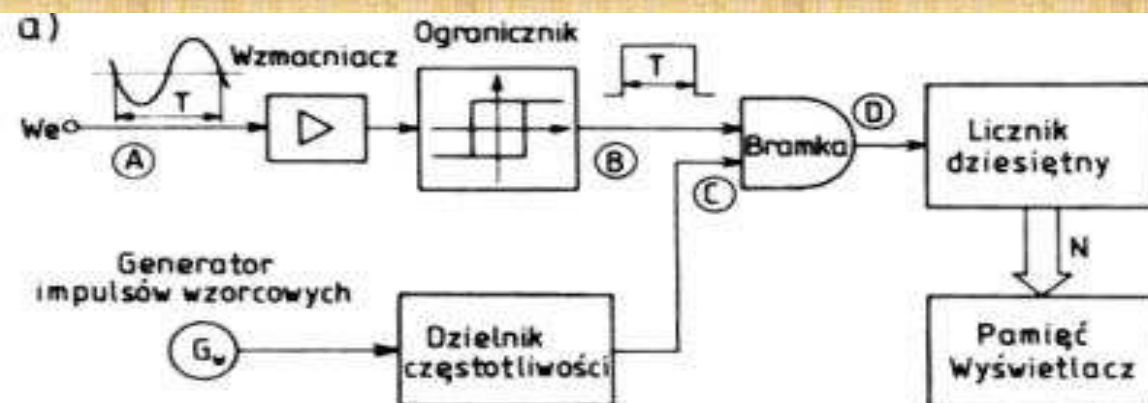
Układ pamięci wyniku pozwala na zapamiętanie zawartości licznika i jej wyświetlanie na wyświetlaczu numerycznym (cyfrowym).

Zliczanie impulsów odbywa się cyklicznie, tj. po zakończeniu bieżącego cyklu zliczania wynik zostaje wpisany do pamięci i jest wyświetlany, podczas gdy licznik automatycznie rozpoczyna kolejny cykl zliczania.

2. Układ pomiarowy okresomierza cyfrowego pokazano na rysunku a zasadę pomiaru objaśniono na rysunku następnym.

Analogicznie jak przy pomiarze częstotliwości, przy pomiarze okresu powstają błędy zliczania. Ich przyczyną jest w tym przypadku niedoliczenie impulsu wzorcowego (poprzednio był to impuls odpowiadający sygnałowi mierzonemu) lub zliczenie impulsu, który nie zakończy się przed upływem mierzonego okresu.

Podobnie jak przy pomiarze częstotliwości niepewność wyniku pomiaru jest duża w przypadku małej liczby zliczonych impulsów. Zwiększenie dokładności pomiarów jest możliwe przez zmniejszenie okresu T_w . Przy pomiarach okresu sygnałów o wielkiej częstotliwości są trudności z wygenerowaniem sygnału wzorcowego o odpowiednio krótkim okresie T_w (czyli bardzo wielkiej częstotliwości). W takim przypadku mierzy się częstotliwość sygnału badanego i oblicza się jego okres. Niepewność pomiaru (ze względu na błąd zliczania) będzie wówczas bardzo mała, nawet przy stosunkowo krótkich czasach bramkowania.



Okresomierz cyfrowy: a) schemat strukturalny; b) czasowe przebiegi sygnałów w wybranych punktach układu

3. Pomiar przedziału czasu metodą cyfrową jest analogiczny do pomiaru okresu.

Początek zliczania jest wyznaczony przez początek mierzonego przedziału czasu, a koniec zliczania przez koniec tego przedziału. Jeżeli przedział (odstęp) czasu jest wyznaczony przez dwa impulsy:

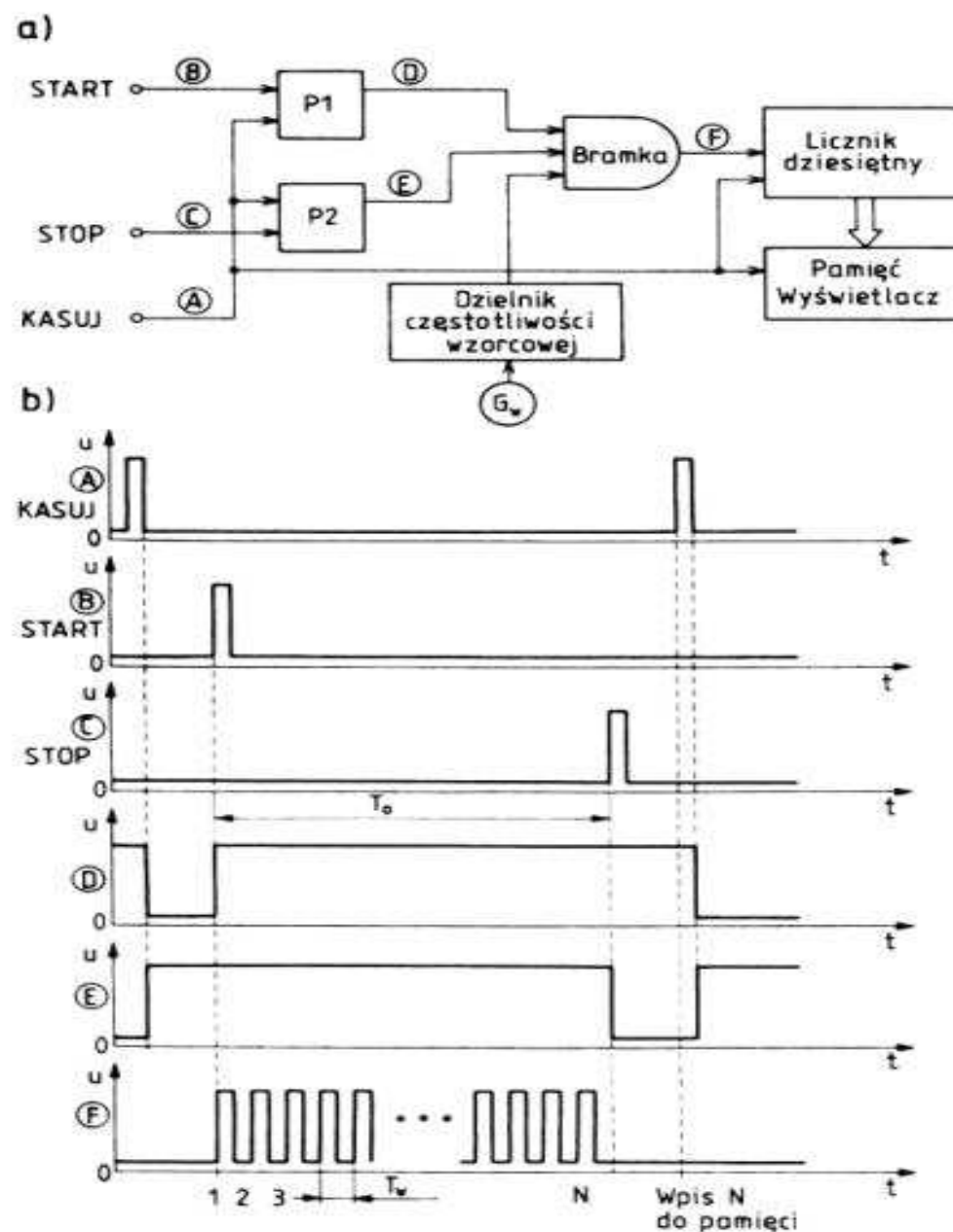
START i STOP, to pomiar może być dokonany w układzie jak na rysunku

Pierwszy impuls KASUJ przygotowuje układ do pomiaru, tj. zeruje przerzutnik P1, ustawia w stan wysoki przerzutnik P2 i zeruje licznik dziesiętny.

Impuls START za pomocą przerzutnika P1 powoduje otwarcie bramki i rozpoczęcie zliczania impulsów wzorcowych.

Impuls STOP za pomocą przerzutnika P2 powoduje zamknięcie bramki i zakończenie zliczania impulsów.

Kolejny impuls KASUJ powoduje przepisanie wyniku do pamięci i jego wyświetlenie, a jednocześnie przygotowuje układ do kolejnego pomiaru.



Cyfrowy pomiar przedziału czasu: a) schemat strukturalny; b) czasowe przebiegi sygnałów w wybranych punktach układu

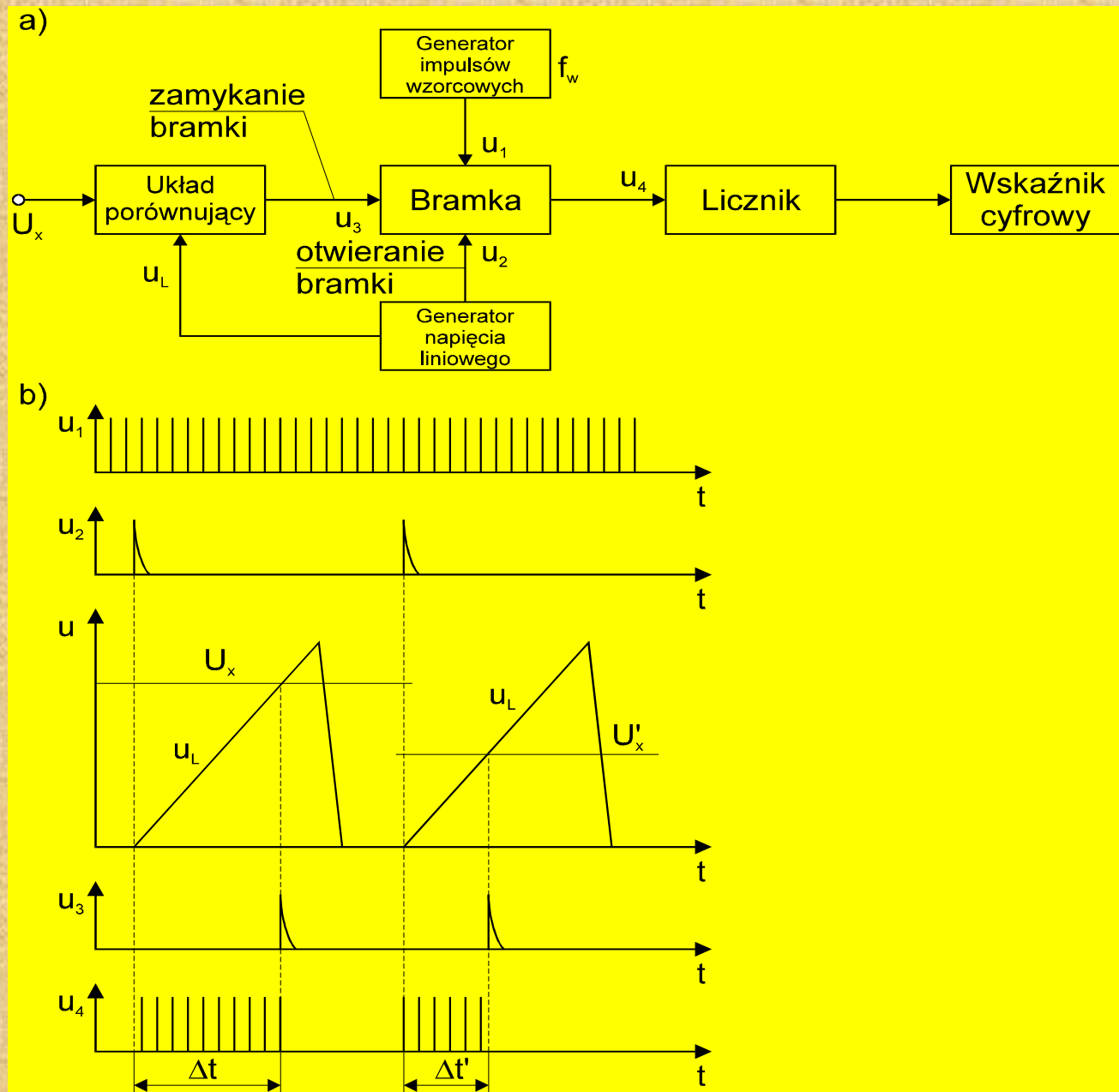
POMIARY NAPIĘCIA STAŁEGO METODAMI CYFROWYMI

Stosowane obecnie woltomierze cyfrowe wykorzystujące przetwarzanie analogowo-cyfrowe z miarą czasu można podzielić na trzy grupy:

- woltomierze impulsowo-czasowe
- woltomierze całkujące z przetwarzaniem napięcie-częstotliwość
- woltomierze całkujące z przetwornikiem napięcie-czas zwane również woltomierzami o podwójnym całkowaniu

Najprostszym układowo jest woltomierz cyfrowy z **przetwarzaniem impulsowo-czasowym**.

Istotą pomiaru jest przetwarzanie napięcia na czas. Schemat blokowy woltomierza tego typu na rysunku



Napięcie mierzone U_x jest porównywane w układzie porównującym z napięciem narastającym liniowo u_L , wytwarzanym w specjalnym generatorze. W chwili zrównania się napięć U_x oraz u_L na wyjściu układu porównującego pojawia się impuls u_3 zamykający bramkę elektroniczną. Otwarcie bramki następuje jednocześnie ze startem generatora napięcia liniowego (impuls u_2). Przez otwartą bramkę w czasie Dt przechodzą impulsy wytwarzane przez generator impulsów wzorcowych, które są zliczane przez licznik. Przy odpowiednim doborze szybkości narastania napięcia liniowego, częstotliwości impulsów wzorcowych wartość mierzonego napięcia może być bezpośrednio odczytana ze stanu licznika na wskaźniku cyfrowym. Jeżeli przez n oznaczmy liczbę impulsów zliczonych przez licznik w czasie Dt , zaś przez f_w częstotliwość impulsów wzorcowych to spełnione jest równanie:

$$n = \frac{U_x}{\alpha} \cdot f_w = k \cdot U_x$$

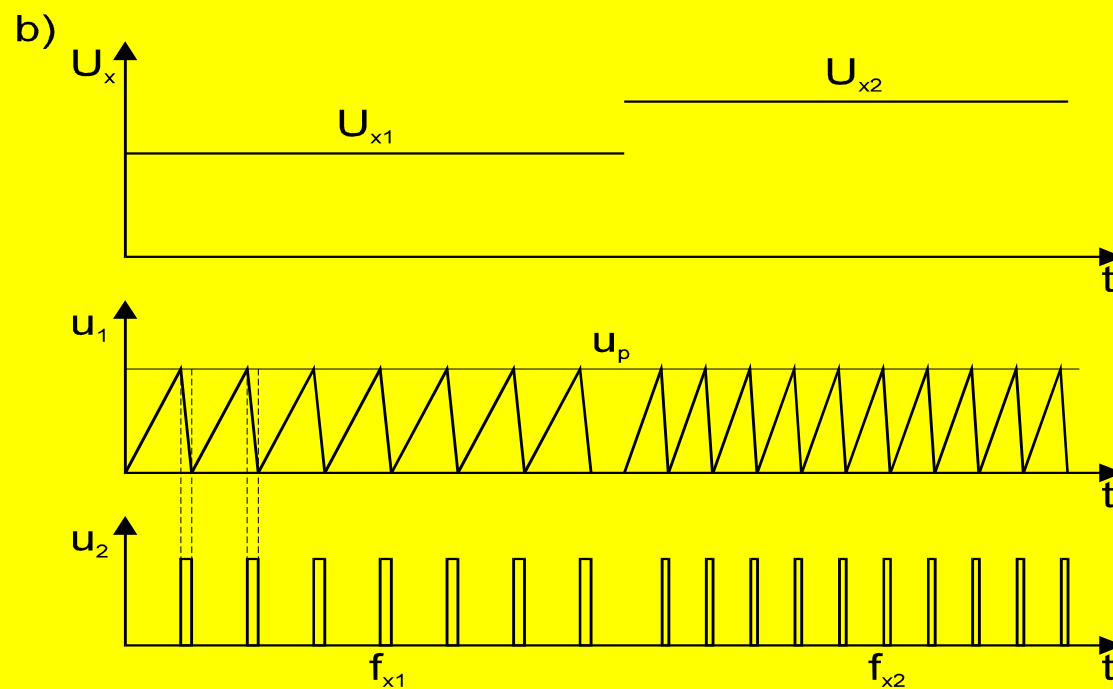
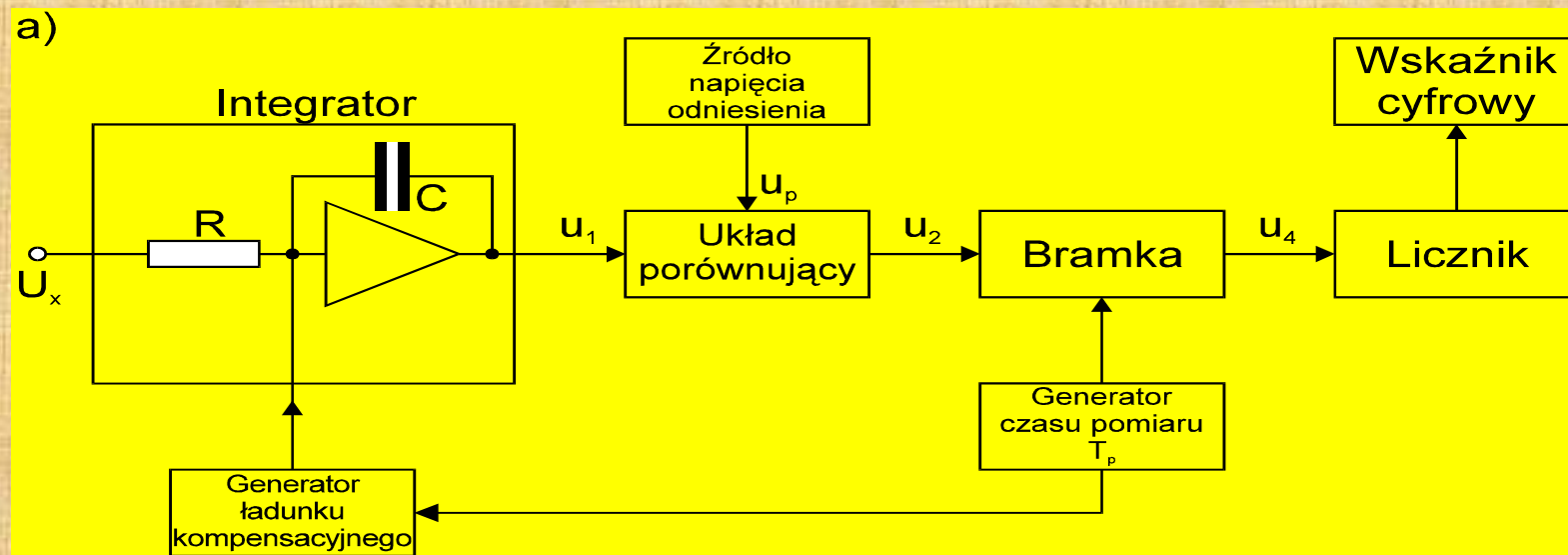
gdzie: α - nachylenie napięcia liniowego [V/s]

Jeżeli wybrać $k=10c$, gdzie c jest liczbą całkowitą to cyfry wskazywane przez licznik będą jednocześnie cyframi znaczącymi mierzonego napięcia.

Pomiar napięcia odbywa się cyklicznie. Jest on powtarzany automatycznie z częstotliwością (1,5)Hz. Częstotliwość generatora impulsów wzorcowych wynosi najczęściej 100kHz, 200kHz lub 1MHz. Woltomierze tego typu są stosunkowo mało dokładne (do 0,1%) i wrażliwe na zakłócenia.

W opisanym powyżej woltomierzu cyfrowym, mierzona jest wartość napięcia w chwili jego skompensowania napięciem wzorcowym zmieniającym się liniowo. Wobec tego, w przypadku, gdy chwilowa wartość napięcia zmienia się w czasie trwania pomiaru, np. wskutek przypadkowych zakłóceń, powstaje dodatkowy błąd pomiaru.,

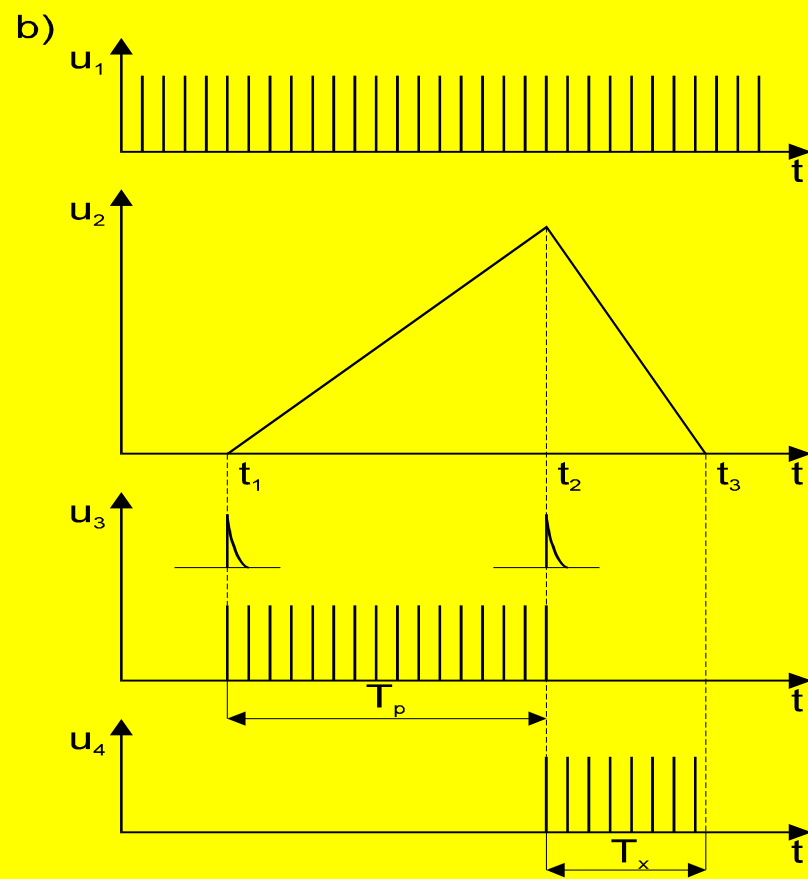
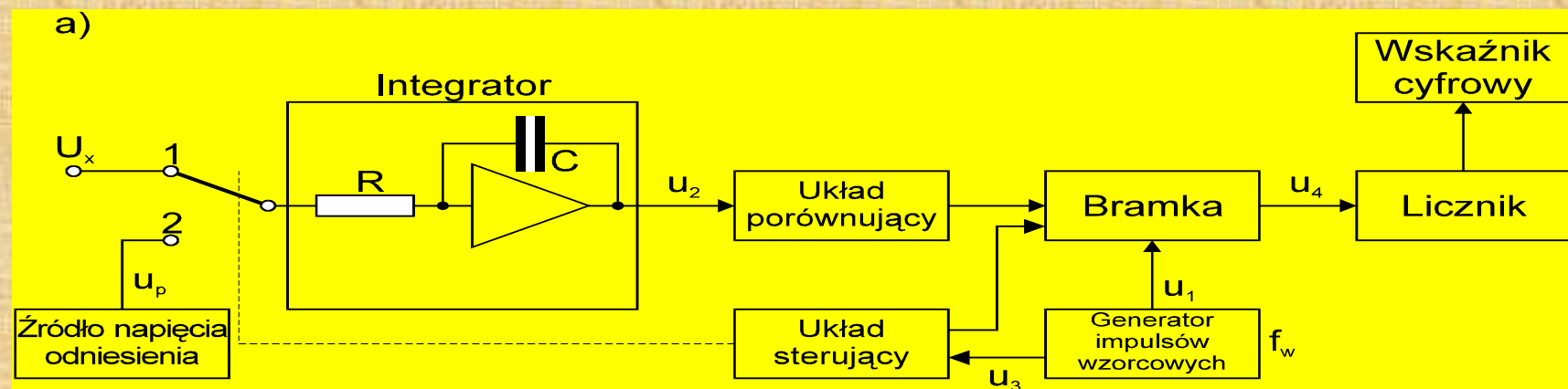
W woltomierzu całkującym z przetwarzaniem napięcie-częstotliwość przedstawionym na *rysunku* układ przetwarzania składa się z integratora (układu całkującego), układu porównującego i generatora ładunku kompensacyjnego. Działanie układu jest następujące: napięcie mierzone U_x doprowadzone do wejścia integratora wywołuje na jego wyjściu przebieg napięcia narastającego liniowo o szybkości narastania proporcjonalnej do wartości U_x . Gdy napięcie liniowe osiągnie wartość napięcia odniesienia $U_p = \text{const}$, układ porównujący wysyła impuls uruchamiający generator ładunku kompensacyjnego, który powoduje szybkie rozładowanie kondensatora C i powrót integratora do stanu początkowego. Od tej chwili następuje ponowne całkowanie napięcia wejściowego i cykl się powtarza. Każdorazowemu rozładowaniu kondensatora towarzyszy wytworzenie impulsu u_1 , który poprzez bramkę elektroniczną jest przekazywany do licznika. Im większą wartość ma napięcie mierzone U_x , tym wyższa jest szybkość narastania napięcia liniowego, a zatem większa częstotliwość zliczanych impulsów. Pomiar częstotliwości odbywa się metodą opisaną w p.1.2 przez zliczanie impulsów w określonym przedziale czasowym T_p . Przedział czasowy T_p zadaje generator czasu pomiaru, sterując otwieraniem bramki.



Osobną grupę woltomierzy całkujących stanowią **woltomierze o podwójnym całkowaniu**.

Zasadę działania woltomierza tego typu ilustruje *rysunek* pomiar składa się z dwóch cykli. Pierwszy, zwany pierwszym całkowaniem, rozpoczyna się z chwilą doprowadzenia do wejścia integratora napięcia mierzonego U_x . Napięcie na wyjściu integratora narasta wtedy liniowo z szybkością proporcjonalną do wartości U_x , a jednocześnie startuje generator częstotliwości wzorcowej, który odmierza czas całkowania T_p . Czas jest stały ($T_p = \text{const}$) niezależnie od wartości mierzonego napięcia. po upływie czasu T_p rozpoczyna się **drugi cykl pomiaru (drugie całkowanie)**

Układ sterujący wysyła impuls przełączający wejście integratora na źródło napięcia wzorcowego o stałej wartości $U_p = \text{const}$ lecz o przeciwnej do napięcia U_x biegunowości. Jednocześnie otwiera się bramka, przez którą impulsy z generatora częstotliwości wzorcowej f_w doprowadzane są do licznika, gdzie rozpoczyna się ich zliczanie. Napięcie na wyjściu integratora maleje z szybkością proporcjonalną do wartości napięcia U_p wskutek rozładowywania się kondensatora C . W chwili, w której napięcie wyjściowe osiąga wartość zerową, kończy się drugi cykl pomiarowy. Chwila ta jest wykrywana w układzie porównującym, który wysyła impuls zamykający bramkę .



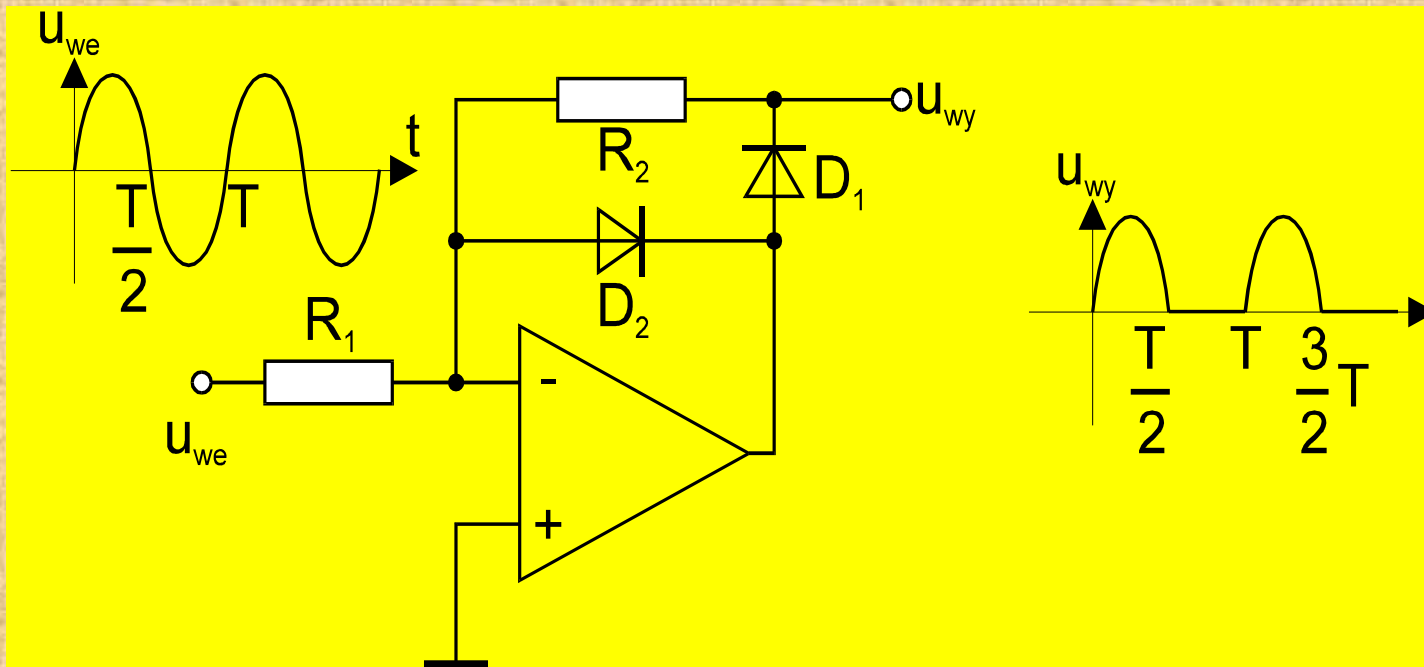
Pomiar napięcia zmiennego

Woltomierze cyfrowe do pomiaru napięć zmiennych mają dodatkowe układy przetwarzające napięcie zmienne na napięcie stałe. Ze względu na trudności w opracowaniu wysokiej klasy przetworników wartości skutecznej napięcia zmiennego na stałe, znaczna część produkowanych woltomierzy cyfrowych przystosowana jest do pomiaru wartości średniej lub szczytowej napięcia. Problem pomiarów napięć zmiennych woltomierzami cyfrowymi sprowadza się zatem do budowy określonego typu przetworników i ich współpracy z woltomierzami napięć stałych.

Ze względu na dużą dokładność metod cyfrowych w porównaniu z metodami analogowymi, układy prostowania stosowane w woltomierzach analogowych są niewystarczające z powodu silnej nieliniowości charakterystyki przejściowej dla małych napięć. W pomiarach cyfrowych wymaga się, aby charakterystyka prostowania była ściśle liniowa od napięć rzędu kilku miliwoltów.

Wymagania stawiane przetwornikom wartości średniej przeznaczonych do współpracy z miernikami cyfrowymi spełniają układy wzmacniaczy operacyjnych, które w pętli sprzężenia zwrotnego mają włączone diody półprzewodnikowe.

Przykładowy schemat aktywnego prostownika jednopółwkowego zbudowanego na tej zasadzie przedstawiono na *rysunku*. Układ ten dla ujemnej połówki napięcia wejściowego pracuje jako wzmacniacz odwracający o wzmocnieniu wyznaczonym przez stosunek rezystorów R_2/R_1 . Dioda D1 wówczas przewodzi, D2 jest zablokowana. Spadek napięcia na przewodzącej diodzie jest zredukowany w stosunku wynikającym ze wzmocnienia układu z otwartą pętlą. Dla dodatniej połówki napięcia wejściowego dioda D1 przestaje przewodzić, przewodzi natomiast dioda D2. Napięcie wyjściowe bliskie jest wówczas zero (z dokładnością lepszą niż 1,2mV). Układ realizuje więc funkcję diody idealnej.



Z wyjątkiem wymagań specjalnych, ogólnie przyjętą zasadą jest pomiar wartości skutecznej przebiegów zmiennych. Rzeczywiste układy pomiarowe działają na zasadzie przetwarzania wartości średniej bądź szczytowej napięcia zmiennego, skalowane są natomiast w wartości skutecznej, przeliczanej dla sygnału sinusoidalnego. Praktycznie więc właściwa dokładność wskazań mierników cyfrowych – w odniesieniu do wartości skutecznej – jest zapewniona przy pomiarach nie zniekształconego napięcia sinusoidalnego. Przykładowo rozpatrzmy przypadek, gdy na wejście cyfrowego woltomierza napięcia zmiennego z przetwornikiem wartości średniej, wyskalowanego w wartości skutecznej dla sygnału sinusoidalnego, podamy napięcia o przebiegach jak na. Wskazanie woltomierza wynosi:

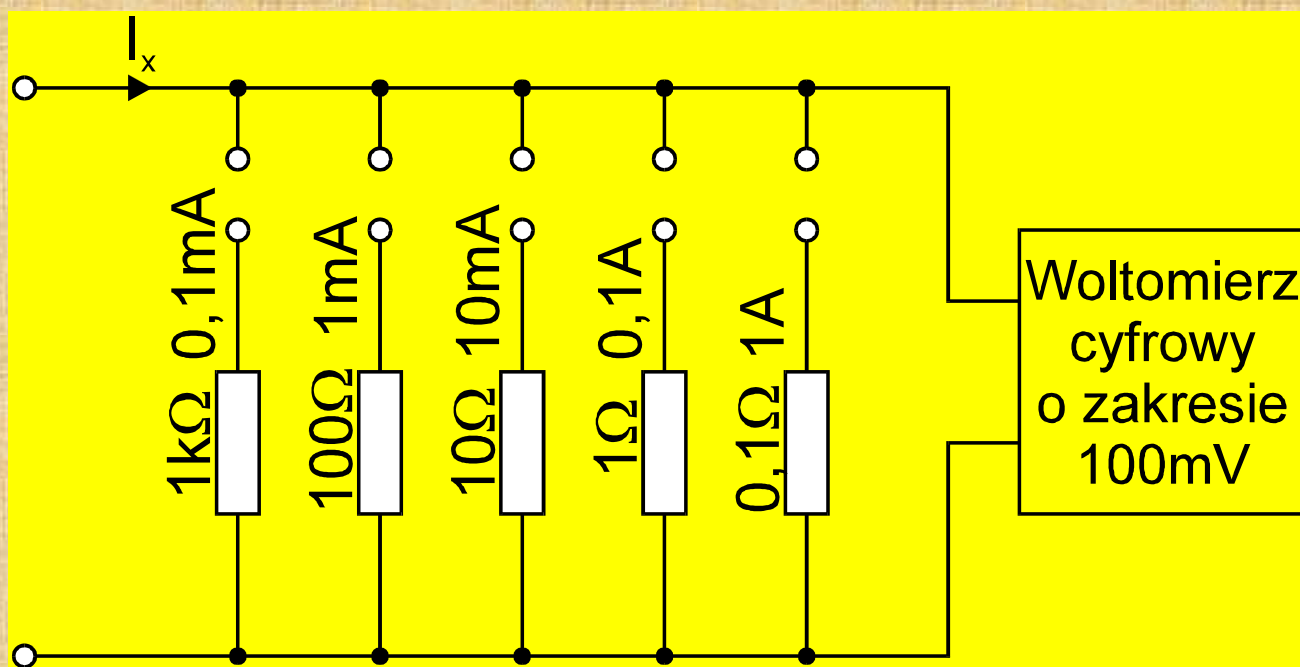
$$U_v = 1,11 U_{\text{śr}}$$

gdzie współczynnik równy 1,11 odpowiada wartości współczynnika kształtu dla przebiegu sinusoidalnego. Wskazania woltomierza dla przykładowych przebiegów będą więc równe $U_v = 0,555 U_m$ dla przebiegu trójkątnego oraz $U_v = 0,666 U_m$ dla przebiegu prostokątnego.

Ze wzoru (11) wynika, że dla napięcia odkształconego możliwe jest tylko określenie jego wartości średniej równej $U_{\text{śr}} = U_v / 1,11$.

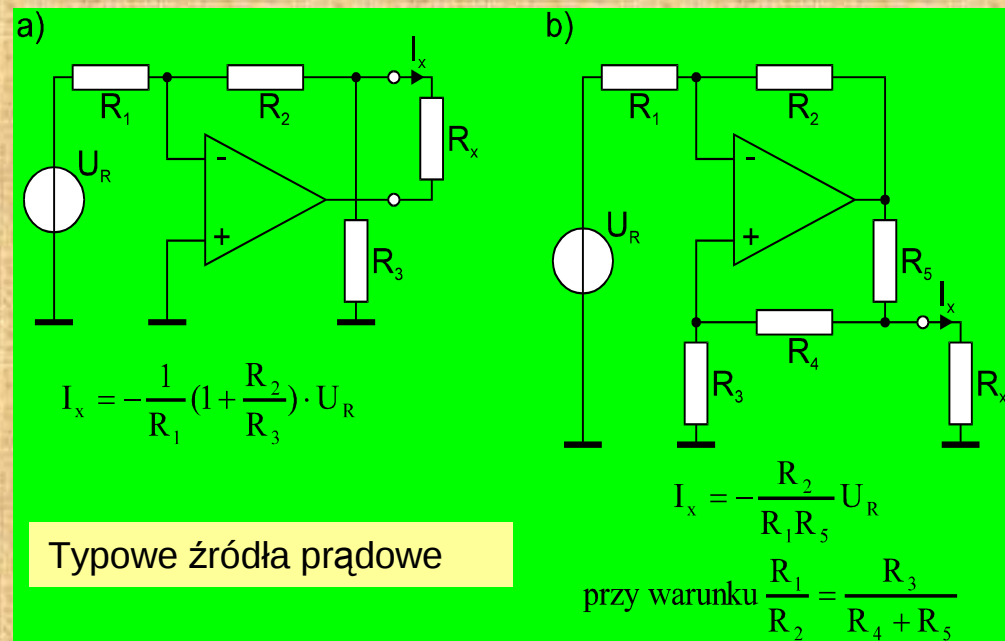
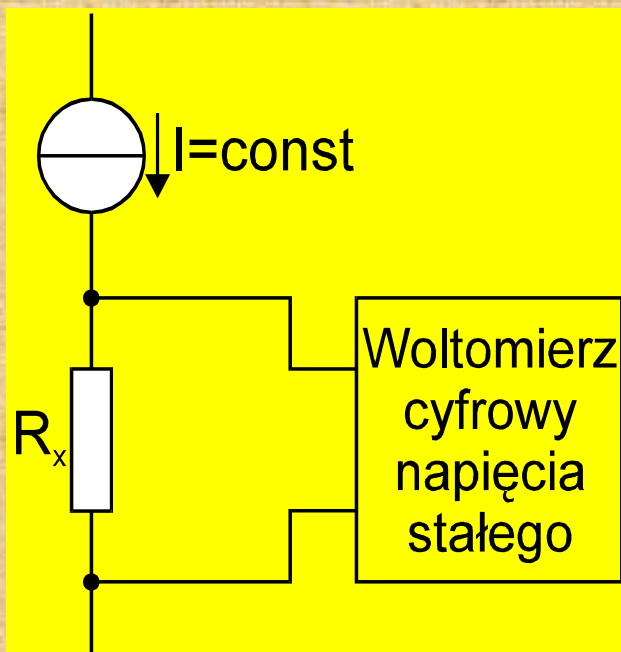
Pomiar prądu stałego i zmiennego

Pomiar prądu stałego i zmiennego metodami cyfrowymi polega na pomiarze spadku napięcia na wzorcowej rezystancji, a więc tak samo jak w przypadku metod analogowych. Typowy przykład rozwiązania dzielnika wejściowego do pomiaru prądu, przedstawiona na *rysunku*. Zespół połączonych rezystorów wzorcowych współpracuje z woltomierzem cyfrowym o dużej rezystancji wejściowej. Z punktu widzenia walorów użytkowych miernika, jest istotne aby spadek napięcia na rezystancji był możliwie mały. Wartość tego spadku wynika z podstawowego zakresu pomiarowego woltomierza. Dla przykładu przedstawionego wynosi ona 100mV.



Pomiar rezystancji

Spośród wielu metod stosowanych przy pomiarze rezystancji, w miernikach cyfrowych spotykana jest zasadniczo jedna, polegająca na przetwarzaniu rezystancji na proporcjonalne do niej napięcie stałe, mierzone następnie za pomocą woltomierza cyfrowego. Zasada przetwarzania rezystancji na napięcie (R/U) opiera się na prawie Ohma. Oznacza to, że jest mierzony spadek napięcia na nieznanej rezystancji, wymuszony przepływem prądu o dokładnie znanej wartości. Zasadniczym problemem jest przy tym uzyskanie stałego prądu o wartości niezależnej od zmian obciążenia i czynników zakłócających. Najczęściej do budowy źródeł prądowych wykorzystuje się wzmacniacze operacyjne, na których wejścia podawane jest stabilizowane napięcie odniesienia U_R .



Błędy mierników cyfrowych

W przyrządach cyfrowych dokładność pomiaru określona jest przez:

błąd wielkości wzorcowej – wynika on np. w woltomierzu impulsowo-czasowym z nieliniowości i niestałości szybkości zmian napięcia narastającego liniowo oraz niestabilność częstotliwości generatora impulsów,

błąd porównania – wynika on ze skończonej czułości układów porównujących i określany jest progiem czułości,

błąd dyskretyzacji – przyjmuje się równy ± 1 najmniej wartościowej pozycji cyfrowego wyniku pomiaru.

W związku z tym dla mierników cyfrowych o dużej dokładności określa się niedokładność podając trzy liczby:

procentowy błąd graniczny liczony od wartości końca zakresu (wynika z błędu wielkości wzorcowej)

procentowy błąd graniczny liczony od wartości aktualnej (odpowiada błędowi porównania)

bezwzględny błąd dyskretyzacji (± 1 jednostka na ostatniej pozycji wyniku)

W miernikach o mniejszej dokładności i rozdzielczości wzorzec wewnętrzny jest zwykle o tyle dokładniejszy od wskazań przyrządu, że wystarcza podanie granicznego błędu procentowego liczonego względem aktualnych wskazań i błędu dyskretyzacji.

Przykłady stosowania przetworników A/C w miernikach cyfrowych

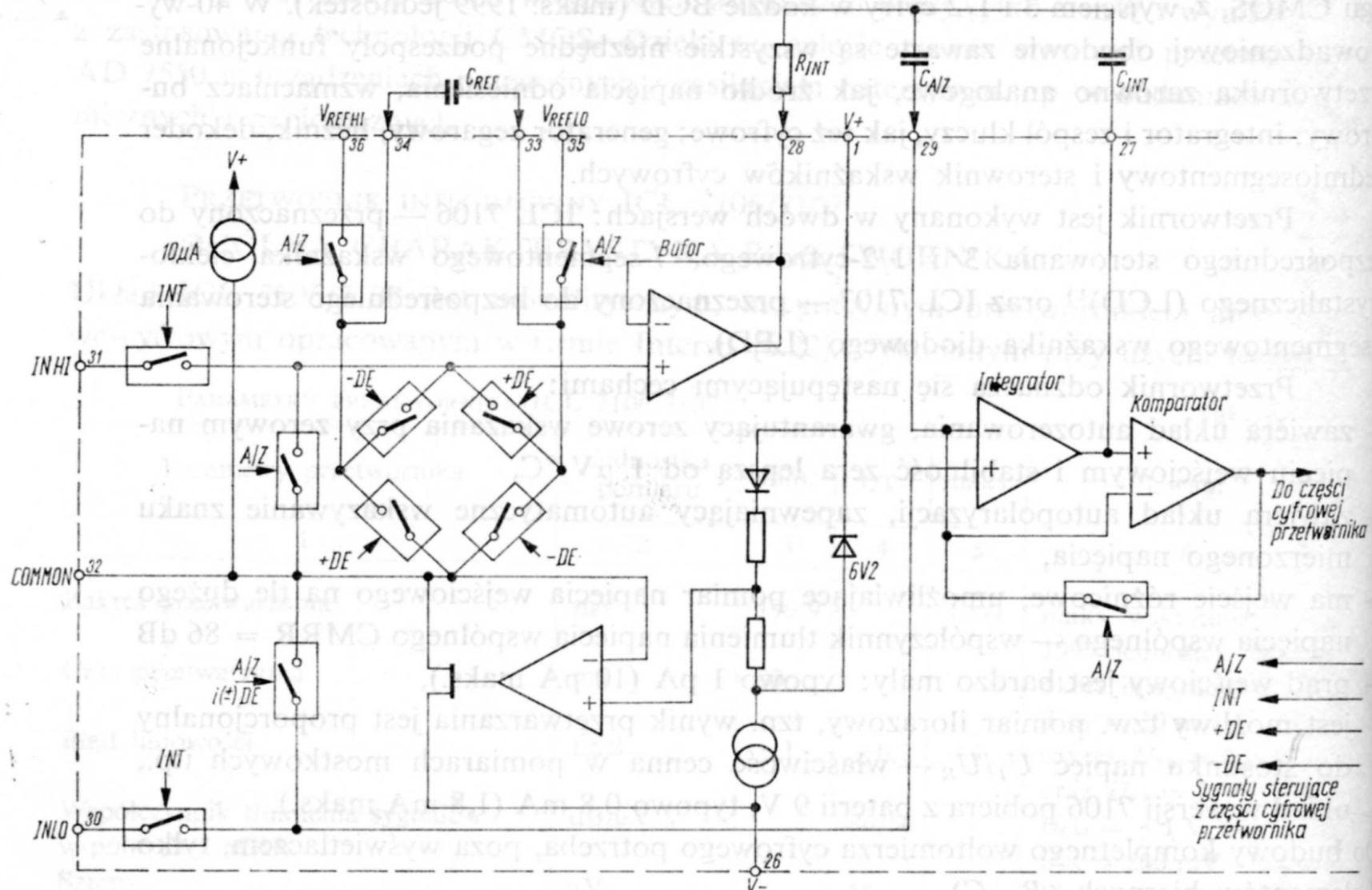
Najczęściej spotykanymi układami są :

ICL 7106 – 3 ½ cyfry sterujący wyświetlacze LCD

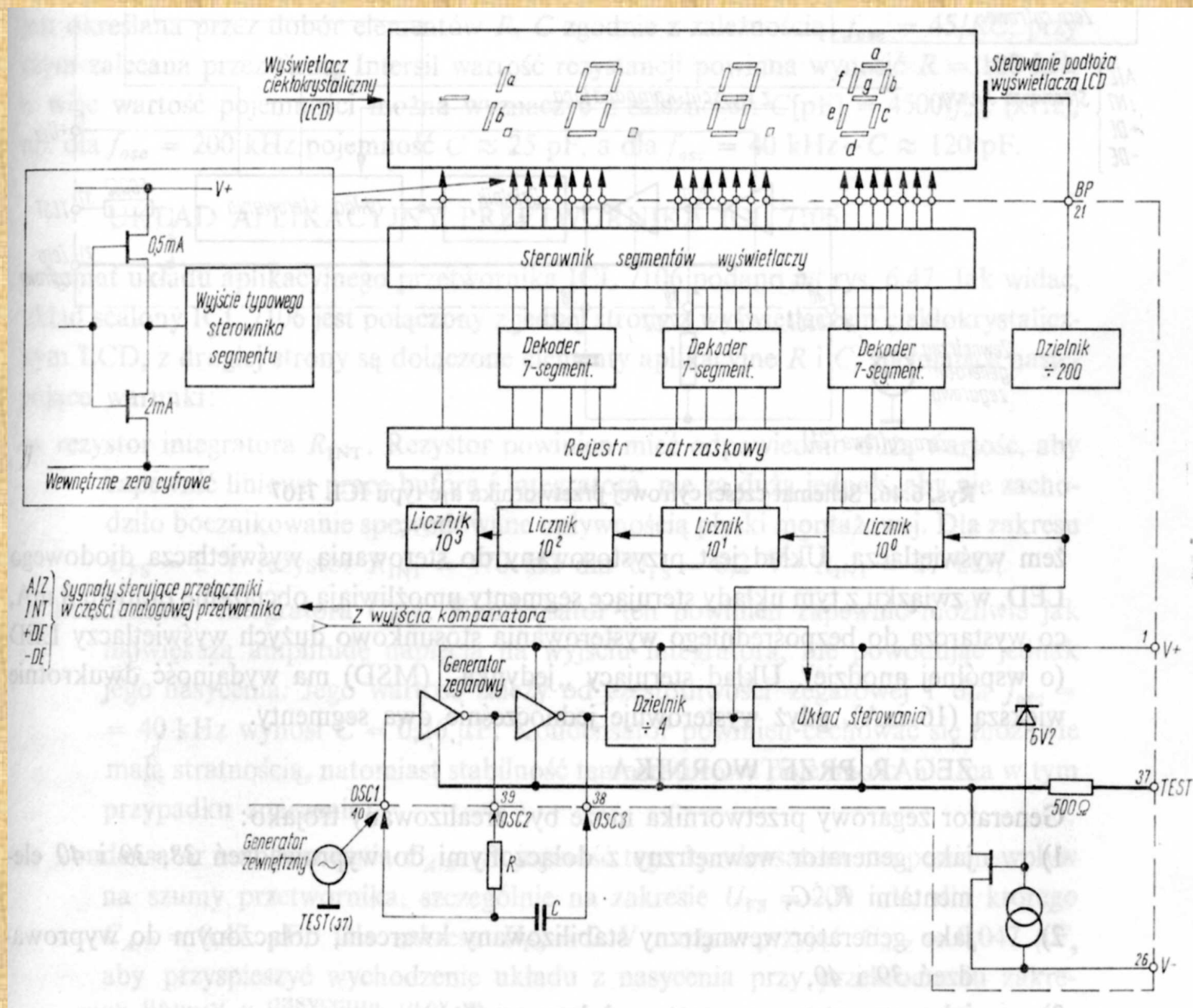
ICL 7107 – 3 ½ cyfry sterujący wyświetlacze LED

ICL 7135 – 4 ½ cyfry sterujący wyświetlacze LED

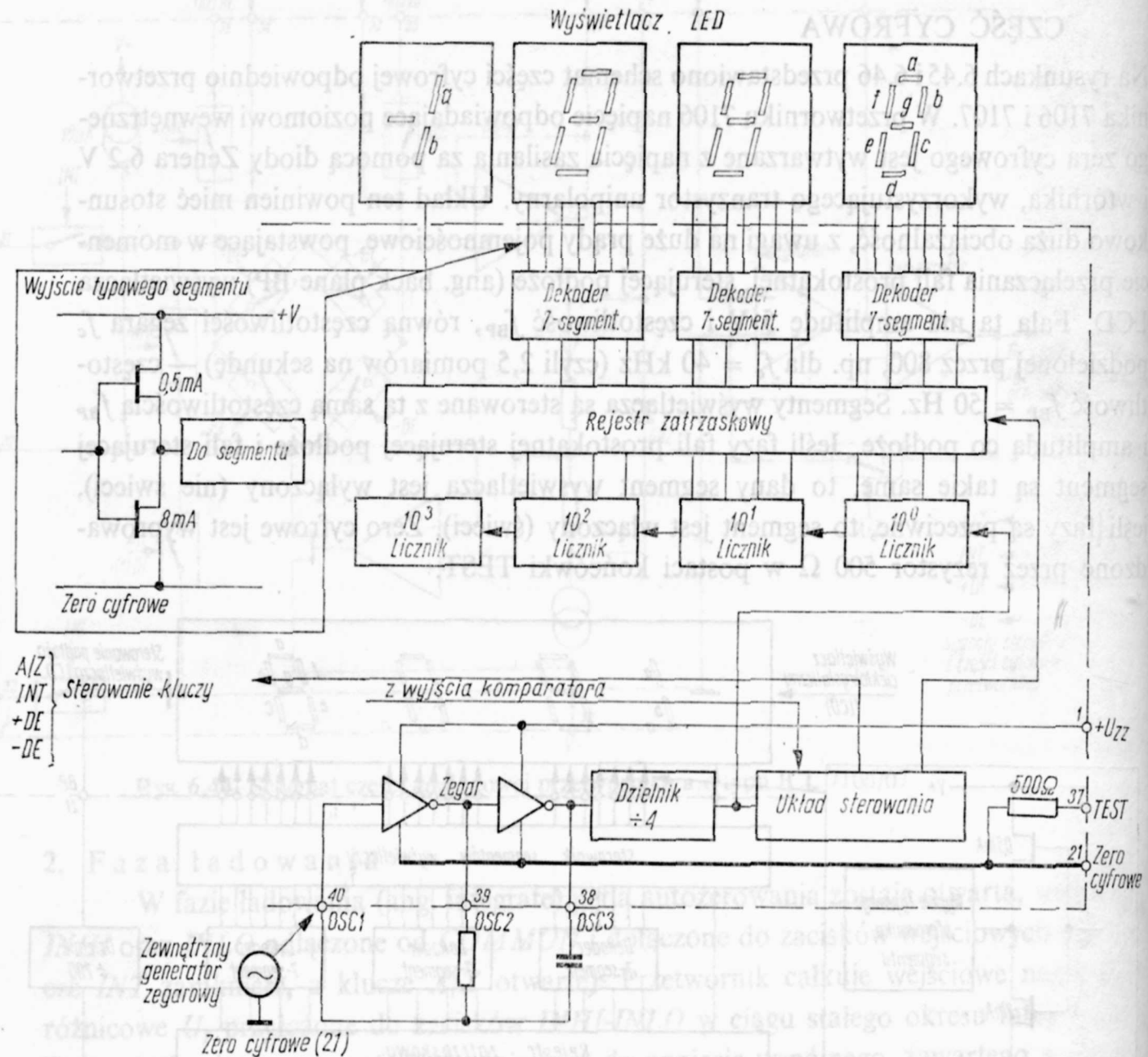
Część analogowa przetwornika ICL 7106/07



Część cyfrowa ICL 7106

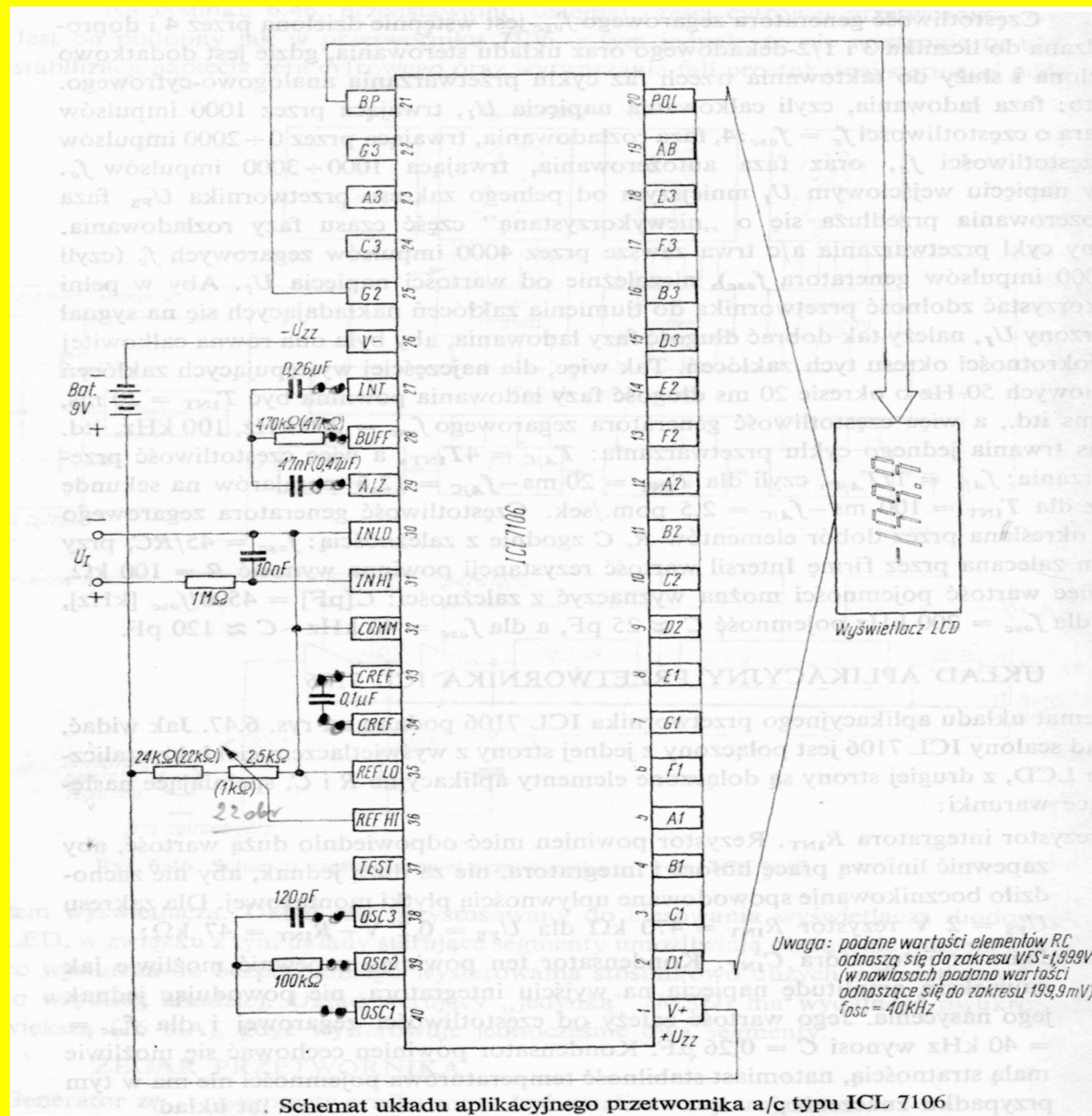


Część
cyfrowa
ICL 7107



Aplikacja ICL 7106

Podane
typowe
wartości
elementów
stosowanych
w układach
praktycznych

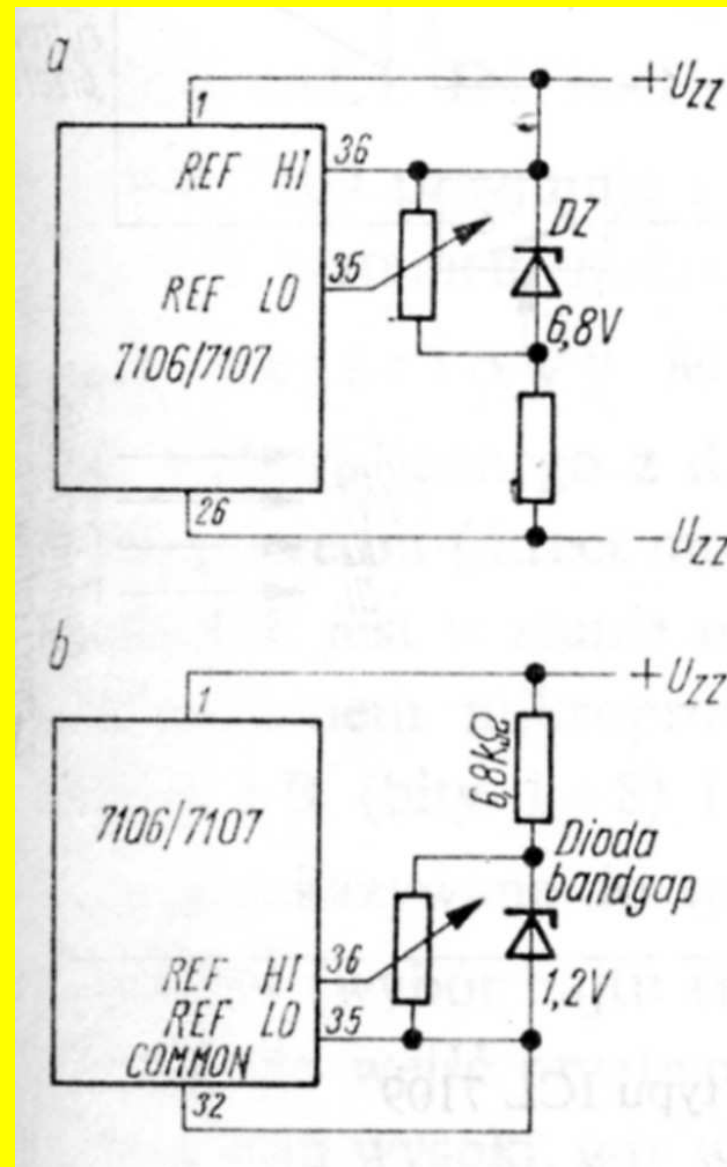


Wewnętrzne
źródło odniesienia ma taką
stabilność termiczną, że
zmiana temperatury o
6 °C powoduje zmianę
wskazań o 1 bit (LSB)

Schemat zasilania
przetwornika typu ICL
7106/07 za pomocą
zewnętrznego napięcia
odniesienia.

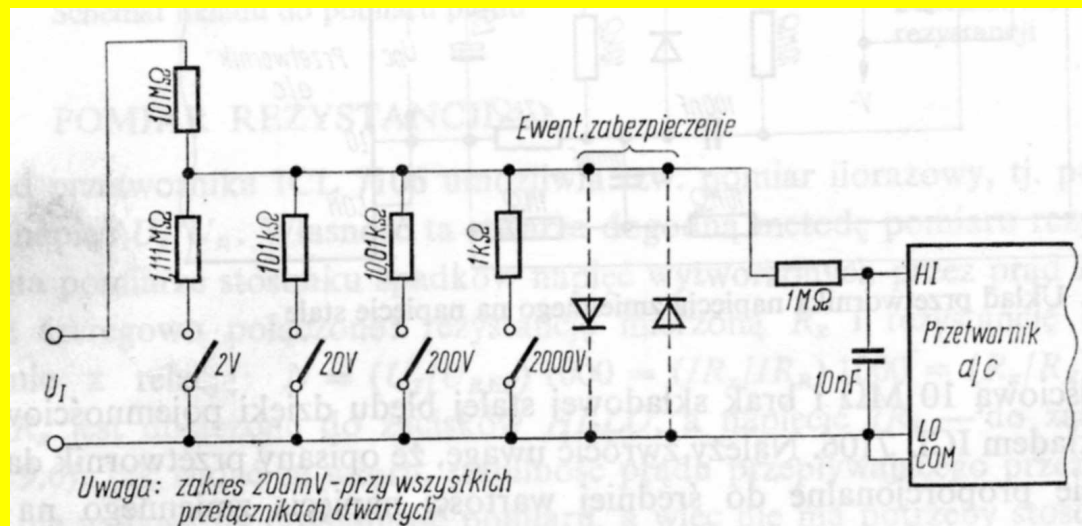
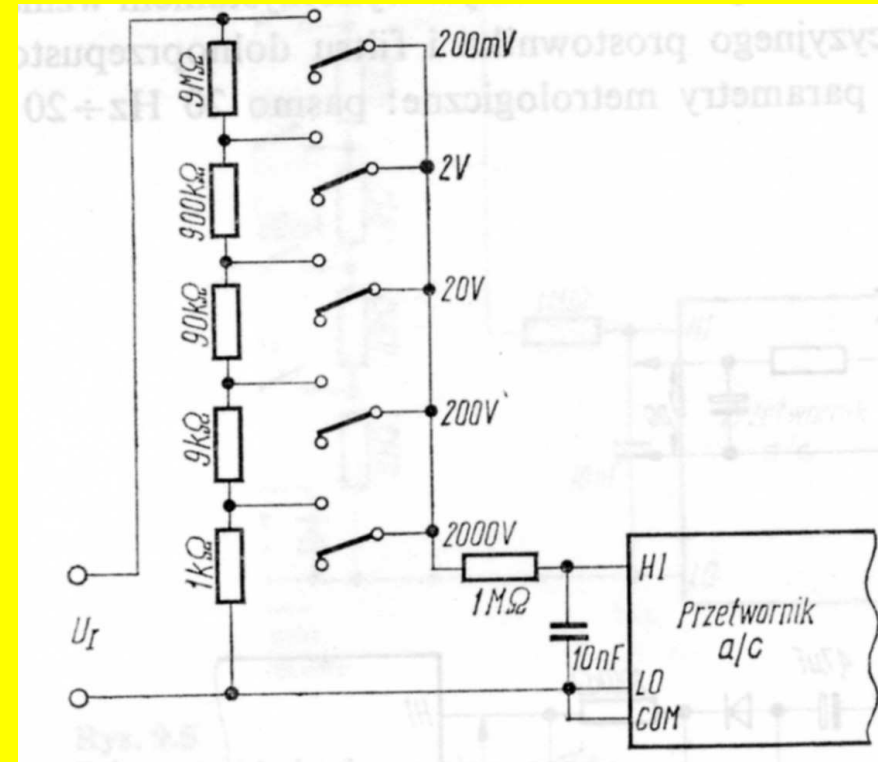
Dioda bandgap np..

ICL 8069

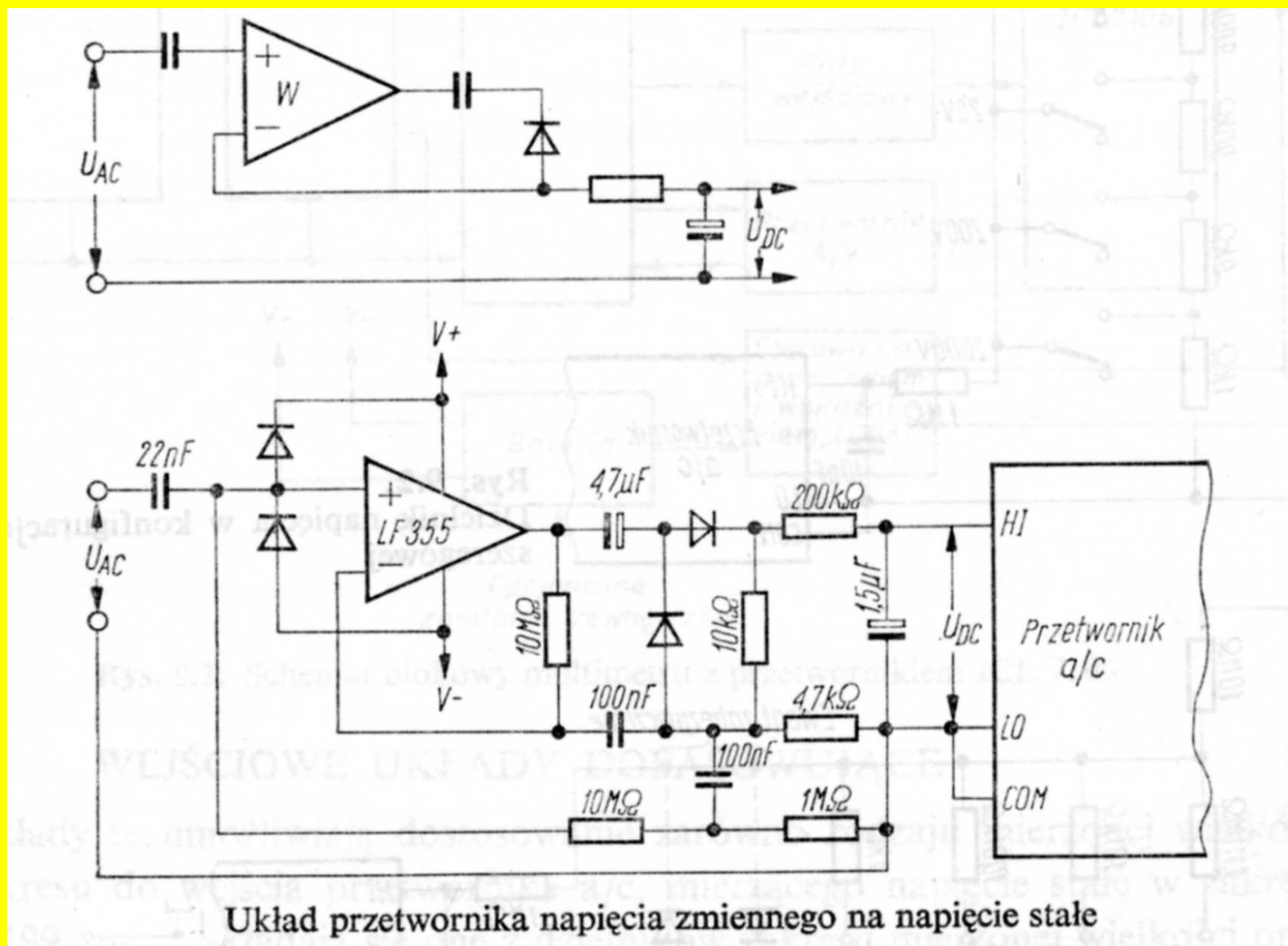


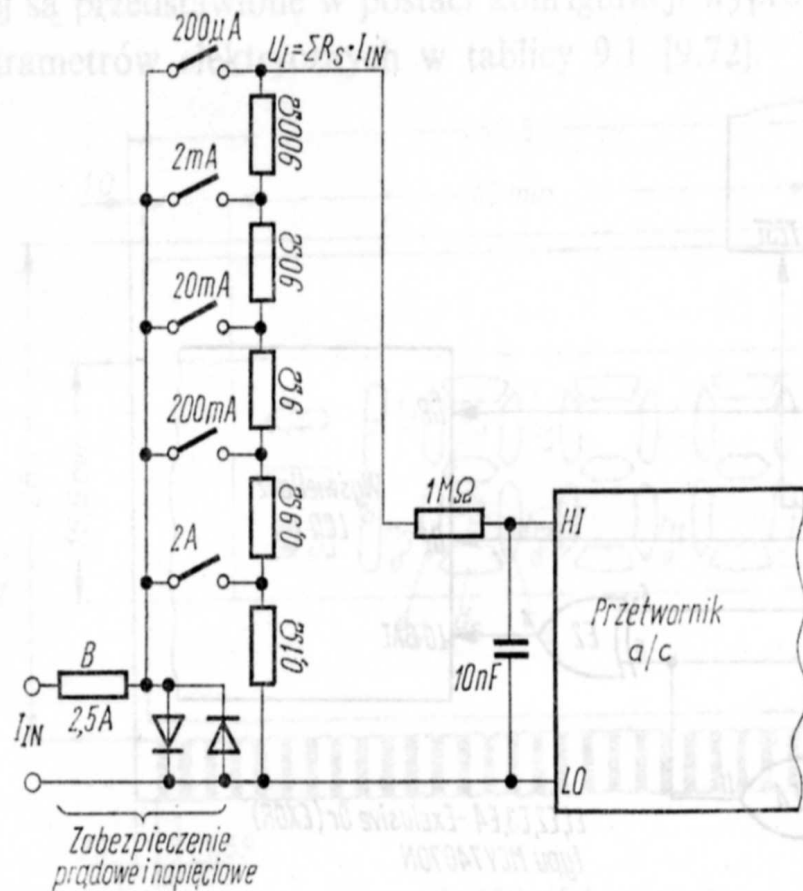
Gdy przetwornik pracuje jako
woltomierz napięcia stałego
stosuje się dzielniki napięcia w
układzie

- szeregowym (częściej)
- równoległym



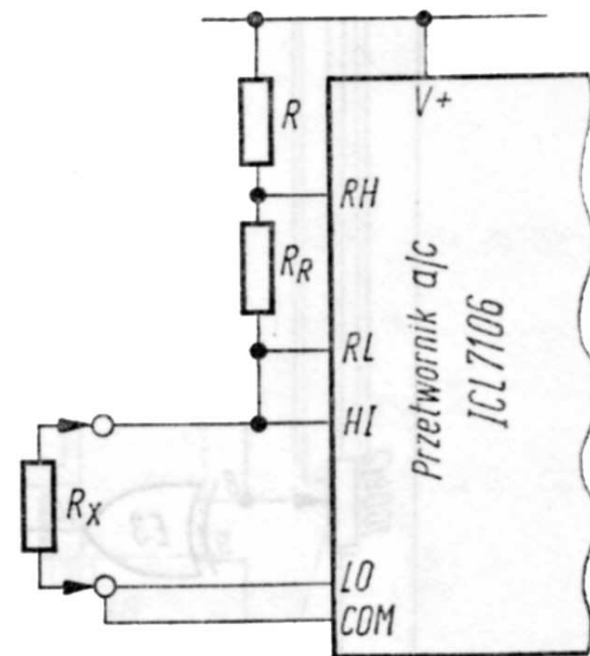
Przy pomiarze napięć zmiennych stosuje się prostowniki aktywne





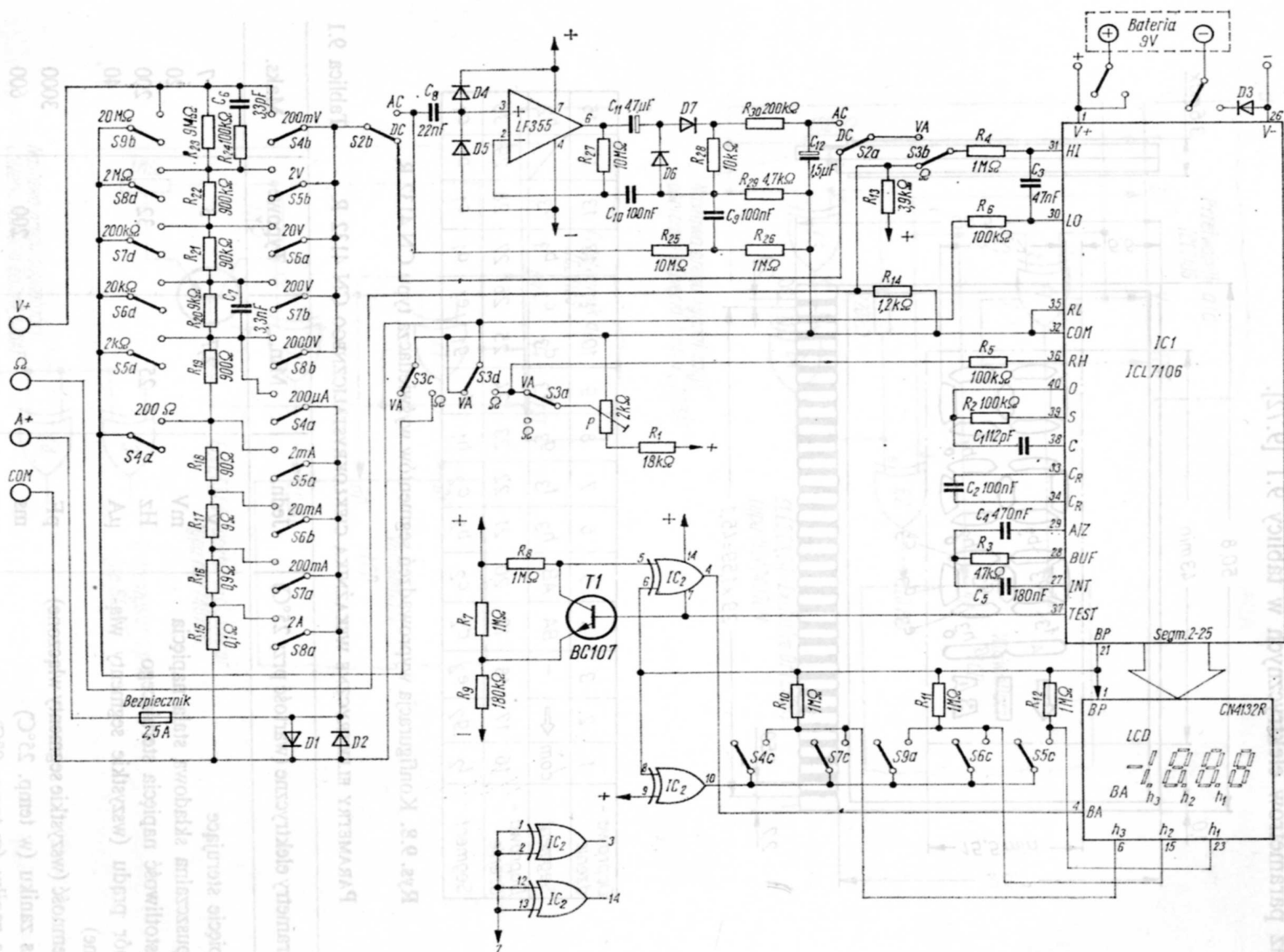
Schemat układu do pomiaru prądu

Układy boczników do pomiaru prądu



Schemat układu do pomiaru rezystancji

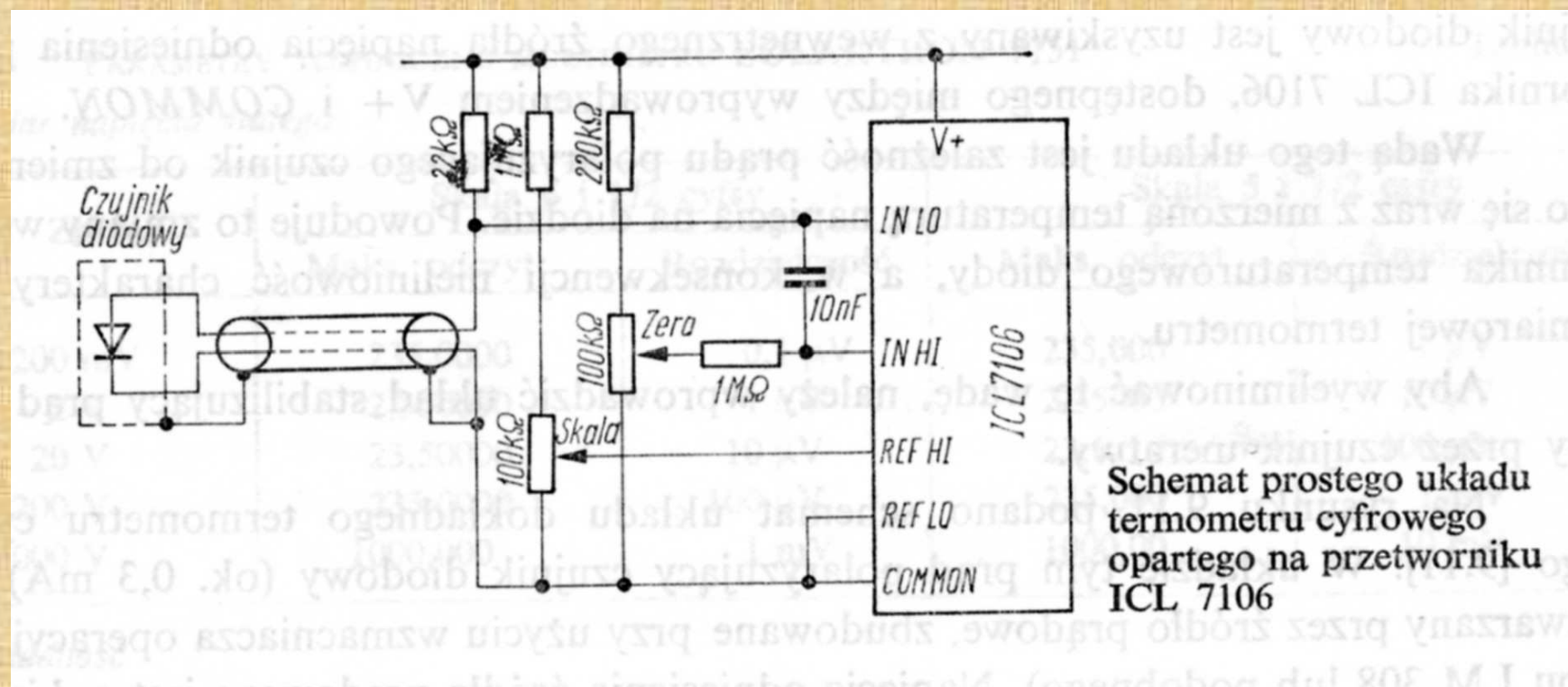
Pomiar rezystancji odbywa się metodą pośrednią przez pomiar spadku napięcia na R_x zasilanego prądem ze źródła prądowego



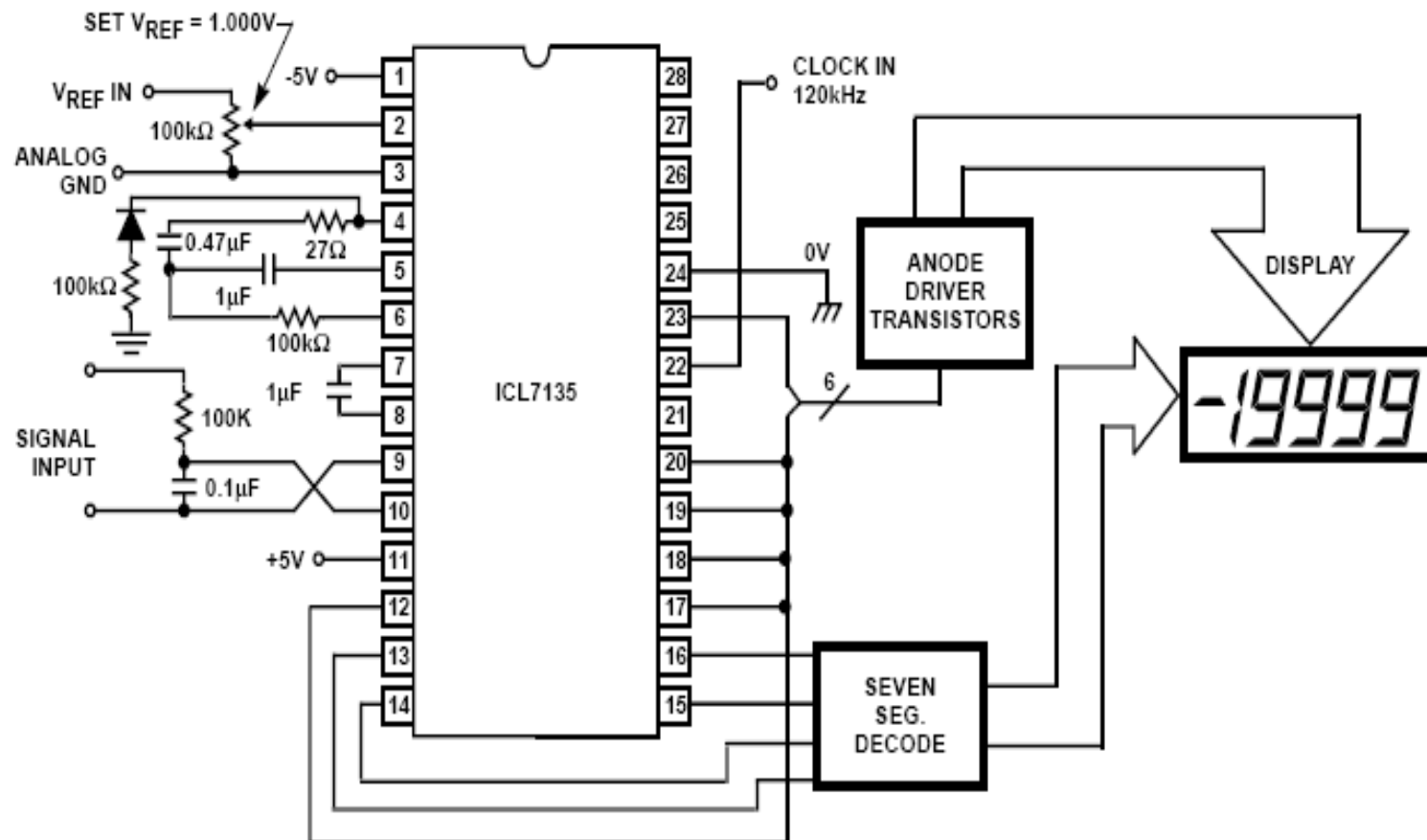
Schemat multimetru cyfrowego DMM 2000

Przykład wykorzystania układu ICL 7106

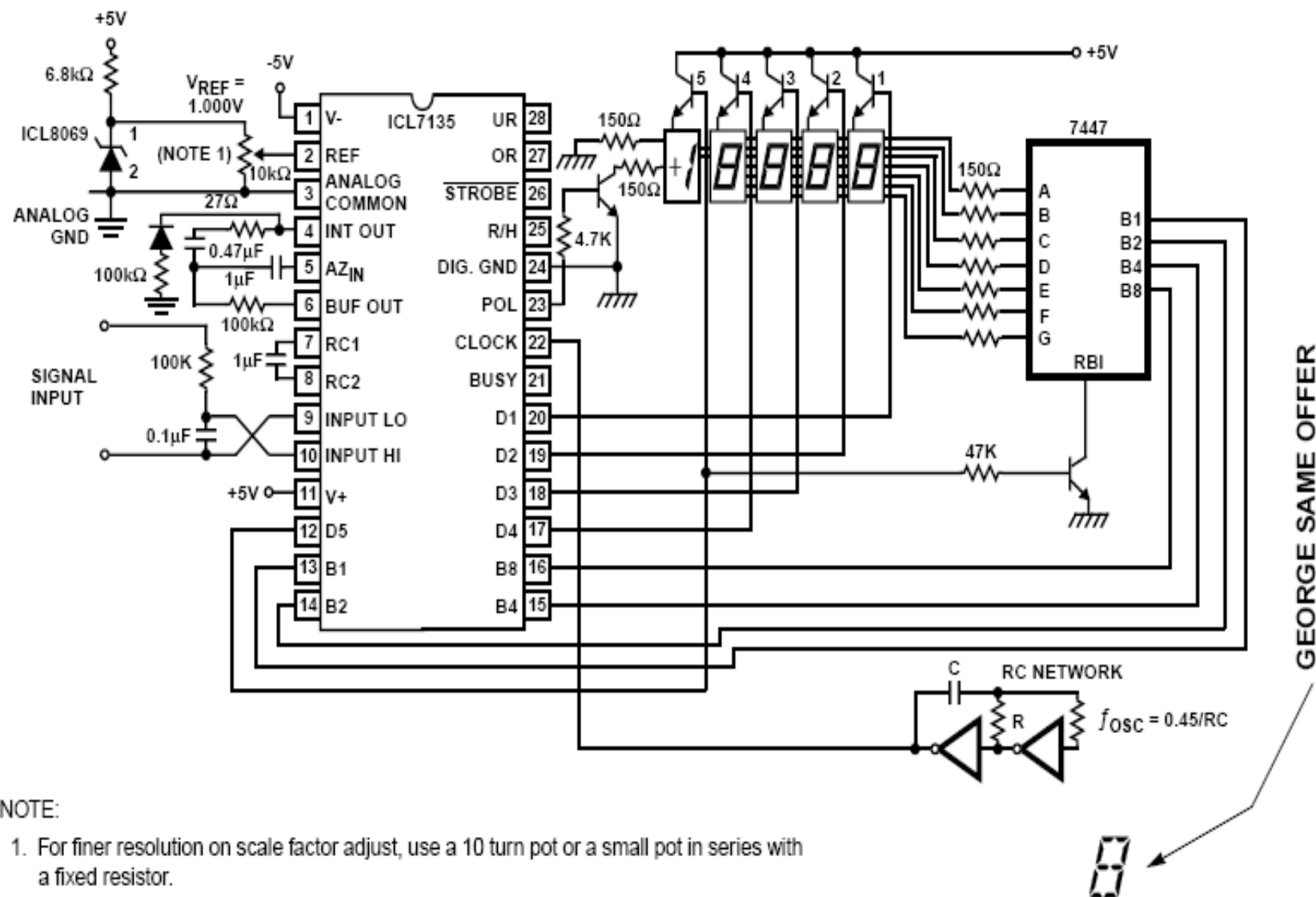
Termometr cyfrowy z wykorzystaniem złącza diody półprzewodnikowej jako czujnika temperatury



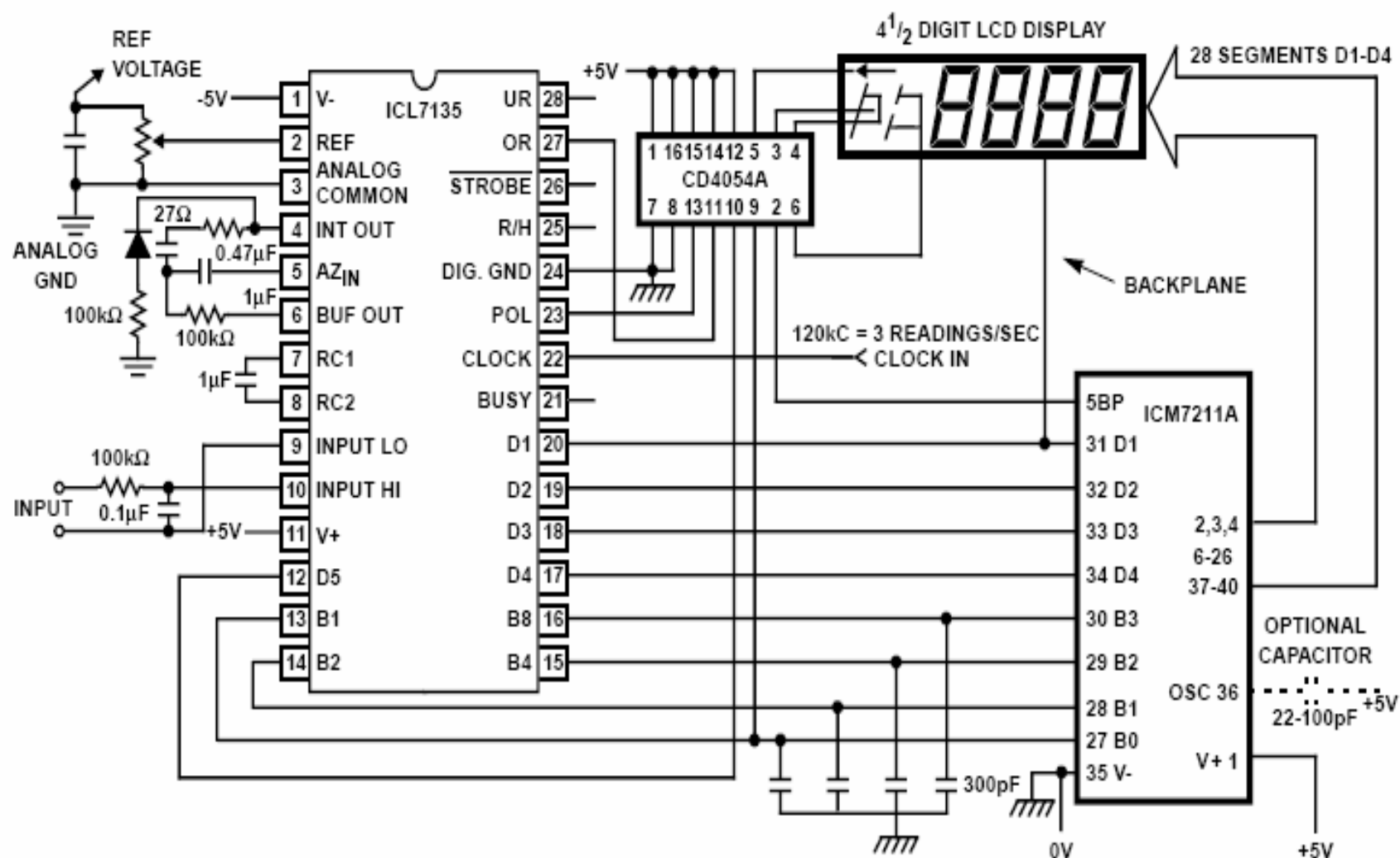
Typowa aplikacja ICL 7135



Rozwiązanie woltomierza ICL 7135



Układ współpracy układu ICL 7135 z wyświetlaczem LCD



Przetwarzanie TRUE RMS

Ostatnio coraz tańsze i łatwiej dostępne stają się woltomierze reagujące na wartość skuteczną napięcia.

Zastosowanie woltomierza reagującego na "prawdziwą" wartość skuteczną (ang. **true RMS**) jest nieodzowne przy pomiarach szumów (elektrycznych, akustycznych), ciągu impulsów o małym współczynniku wypełnienia oraz przy pomiarach odkształconych sygnałów elektrycznych (np. w układach tyrystorowych).

Jak dotąd, najdokładniejszą metodą pomiaru wartości skutecznej jest tradycyjna metoda termiczna, bazująca na definicji wartości skutecznej napięcia zmiennego jako wartości napięcia stałego wywołującego ten sam efekt cieplny w rezystancji. Mierzony sygnał jest doprowadzony do cienkiego drutu grzejnego, a termopara przymocowana do drutu grzejnego wytwarza napięcie stałe, proporcjonalne do wzrostu temperatury złącza.

Jest to teoretycznie najprostsza metoda, lecz najtrudniejsza i najdroższa w realizacji praktycznej.

Wyniki pomiarów są dokładne (typowy błąd 0,1%) w szerokim paśmie częstotliwości, lecz z wymienionych względów metoda termiczna jest stosowana głównie w laboratoriach metrologicznych.

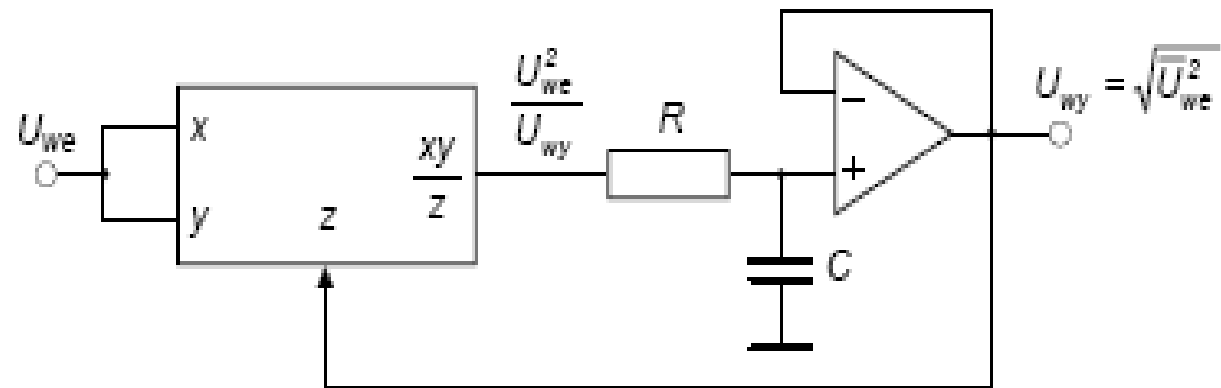
W przyrządach ogólnie stosowanych bazuje się na technikach elektronicznego przetwarzania RMS/DC. Jedną z nich polega na analogowym przetwarzaniu sygnału.

Napięcie wejściowe jest podnoszone do kwadratu, a następnie jest wyciągany pierwiastek kwadratowy ze średniej arytmetycznej wielkości kwadratowych, zgodnie z definicją **RMS (ang. Root-pierwiastek, Mean-średnia, Square-kwadrat)**.

Konstrukcja starszych przyrządów tego typu była oparta na układzie złożonym z wielu diod i rezystorów, którego charakterystyka aproksymowała parabolę za pomocą kilku odcinków linii prostych.

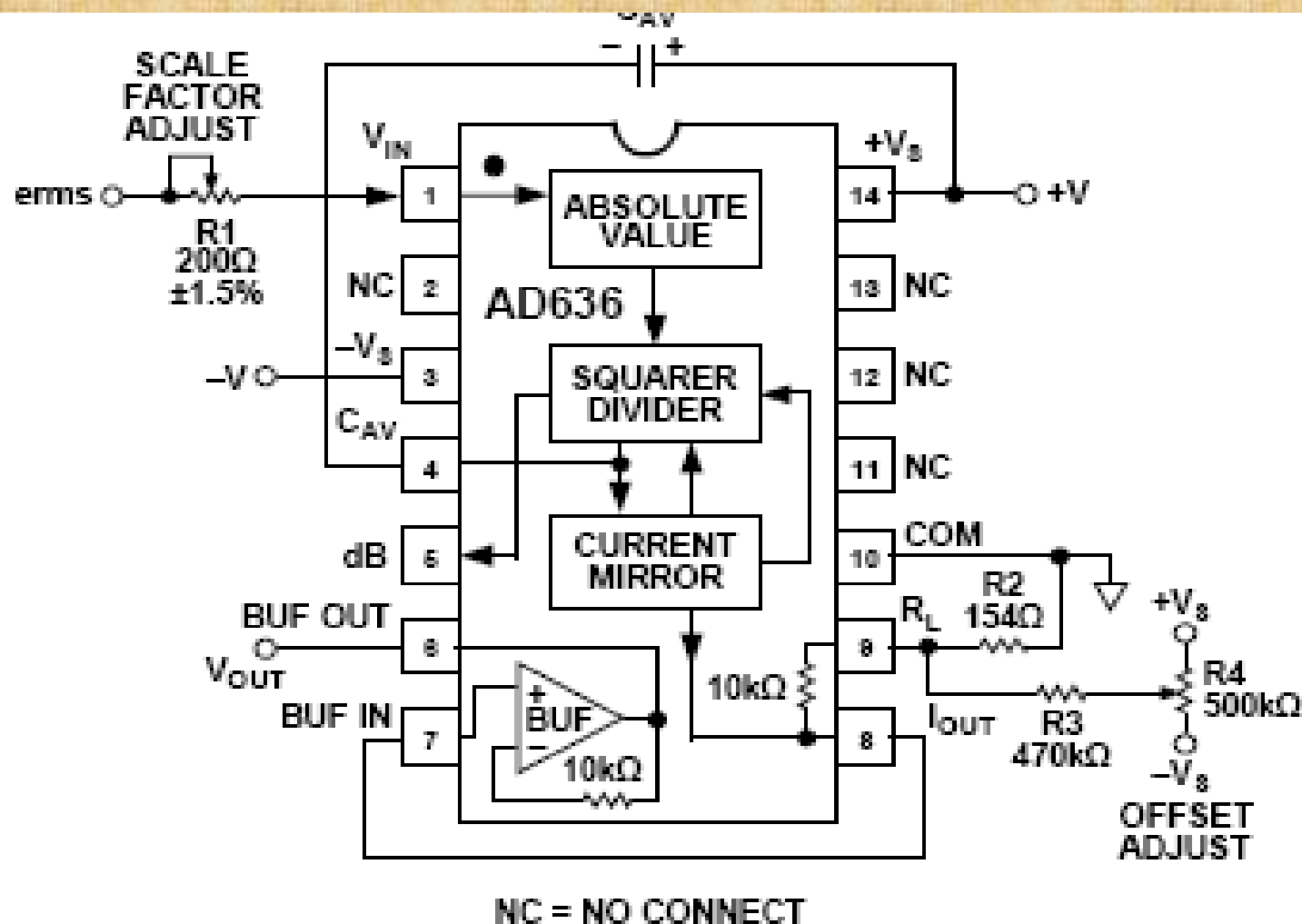
Układ taki umożliwiał wyznaczanie kwadratu wartości mierzonego napięcia.

We współcześnie produkowanych przyrządach stosuje się układy scalone przetworników wartości skutecznej na napięcie stałe, w których do przeprowadzenia operacji podnoszenia do kwadratu służą funkcje logarytmiczna i wykładnicza. Podstawowy schemat funkcjonalny scalonego przetwornika RMS/DC przedstawia rysunek



Rys. 11.5. Schemat funkcjonalny scalonego przetwornika RMS/DC

Typowymi układami realizującymi funkcję True RMS na drodze elektronicznej jest układ AD 636



Przykład pomiaru True RMS z przetwornikiem ICL 7106

