

4. MATERIAŁ NAUCZANIA

4.1. Częstościomierze - zasada działania, budowa, parametry i funkcje pomiarowe

4.1.1 Materiał nauczania

Wiadomości wstępne

Do pomiaru częstotliwości przebiegów elektrycznych stosuje się:

- a) częstościomierze analogowe:
 - rezonansowe,
 - integracyjne,
- b) częstościomierze-czasomierze cyfrowe,
- c) oscyloskopy elektroniczne,
- d) mostki do pomiaru częstotliwości.

W zależności od wartości częstotliwości, rodzaju przebiegu i wymaganej dokładności pomiaru, do mierzenia częstotliwości stosuje się przyrządy pomiarowe o różnych zasadach działania i budowy. W niektórych badaniach, szczególnie przy dużych częstotliwościach radiowych, częstotliwość mierzy się wieloma metodami. Do pomiarów małej częstotliwości (do kilkuset herców) buduje się wspólnie częstościomierze magnetoelektryczne przetwornikowe o klasach dokładności o 0,5 i 0,2 oraz cyfrowe o klasie dokładności 0,05. Do pomiarów częstotliwości akustycznych i ponad akustycznych stosuje się obecnie różne odmiany elektronicznych częstościomierzy analogowych oraz cyfrowych. Częstościomierze elektromechaniczne i mostkowe są rzadko stosowane.

Częstotliwość o wartości do kilkuset herców (kilku kiloherców) można mierzyć częstościomierzami ilorazowymi. Ich niepewność pomiaru wynosi $\pm 1\%$ i więcej. Pobór mocy jest duży (kilka V · A).

Częstotliwość o wartości do około 150 kHz można mierzyć mostkami zależnymi od częstotliwości np. (mostek Maxwella-Wiena), których równanie równowagi zawiera częstotliwość lub pulsację $\omega = 2 \cdot \pi \cdot f$. Ich niepewność pomiaru wynosi $\pm(0,1 \div 0,3\%)$. Częstotliwość o wartości od 50 kHz do 2 GHz można mierzyć częstościomierzami rezonansowymi. Ich niepewność pomiaru wynosi $\pm(0,1 \div 2\%)$.

Częstotliwość można też mierzyć za pomocą oscyloskopu elektronicznego. Niepewność pomiaru jest równa niepewności wzorca częstotliwości danego oscyloskopu lub generatora zewnętrznego. Ta metoda jest stosowana do pomiarów małych częstotliwości o dużej stałości.

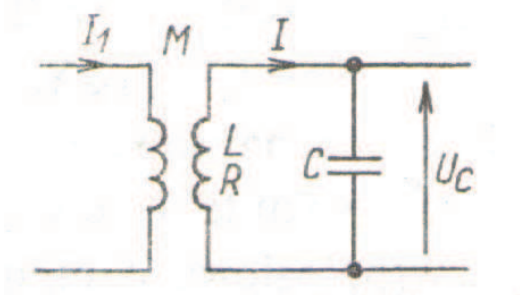
Częstotliwości wielkie i bardzo wielkie (aż do kilkudziesięciu gigaherców) mierzy się za pomocą częstościomierzy interferencyjnych (dudnieniowych). Niepewność wyników pomiaru zależy od niepewności zastosowanego wzorca częstotliwości i może wynosić $\pm(0,1 \div 0,0005\%)$. Częstotliwości wielkie i bardzo wielkie mierzy się też za pomocą falomierzy.

Zarówno małe, jak i wielkie (rzędu kilku GHz) częstotliwości można mierzyć częstościomierzami cyfrowymi. Pomiar częstotliwości jest nierozłącznie związany z pomiarem czasu. Małe częstotliwości f wyznacza się ze wzoru $f = 1 / T$, na podstawie pomiaru czasu okresu T badanego przebiegu. Wielkie częstotliwości mierzy się zliczając liczbę cykli w określonym przedziale czasu (np. 1 s.).

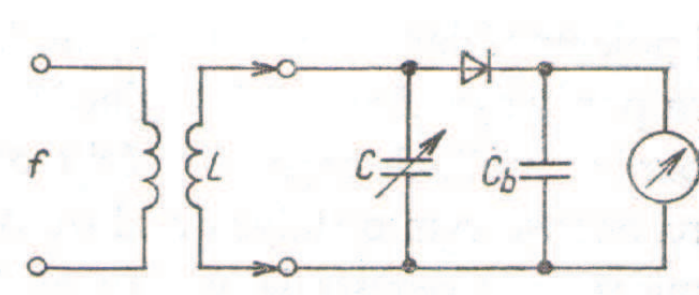
Częstościomierze rezonansowe

W częstościomierzach rezonansowych wykorzystuje się zjawisko rezonansu. Pomiar polega na porównaniu częstotliwości mierzonej z częstotliwością drgań własnych układu rezonansowego lub rezonatora.

Do pomiaru częstotliwości dużych (powyżej 50 kHz) wykorzystuje się zjawisko rezonansu elektrycznego. Przy częstotliwościach do ok. 200 MHz obwód rezonansowy składa się z cewki i kondensatora. Obwód ten jest pobudzany do drgań przebiegiem o częstotliwości mierzonej. W tym celu obwód rezonansowy jest słabo sprzężony magnetycznie z obwodem kontrolowanym lub jest połączony z nim kondensatorem o małej pojemności. Za pomocą kondensatora o regulowanej pojemności zmienia się częstotliwość rezonansową obwodu aż do wystąpienia rezonansu. Układ rezonansowy częstościomierza o sprzężeniu magnetycznym jest przedstawiony na rys. 1. Rezonans występuje przy częstotliwości odpowiadającej maksymalnemu napięciu na kondensatorze.



Rys. 1. Układ ilustrujący zasadę działania częstościomierza rezonansowego [4, s. 371]



Rys. 2. Układ częstościomierza rezonansowego [4, s. 371]

W częstościomierzach rezonansowych najczęściej wskaźnikiem rezonansu jest detektor diodowy i przetwornik magnetoelektryczny (rys. 2). Zakresy pomiarowe częstościomierza zmienia się najczęściej przez zmianę cewek, a obwód pomiarowy doprowadza się do rezonansu przez ciągłą zmianę pojemności kondensatora. Zwykle wskaźy na podziałce tego kondensatora są oznaczone liczbami odpowiadającymi wartościom częstotliwości mierzonej. Częstościomierzy tych nie stosuje się do pomiaru małych częstotliwości. Górny zakres pomiarowy do ok. 200 MHz. W zakresie bardzo wielkich częstotliwości stosuje się częstościomierze rezonansowe z obwodem rezonansowym o stałych rozłożonych. Częstotliwość mierzona, przy pominięciu indukcyjności przewodów łączących i kondensatora oraz pojemność własną cewki, wynosi:

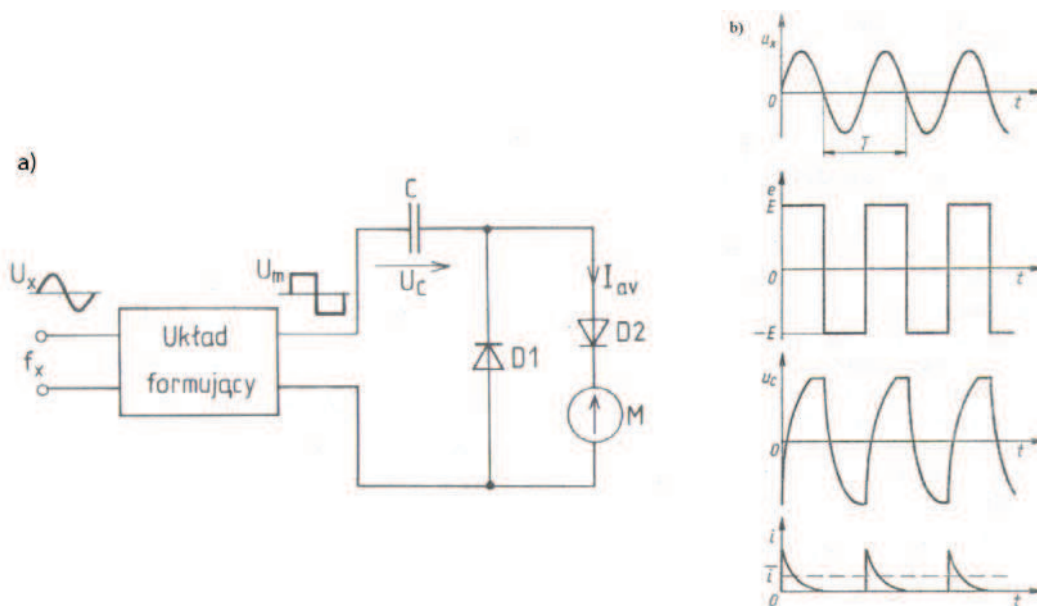
$$f = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}}$$

Częstościomierze rezonansowe umożliwiają pomiar częstotliwości z błędem $\pm(0,1 \div 2\%)$.

Integracyjny częstościomierz elektroniczny analogowy

Uproszczony schemat funkcjonalny integracyjnego częstościomierza elektronicznego analogowego przedstawiono na rys. 3.

Częstościomierz składa się z układu formującego, kondensatora C, diody D1, diody D2 i miernika magnetoelektrycznego. Układ formujący uniezależnia wynik pomiaru częstotliwości f_x badanego sygnału wejściowego, od kształtu i amplitudy przebiegu. Sygnał wejściowy, którego częstotliwość podlega pomiarowi, przekształca się w napięcie prostokątne, o amplitudzie i kształcie praktycznie niezależnych od amplitudy i kształtu przebiegu wejściowego.



Rys.3. Integracyjny częstotściomierz elektroniczny analogowy: a) układ; b) przebiegi czasowe. [5, s.102]

W półokresie ujemnym napięcie prostokątnego kondensator C ładuje się do napięcia $U_c = U_m$, a w półokresie dodatnim rozładowuje się przez miernik magnetoelektryczny M. Stałe czasowe ładowania i rozładowania kondensatora są tak dobrane, aby przy maksymalnej częstotliwości mierzonej kondensator C był całkowicie naładowany, a następnie całkowicie rozładowany. Ładunek zgromadzony w kondensatorze podczas półokresu dodatniego wynosi:

$$Q = C U_0$$

przy czym: U_0 – napięcie, do którego ładuje się kondensator; C – pojemność kondensatora.

Podczas rozładowania kondensatora ładunek ten będzie przepływał przez miernik magnetoelektryczny. Jeżeli częstotliwość badanego przebiegu wynosi f_x , to tyleż razy w ciągu sekundy rozładowuje się kondensator i decydująca o wskazaniu miernika wartość średnia prądu wyniesie

$$I_{av} = Q f_x = C U_0 f_x$$

przy czym: I_{av} – wartość średnia prądu, f_x - częstotliwość badanego przebiegu

Odchylenie organu ruchomego miernika magnetoelektrycznego

$$\alpha_x = c_1 I_{av} = c_1 C U_0 f_x = c_2 f_x$$

przy czym: c_1 i c_2 – stałe.

Przy $U_0 = \text{const}$ i $C = \text{const}$, prąd rozładowania zależy wyłącznie od częstotliwości i miernik magnetoelektryczny może być wzorcowany w hercach.

Mierniki zbudowane na tej zasadzie są stosowane do pomiarów częstotliwości nie większych niż kilkaset kiloherców. Górny zakres częstotliwościowy jest ograniczony przede wszystkim pojemnościami pasożytniczymi układu pogarszającymi kształt impulsów na wyjściu układu kształtującego oraz niepełnym rozładowaniem się kondensatora. Dokładność częstotściomierza zależy głównie od dokładności kształtowania impulsów prostokątnych, stałości pojemności, stałości amplitudy oraz klasy użytego miernika magnetoelektrycznego. Częstotściomierze takie są wykonywane w klasach dokładności: 0,5; 1; 1,5.

Częstościomierz cyfrowy

Pomiar częstotliwości metodą cyfrową polega na porównaniu wielokrotności okresu przebiegu badanego z wzorcowym odstępem czasu. Pomiar częstotliwości realizuje się przez zliczanie w ciągu określonego czasu liczby impulsów odpowiadających liczbie okresów badanego sygnału.

Zasadę pracy częstościomierza cyfrowego przedstawiono na rys. 4. Badany przebieg u_a po ewentualnym wzmocnieniu, jest formowany w ciąg impulsów u_b o takiej samej częstotliwości co mierzona. Wzorzec częstotliwości, wraz z układami powielania i dzielenia częstotliwości, wytwarza ciąg impulsów wzorcowych u_c o częstotliwości f_w .

Impulsy te wyzwalają układ sterowania, którym najczęściej jest przerzutnik bramkujący. Przerzutnik ten wyznacza wzorcowy czas pomiaru T_p , w którym otwarta jest bramka. W czasie otwarcia bramki, do licznika są doprowadzone impulsy o częstotliwości mierzonej f_x . Liczba zliczonych impulsów:

$$N_x = T_p f_x$$

przy czym: T_p - wzorcowy czas pomiaru, f_x - częstotliwość mierzona.
i stąd

$$f_x = \frac{N_x}{T_p}$$

wyznacza bezpośrednio na wskaźnikach cyfrowych licznika wartość mierzonej częstotliwości f_x .

Układ kasowania doprowadza licznik do stanu zerowego tuż przed otwarciem bramki. Kasowanie odbywa się w czasie wyznaczonym przez układ opóźniający a zawartym między impulsem startowym doprowadzonym do układu sterowania (chwila t_1) i otwarciem bramki (chwila t_2).

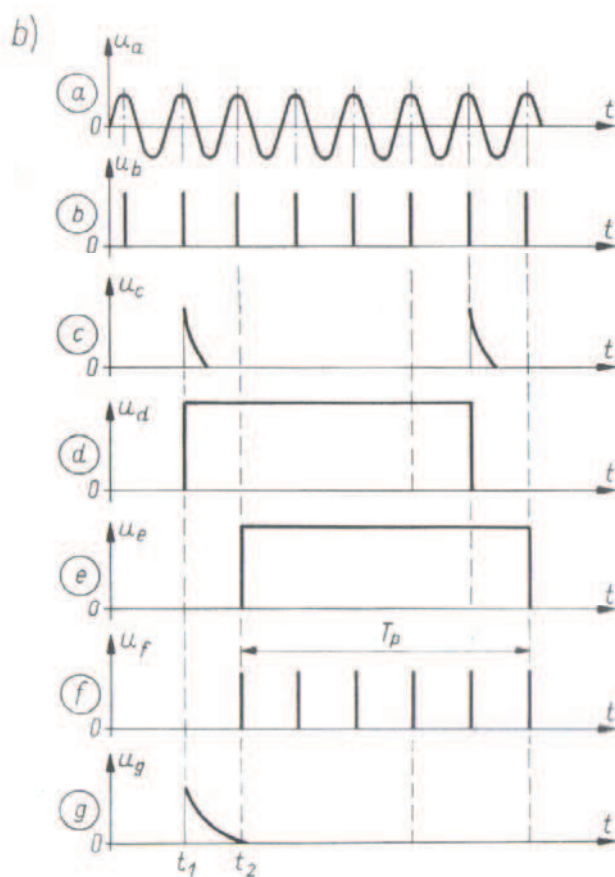
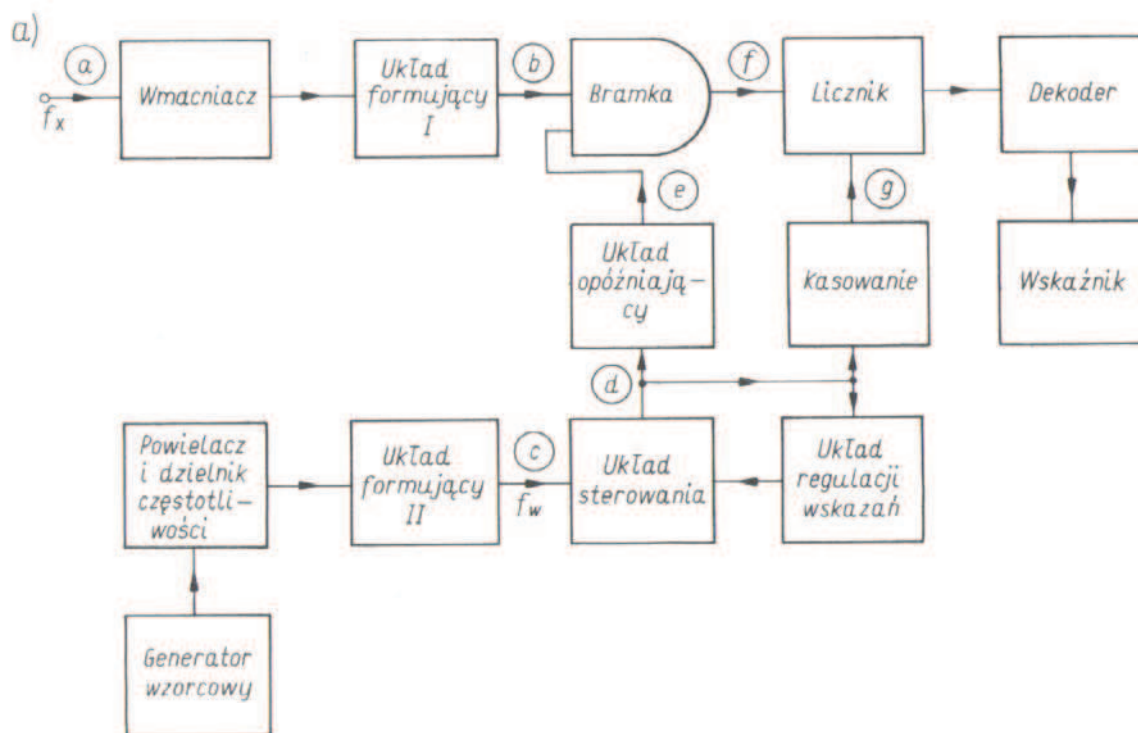
Błąd względny pomiaru

$$\delta_f = \frac{\Delta f_x}{f_x} = \frac{\Delta T_p}{T_p} \pm \frac{1}{N_x} = \delta_{T_p} \pm \frac{1}{N}$$

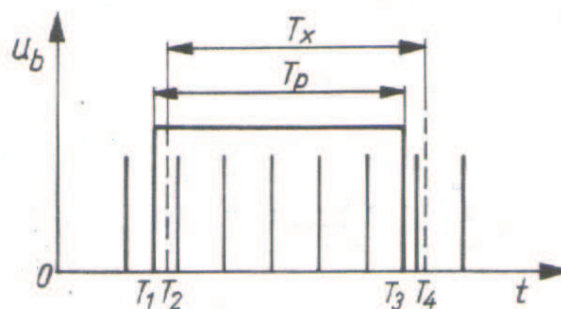
Pierwszy składnik δ_{T_p} w tym wyrażeniu nosi nazwę błędu analogowego i zależy od dokładności wzorca częstotliwości (określa się ją na podstawie błędu wzorca częstotliwości δ_w) oraz od błędu bramkowania δ_B . Błąd wzorca częstotliwości jest uwarunkowany niestałością jego częstotliwości. Stosując stabilizację kwarcową w generatorze, będącym źródłem impulsów wzorcowych, można błąd ten sprowadzić do bardzo małych wartości ($\delta_w = 10^{-9}$).

Błąd bramkowania δ_B wynika z asynchronizmu impulsów bramkujących i bramkowych (rys. 5), ze skończonych czasów otwierania i zamykania bramki (czasy τ_o i τ_z na rys. 6) oraz wpływu poziomu wyzwalania przerzutnika bramkującego.

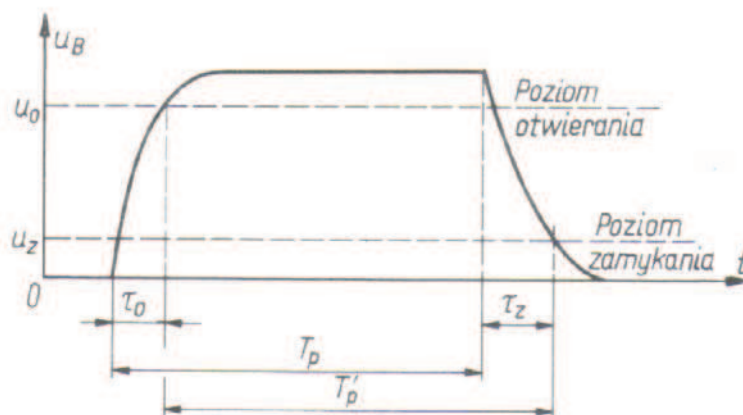
Drugi ze składników ($\pm \frac{1}{N}$) – nazywany błędem zliczania wynika z przypadkowego położenia impulsu wyznaczającego czas pomiaru T_p i ciągu impulsów zliczanych (rys. 5). Wskutek tego licznik może zliczyć o jeden impuls za dużo lub o jeden impuls za mało. Błąd zliczania jest tym mniejszy, im dłuższy jest czas pomiaru (1ms ÷ 10s). Stosowanie zbyt długich czasów pomiarów jest niekorzystne (przy pomiarach małej częstotliwości), gdyż przy szybkich zmianach częstotliwość mierzonej miernik wskazuje jej wartość średnią. Z tych względów dolny zakres pomiaru rozszerza się przez stosowanie pomiaru okresu badanego przebiegu lub przez powielanie częstotliwości.



Rys. 4. Zasada działania częstotściomierza cyfrowego: a) schemat blokowy; b) przebiegi napięć w poszczególnych punktach miernika. [2, s. 252]



Rys. 5. Wyjaśnienie powstawania błędu zliczania.[1, s. 430]

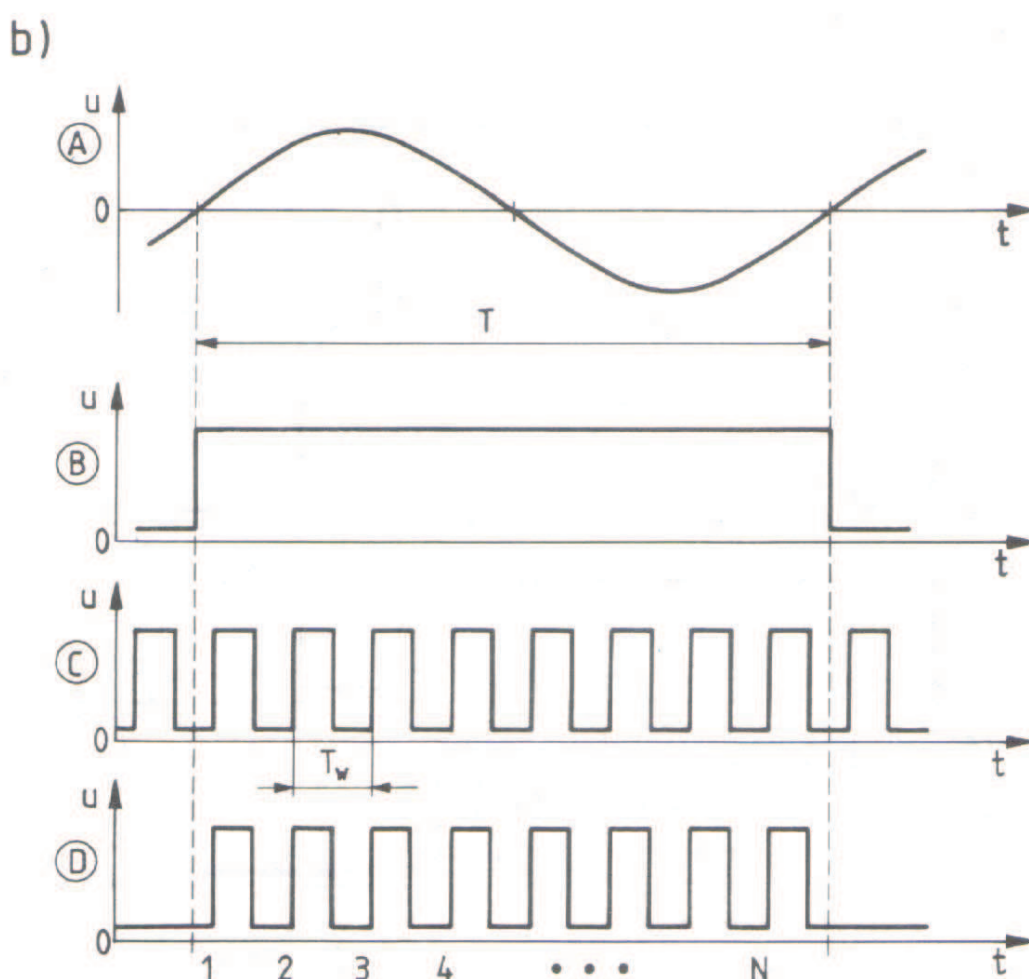
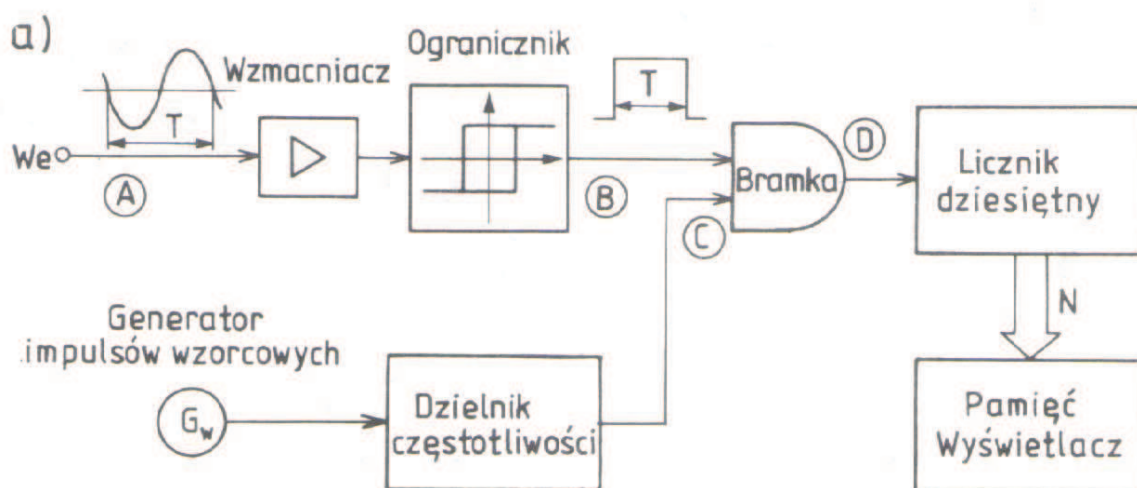


Rys. 6. Wyjaśnienie powstawania błędu bramkowania. [2, s. 254]
 T_p – zas otwarcia bramki; T_x – czas mierzony

Okresomierz cyfrowy

Pomiar okresu może odbywać się w tym samym układzie co pomiar częstotliwości, z tą różnicą, że jest odwrócona rola impulsów wzorcowych zliczanych w liczniku. Zasadę działania okresomierza cyfrowego przedstawia rys.7.

Sygnał wejściowy o nieznanym okresie T_x steruje czasem otwarcia bramki, a impulsy o częstotliwości wzorcowej są zliczane przez licznik. Wejściowy układ formowania wybiera zwykle kolejne, dodatnie przejścia przez zero mierzonego sygnału okresowego jako momenty otwierania i zamykania bramki (rys. 7 b-A,B). Analogicznie do pomiaru częstotliwości pomiar powtarzany jest cyklicznie (praca automatyczna) lub też może być wykonany jednorazowo (praca wyzwiania). Licznik dziesiętny zlicza impulsy prostokątne „przepuszczane” przez bramkę w czasie T . Po zakończeniu tego czasu stan licznika jest proporcjonalny do mierzonego czasu. Układ pamięci licznika pozwala na zapamiętanie wyniku zawartości licznika i jej wyświetlanie na wyświetlaczu 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.



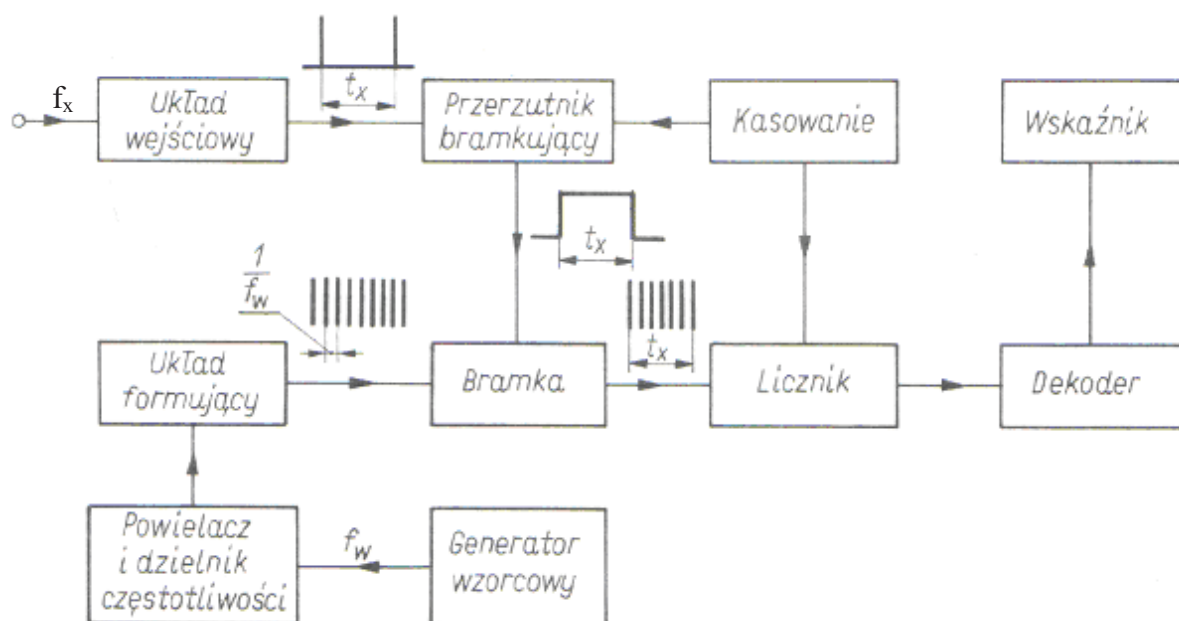
Rys. 7. Okresomierz cyfrowy: a) schemat strukturalny; b) czasowe przebiegi sygnałów w wybranych punktach układu. [5, s. 163]

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

Czasomierz cyfrowy

Zasadę działania czasomierza cyfrowego przedstawia rys. 8. Pomiar czasu sprowadza się do zliczania, w mierzonym czasie, impulsów powtarzających się z wzorcową częstotliwością f_w . Impulsy wejściowe, wyznaczające początek i koniec przedziału t_x , sterują przerzutnikiem bramkującym. Przerzutnik ten wytwarza impuls bramkujący, który otwiera bramkę na czas między kolejnymi impulsami wejściowymi. Impulsy wzorcowe o okresie T_w są otrzymywane z generatora wzorcowego.



Rys. 8. Schemat funkcjonalny czasomierza.[2, s. 255]

Po powieleniu lub podzieleniu częstotliwości, sygnał z generatora wzorcowego (najczęściej o przebiegu sinusoidalnym) jest formowany w ciąg impulsów o parametrach wymaganych do wysterowania licznika impulsów. Impulsy wzorcowe przechodzą przez bramkę, która jest otwarta w czasie wyznaczonym przez impulsy wejściowe, a następnie wprowadzone do licznika impulsów. Stan licznika jest uprzednio skasowany przez układ kasowania. Liczba zliczanych impulsów:

$$N_x = t_x f_w$$

jest proporcjonalna do mierzonego przedziału czasu t_x . Przedział czasu t_x może być okresem T_x badanego przebiegu.

Zakres pomiarowy, czyli maksymalny przedział czasu, który może być zmierzony przez dany czasomierz, zależy od pojemności $N_{\max}$ licznika i okresu impulsów wzorcowych T_w ; zatem

$$t_{x \max} = N_{\max} T_w$$

Pojemność licznika jest stała w danym przyrządzie, można natomiast zmieniać okres impulsów wzorcowych T_w , najczęściej przez przełączenie dekadowych powielaczy lub dzielników częstotliwości wzorcowej. Jedynym ograniczeniem jest czas rozdzielczy licznika.

Przy wyznaczaniu okresu przebiegu, np. sinusoidalnego, formuje się impuls bramkujący odpowiadający m mierzonym okresom T_x , czyli

$$m T_x = N_x T_w$$

stąd:
$$T_x = \frac{N_x T_w}{m}$$

Błąd względnego cyfrowego pomiaru czasu wyraża się wzorem:

$$\delta_{Tx} = \pm \delta_w \pm \delta_z \pm \frac{1}{N}$$

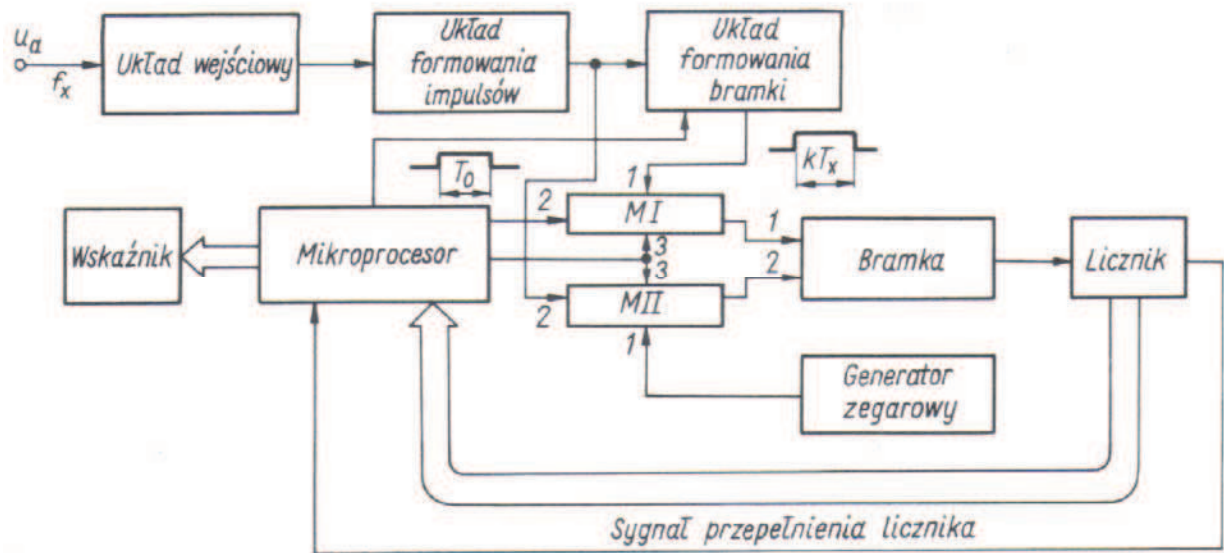
gdzie:

- błąd wzorca częstotliwości - $\delta_w = \frac{\Delta T_w}{T_w}$,
- błąd wyzwalania $\delta_z = \frac{\Delta T_z}{t_x}$,
- błąd zliczania $\pm \frac{1}{N}$.

Składowa błęd δ_z wynika (podobnie jak błąd bramkowania w częstotściomierzu) z progu nieczułości układu wytwarzającego impuls bramkujący i z braku synchronizmu tego impulsu z impulsami wzorcowymi.

Mikroprocesorowe częstotściomierze – czasomierze

Obecnie elektroniczne przyrządy cyfrowe budowane są w oparciu o mikroprocesory. Zastosowanie mikroprocesorów w częstotściomierzach-czasomierzach cyfrowych pozwala na automatyzację wyboru zakresu i procedury pomiarowej, w szczególności przy znajdowaniu wartości częstotliwości jako operacji odwrotnej do bezpośredniego pomiaru okresu. Przykładowy schemat funkcjonalny częstotściomierza mikroprocesorowego przedstawiono na rys. 9. Umożliwia on pomiar częstotliwości w sposób pośredni (przez pomiar okresu) w zakresie do kilku kHz oraz bezpośredni – większych częstotliwości.



Rys. 9. Schemat funkcjonalny częstotściomierza mikroprocesorowego. [2. s, 257]

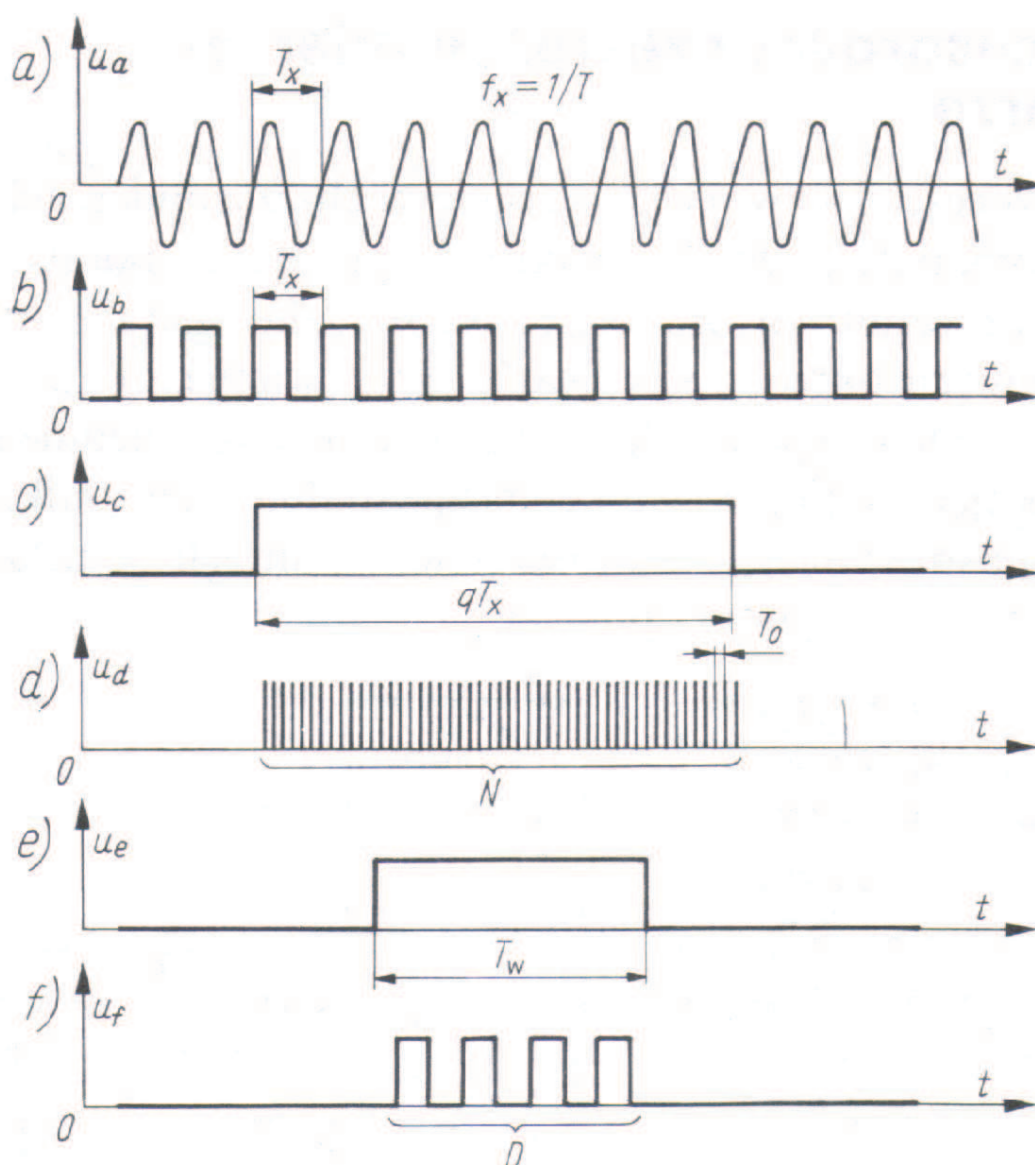
Zasadę działania przyrządu (jako częstotściomierza) rozpatrzono na podstawie schematu funkcjonalnego (rys. 9) i przebiegu sygnałów pomiarowych w jego strukturze (rys. 10).

Napięcie u_a (rys. 10a), którego częstotliwość f_x jest mierzona, podawane jest przez układ wejściowy na wejście układu formującego, który przetwarza je w ciąg jednokierunkowych impulsów o częstotliwości przetwarzania f_x . Trafiają one z kolei do układu formowania

bramki, który zawiera układ dzielnika częstotliwości (o współczynniku podziału q zadawanym przez mikroprocesor).

Cykl pomiarowy rozpoczyna się zawsze od pomiaru okresu. Determinuje to się podaniem sygnału z mikroprocesora na sterujące wejścia (3) obydwu multiplekserów (MI i MII), który powoduje przepisywanie sygnałów z wejść 1 multiplekserów na wejścia 1 i 2 bramki. Jednocześnie w dzielniku częstotliwości (układ formowania bramki) wybierany jest współczynnik podziału q_1 . W rezultacie na wejście 1 bramki jest podawany impuls bramkujący o czasie trwania $q_1 T_x$ (rys. 10c), gdzie T_x okres badanego przebiegu. Natomiast na wejście 2 bramki przychodzą impulsy wypełnienia z generatora zegarowego (rys. 10d). Ich liczba wynosi $N = q_1 f_0 T_x$.

Jeżeli ta liczba jest większa niż pojemność licznika, to następuje jego przepełnienie. Sygnał przepełnienia i ostatni bit informacji zapamiętany przez licznik są przepisywane do mikroprocesora, a stąd – po obliczeniu częstotliwości – do wskaźnika.



Rys. 10. Przebiegi sygnałów w odpowiednich punktach częstotściomierza mikroprocesorowego. [2. s, 258]

Jeśli wartość okresu T_x badanego sygnału okaże się niedostatecznie duża, to mikroprocesor zachowuje ten reżim pomiaru, automatycznie ustawia w dzielniku częstotliwości inny współczynnik podziału (q_2). Wówczas czas trwania impulsu bramkowego

wynosi $q_2 \cdot T_x$. Może się okazać, że i teraz liczba impulsów wypełnienia jest zbyt mała. Wówczas mikrokomputer zmienia procedurę pomiaru – następuje przejście przyrządu do bezpośredniego pomiaru częstotliwości. Wówczas mikrokomputer wymusza (odpowiednim sygnałem sterującym) przepisywanie do wejść 1 i 2 bramki sygnałów z wejść 2 multiplexerów MI i MII. Na wejście 1 bramki jest podawany impuls bramkujący o czasie trwania T_w (równym okresowi wzorcowemu rys. 10e). Na wejście 2 bramki jest podawany ciąg impulsów o częstotliwości powtarzania równej częstotliwości mierzonej f_x (rys. 10b). Do licznika trafi liczba impulsów zdeterminowana czasem trwania impulsu bramkującego (rys. 10f). Zapamiętana w liczniku liczba impulsów i sygnał przepełnienia (jeśli się pojawia) są przypisywane do mikroprocesora, który po odpowiedniej obróbce przesyła wynik pomiaru do wskaźnika.

Fazomierze cyfrowe

Cyfrowy pomiar wartości chwilowej przesunięcia fazowego jest oparty na cyfrowym pomiarze przedziałów czasu. Zasada działania fazomierza cyfrowego przedstawia rys. 11. Napięcie u_1 i u_2 , między którymi należy zmierzyć przesunięcie fazowe, są doprowadzone do wejść I i II. Z przebiegu tych napięć są kształtowane fale prostokątne, które są następnie różniczkowane i obcinane jednostronnie (rys. 11). Otrzymywane na wyjściach obcinaczy impulsy są przesunięte względem siebie w czasie. Przesunięcie czasowe obydwu ciągów impulsów zależy od różnicy faz obu napięć wejściowych. Impulsy te sterują przerzutnikiem bramkującym, który wytwarza z kolei impuls bramkujący. Impuls odpowiadający przejściu przez zero u_1 powoduje w konsekwencji otwarcie bramki, a impuls otrzymany przy przejściu przez napięcia u_2 zamyka ją. W czasie otwarcia bramki są zliczone impulsy dopływające z generatora impulsów wzorcowych.

Przełącznik P_1 (rys. 11a) ustawia się w pozycję „wzorcowanie” i następnie dokonuje się pomiaru okresu T_x napięć badanych. Jeśli na wskaźniku licznika odczytano N_1 impulsów, to okres

$$T_x = N_1 \frac{1}{f_w} = N_1 T_w$$

Następnie przełącznik ustawia się w położenie „pomiar” i odczytuje się liczbę N_2 impulsów będącą miarą opóźnienia czasowego

$$t_x = N_2 T_w$$

Wobec tego przesunięcie fazowe

$$\varphi_x = \frac{t_x}{T_x} 360^\circ = \frac{N_2 T_w}{N_1 T_w} 360^\circ = \frac{N_2}{N_1} 360^\circ$$

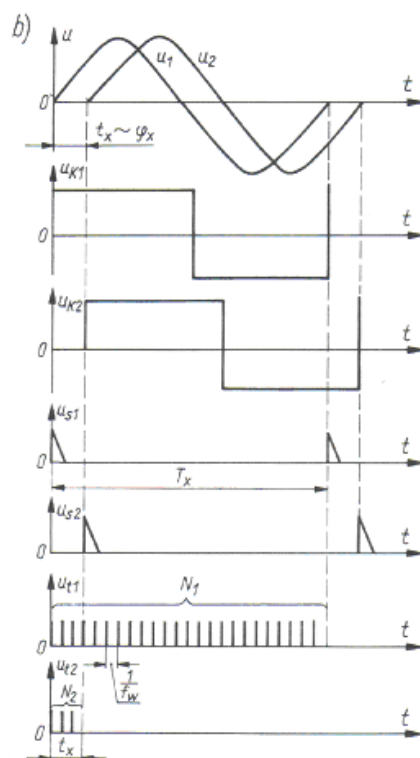
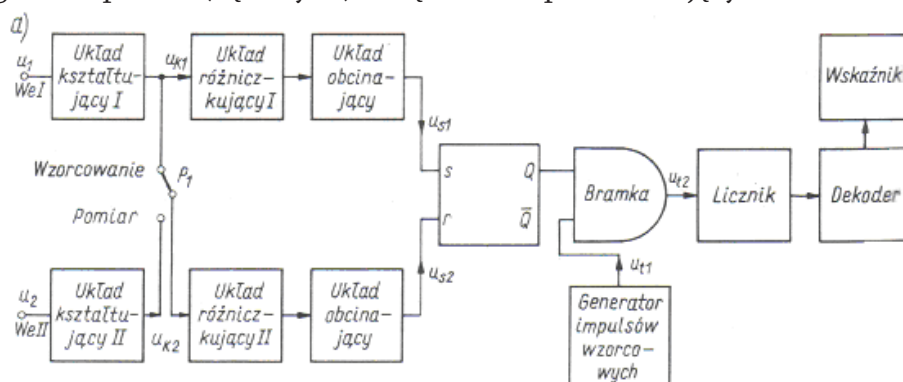
W miernikach, w których chodzi o szybki bezpośredni odczyt, dobiera się częstotliwość wzorcową f_w tak, aby był spełniony warunek

$$f_w = 3,6 \cdot 10^k f_x$$

przy czym : k – liczba naturalna, najczęściej 2 lub 3; f_x – częstotliwość przebiegów badanych. W tym przypadku przesunięcie fazowe φ_x jest jednoznacznie określone przez odczyt liczby impulsów N_2

$$\varphi_x = \frac{360 N_2}{N_1} = \frac{3,6 \cdot 10^2 N_2}{3,6 \cdot 10^k} = N_2 \cdot 10^{2-k}$$

Jeśli $k = 2$, to φ_x jest liczbowo równe N_2 i miernik umożliwia szybki pomiar przesunięcia fazowego w stopniach (kątowych) z błędem nie przekraczającym $\pm 1^\circ$.



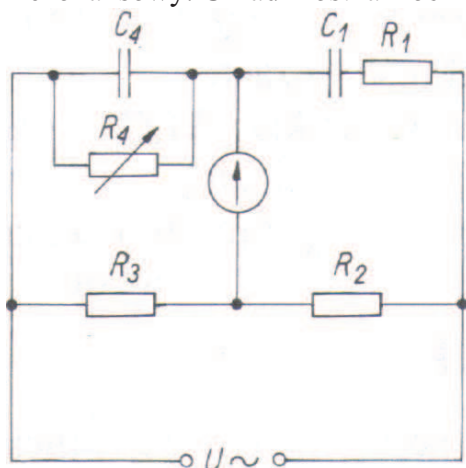
Rys. 11. Zasada działania fazomierza cyfrowego wartości chwilowych: a) schemat funkcjonalny; b) przebiegi napięć w odpowiednich punktach przyrządu. [2. s, 260]

Na błąd pomiaru wartości chwilowej przesunięcia fazowego mają wpływ: błąd zliczania $1/N_2$, dodatkowe opóźnienia w obu kanałach (odpowiada temu dodatkowy błąd $\Delta\varphi_p$), niestabilność częstotliwości wzorcowej i mierzonej (zmniejsza się przez stosowanie synchronizacji) – δ_s , błąd bramkowania δ_B i błąd δ_z uwarunkowany zniekształceniami przebiegu badanego. Największe wartości mają najczęściej składniki δ_z i $1/N_2$. Ogólnie graniczną wartość błędu względnego pomiaru przesunięcia fazowego oblicza się ze wzoru

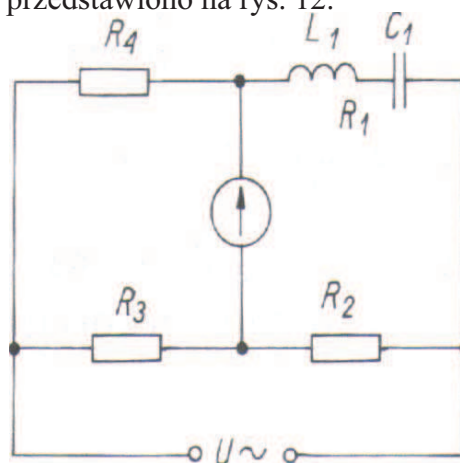
$$\delta\varphi_m = \frac{\Delta\varphi_{xm}}{\varphi_x} = |\delta_s| + |\delta_B| + \frac{\Delta\varphi_p}{\varphi_x} + |\delta_z| + \frac{1}{N_2}.$$

Mostki do pomiaru częstotliwości

Do pomiaru częstotliwości można zastosować mostek zależny od częstotliwości. Najczęściej stosowanymi układami są mostki: mostek Robinsona–Wiena oraz mostek rezonansowy. Układ mostka Robinsona-Wiena przedstawiono na rys. 12.



Rys. 12. Układ mostka Robinsona-Wiena do pomiaru częstotliwości. [4.s , 366]



Rys. 13. Układ mostka rezonansowego. [4. s , 366]

W stanie równowagi mostka Robinsona-Wiena słuszna jest zależność:

$$\left(R_1 + \frac{1}{j\omega C_1} \right) R_3 = \frac{R_2 R_4}{1 + j\omega R_4 C_4}$$

A zatem warunki równowagi mostka przyjmują postać:

$$\omega^2 R_1 C_1 R_4 C_4 = 1,$$

$$\frac{R_2}{R_3} = \frac{R_1}{R_4} + \frac{C_4}{C_1}.$$

W mostkach służących do pomiaru częstotliwości $R_1 = R_4 = R$ oraz $C_1 = C_4 = C$, stąd: $R_2 / R_3 = 2$. Mostek jest w równowadze przy częstotliwości

$$f = \frac{1}{2\pi RC}.$$

Układ mostka rezonansowego przedstawiono na rys.13. Stan równowagi tego mostka określają równania:

$$\frac{R_1}{R_4} = \frac{R_2}{R_3} \quad \text{oraz} \quad \omega L_1 = \frac{1}{\omega C_1}.$$

A zatem mostek jest w równowadze przy częstotliwości

$$f = \frac{1}{2\pi\sqrt{L_1 C_1}}.$$

Mostki stosuje się do pomiaru częstotliwości w zakresie do około 150 kHz, a ich błąd pomiaru wynosi $0,1 \div 0,3\%$. Przy większych częstotliwościach zrównoważenie mostka jest trudne.

4.1.2. Pytania sprawdzające

Odpowiadając na pytania sprawdzisz, czy jesteś przygotowany do wykonania ćwiczeń.

1. Jakie znasz rodzaje częstotściomierzy?
2. Jak jest zbudowany i jaka jest zasada działania częstotściomierza rezonansowego?
3. Jak jest zbudowany i jaka jest zasada działania częstotściomierza integracyjnego?
4. Jak jest zbudowany i jaka jest zasada działania częstotściomierza cyfrowego?
5. Jak jest zbudowany i jaka jest zasada działania okresomierza cyfrowego?
6. Jak jest zbudowany i jaka jest zasada działania czasomierza cyfrowego?
7. Jak jest zbudowany i jaka jest zasada działania fazomierza cyfrowego?
8. Jak jest zbudowany i jaka jest zasada działania częstotściomierza mikroprocesorowego?
9. Jak jest zbudowany i jaka jest zasada działania mostka rezonansowego?
10. Jakie są podstawowe parametry częstotściomierzy?
11. Jakie funkcje posiadają częstotściomierze?

4.1.3. Ćwiczenia

Ćwiczenie 1

Badanie częstotściomierza cyfrowego. Cyfrowy pomiar czasu i częstotliwości.

Sposób wykonania ćwiczenia

Aby wykonać ćwiczenie powinieneś:

- 1) zapoznać się z dokumentacją badanego częstotściomierza- czasomierza,
- 2) zapoznać się z dokumentacją generatora funkcyjnego,
- 3) sprawdzić poprawność pracy częstotściomierza wzorcowego,
- 4) narysować schematy pomiarowe i zaproponować tabelki, w których będą zapisywane wyniki pomiarów,
- 5) zmontować układ pomiarowy, włączając do zacisków wyjściowych generatora częstotściomierz-czasomierz i oscyloskop,
- 6) zmierzyć częstotliwość wewnętrznego generatora częstotściomierza badanego i zanotować jej zmiany w przeciągu 10 min.,
- 7) wykonać serię 20 pomiarów zadanej częstotliwości,
- 8) opracować wyniki pomiarów,
- 9) sformułować wnioski na podstawie uzyskanych wyników pomiaru.

Wyposażenie stanowiska pracy:

- częstotściomierz-czasomierz cyfrowy,
- częstotściomierz wzorcowy,
- generator funkcyjny,
- oscyloskop dwukanałowy,
- instrukcje obsługi częstotściomierzy, generatora, oscyloskopu.

Ćwiczenie 2

Określić błędy pomiaru częstotliwości 1 kHz i 10 MHz metodami: bezpośrednią i pośrednią, dla różnych wartości czasów zliczania oraz różnej liczby mierzonych okresów.

Sposób wykonania ćwiczenia

Aby wykonać ćwiczenie powinienś:

- 1) zapoznać się z dokumentacją badanego częstotściomierza-czasomierza.
- 2) zapoznać się z dokumentacją generatora funkcyjnego,
- 3) narysować schematy pomiarowe i zaproponować tabelki, w których będą zapisywane wyniki pomiarów,
- 4) skompletować aparaturę potrzebną do przeprowadzenia niezbędnych pomiarów,
- 5) dokonać pomiaru częstotliwości 1 kHz i 10 MHz metodą bezpośrednią dla różnych wartości czasów zliczania oraz różnej liczbie mierzonych okresów,
- 6) dokonać pomiaru częstotliwości metodą pośrednią – tj przez pomiar okresu T,
- 7) obliczyć błędy pomiaru częstotliwości,
- 8) zaprezentować wyniki i sformułować wnioski.

Uwaga:

Zanim zostanie przyłączone napięcie, połączony układ pomiarowy musi sprawdzić nauczyciel.

Wyposażenie stanowiska pracy

- częstotściomierz- czasomierz cyfrowy,
- generator funkcyjny,
- oscyloskop z sondami pomiarowymi,
- instrukcje obsługi.

Ćwiczenie 3

Zbadać wpływ sygnału zakłócającego na dokładność pomiaru okresu przy różnych poziomach wzmocnienia układu wejściowego częstotściomierza.

Sposób wykonania ćwiczenia

Aby wykonać ćwiczenie powinienś:

- 1) zapoznać się z instrukcjami częstotściomierzy,
- 2) sprawdzić poprawność pracy częstotściomierza-czasomierza (funkcja CHECK):przez zadany okres czasu powinny być zliczane impulsy z generatora wewnętrznego częstotściomierza,
- 3) zbadać wpływ sygnału zakłócającego na dokładność pomiaru okresu podając na wejście częstotściomierza najpierw niezakłócony sygnał badany, a następnie ten sam sygnał zsumowany z sygnałem zakłóceniovym o znacznie większej częstotliwości; poziomy sygnałów należy kontrolować na oscyloskopie; sprawdzenia należy dokonać dla 3 różnych nastaw wzmocnienia układu wejściowego badanego częstotściomierza – czasomierza; błąd pomiaru okresu przy dużych częstotliwościach i błąd pomiaru częstotliwości przy małych częstotliwościach badać na częstotściomierzu - czasomierzu, a drugi częstotściomierz wykorzystać jako wzorcowy
- 4) sformułować wnioski na podstawie uzyskanych wyników pomiaru.

Uwaga:

Zanim zostanie przyłączone napięcie, połączony układ pomiarowy musi sprawdzić nauczyciel.

Wypożyczenie stanowiska pracy:

- częstotściomierz-czasomierz cyfrowy,
- częstotściomierz cyfrowy,
- generator dekadowy,
- generator funkcyjny,
- sumator,
- oscyloskop dwukanałowy,
- instrukcje obsługi: częstotściomierzy, generatorów, sumatora, oscyloskopu,
- instrukcja ćwiczenia.

4.1.4. Sprawdzian postępów

Czy potrafisz:	Tak	Nie
1) wymienić rodzaje częstotściomierzy?	☐	☐
2) narysować schemat blokowy częstotściomierza cyfrowego?	☐	☐
3) narysować przebiegi napięć częstotściomierza cyfrowego?	☐	☐
4) narysować schemat funkcjonalny okresomierza cyfrowego?	☐	☐
5) narysować przebiegi napięć okresomierza cyfrowego?	☐	☐
6) narysować schemat funkcjonalny fazomierza cyfrowego?	☐	☐
7) narysować przebiegi napięć fazomierza cyfrowego?	☐	☐
8) wykonać pomiary częstotliwości?	☐	☐
9) wykonać pomiary okresu?	☐	☐
10) wykonać pomiary przesunięcia czasowego?	☐	☐
11) rozpoznać elementy regulacyjne na płycie czołowej częstotściomierzy?	☐	☐
12) rozpoznać gniazda wejściowe częstotściomierzy?	☐	☐
13) oszacować dokładność pomiarów częstotściomierzem?	☐	☐

4.2. Generatory pomiarowe

4.2.1. Materiał nauczania

Podział i wymagania

Generatory pomiarowe są używane jako źródła kalibrowanych sygnałów, podawanych na wejścia badanych układów, oraz jako wzorce przy pomiarach porównawczych.

Znajdują bardzo szerokie zastosowanie w miernictwie: w badaniach elementów czynnych i biernych, układów scalonych, urządzeń elektrycznych i elektronicznych, przetworników pomiarowych i wielu innych. Generatory (np. monolityczne) stanowią funkcjonalny blok urządzenia elektronicznego. Konstrukcyjnie generatory są układami elektronicznymi wytwarzającymi sygnały wyjściowe (najczęściej napięciowe) o ściśle określonych parametrach. Do ich budowy wykorzystuje się różnorodne układy generacyjne, syntezy częstotliwości oraz układy przetworników analogowo- cyfrowych.

Można je klasyfikować według różnych kryteriów. Najczęstszymi kryteriami są: częstotliwość, moc lub kształt generowanych sygnałów.

Ze względu na częstotliwość generatory można podzielić na:

- generatory częstotliwości podakustycznych ($0,001 \text{ Hz} \div 20 \text{ Hz}$),
- generatory częstotliwości akustycznych ($20 \text{ Hz} \div 20 \text{ kHz}$),
- generatory częstotliwości ponadakustycznych ($20 \text{ kHz} \div 100 \text{ kHz}$),
- generatory wielkiej częstotliwości ($100 \text{ kHz} \div 150 \text{ MHz}$),
- generatory bardzo wielkiej częstotliwości ($150 \text{ MHz} \div 30 \text{ GHz}$).

Generatory pierwszych trzech grup mają wiele wspólnych cech i dlatego łączy się je zwykle w jedną grupę zwaną generatorami małej częstotliwości.

Ze względu na moc sygnału wyjściowego rozróżnia się:

- generatory małej mocy ($P_{wy} \leq 0,1 \text{ W}$),
- generatory średniej mocy ($P_{wy} \leq 10 \text{ W}$),
- generatory dużej mocy ($P_{wy} > 10 \text{ W}$).

Generatory małej mocy są budowane na wszystkie zakresy częstotliwości. Generatory średniej mocy pracują w zakresie małych częstotliwości. Generatory o mocach wyjściowych większych od 10 W buduje się najczęściej o zakresach bardzo wielkich częstotliwości.

Ze względu na kształt generowanych napięć generatory można podzielić na:

- generatory napięć sinusoidalnych,
- generatory funkcyjne.

Do drugiej grupy należą między innymi generatory napięć prostokątnych, przebiegów trójkątnych i piłokształtnych oraz generatory szumów i generatory dewiacyjne.

Wymagania stawiane generatorom dotyczą przede wszystkim takich parametrów jak:

- zakres częstotliwości,
- możliwość przestrajania i odczytu częstotliwości w sposób ciągły,
- stabilność częstotliwości,
- możliwość regulacji i odczytu napięcia wyjściowego,
- stabilność napięcia wyjściowego i jego niezależności od częstotliwości,
- małe zniekształcenia generowanych przebiegów (stromość zboczy dla generatorów impulsów, liniowość zboczy dla generatorów przebiegów piłokształtnych lub trójkątnych, mała zawartość harmonicznych dla generatorów przebiegów sinusoidalnych itp.)
- współczynnik wypełnienia (generatory impulsowe).

Generatory używane w warunkach laboratoryjnych z reguły są szerokopasmowe z regulacją ciągłą w pełnym zakresie lub podzakresach, a niekiedy z regulacją dyskretną.

Czasami są używane generatory o jednej lub dwóch wartościach częstotliwości sygnału wyjściowego - szczególnie wtedy, kiedy generator jest częścią przyrządu pomiarowego (np. uniwersalnego mostka RLC).

Dokładność generatora pomiarowego jest uwarunkowana stabilnością drgań, dokładnością wzorcowania, dokładnością naniesienia podziałki i jej zdolnością rozdzielczą.

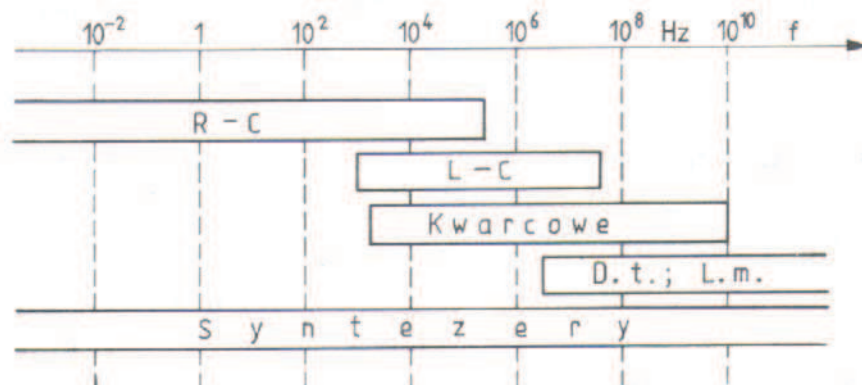
Dzięki stosowaniu obwodów o dobrych wartościach filtracyjnych, stabilność ma znacznie mniejszy wpływ na dokładność nastawianej częstotliwości niż pozostałe czynniki. Największą stabilność mają generatory napięć sinusoidalnych ($10^{-3} \div 10^{-4}$).

Dokładność wzorcowania zależy od dokładności użytego generatora wzorcowego i dokładności porównania. Jednakże, nawet przy zastosowaniu do skalowania generatora wzorcowego o odpowiedniej dokładności, może powstać błąd z niezbyt dokładnego nanoszenia podziałki.

Błąd odczytu, związany ze zdolnością rozdzielczą podziałki, zależy od wartości różnicy częstotliwości odpowiadających dwóm sąsiednim kreskom podziałki – stąd tendencje do nanoszenia ich na tarczach o dużych średnicach. Sumaryczny błąd nastawiania częstotliwości w generatorach pomiarowych wynosi $0,1 \div 2 \%$.

Impedancja wyjściowa generatorów o małej mocy jest zawarta w przedziale od kilku omów do kilku kiloomów (najczęściej 50Ω lub 600Ω), w zależności od zakresu częstotliwości i przeznaczenia. Dla generatorów napięć sinusoidalnych odpowiednią wartość impedancji zapewniają wyjściowe transformatory dopasowujące.

Generatory sygnałów sinusoidalnych są wytwarzane na zakresy częstotliwości od $10^{-3} \div 10^{11}\text{Hz}$. Do generacji sygnałów w tak szerokim zakresie częstotliwości stosuje się różne elementy i różne metody (rys. 16).



Rys. 16. Metody generacji drgań w zależności od zakresu częstotliwości (D.t. – diody tunelowe; L.m. – lampy mikrofalowe) [5, s. 33]

Jakość generowanych sygnałów określa się za pomocą:

- współczynnika zawartości harmoniczných w generatorach napięć w sinusoidalnych;
- czasu trwania impulsu i poszczególnych jego części w generatorach impulsowych;
- widmowego rozkładu gęstości mocy w generatorach szumów;
- zakresu dewiacji i częstotliwości powtarzania przebiegów w generatorach dewiacyjnych.

Generatory produkowane w kraju powinny spełniać wymagania norm:

PN-73/T-06503 [56]- „Generatory pomiarowe małej częstotliwości. Ogólne wymagania i badania” oraz PN-84/T-06508 [57]- „Generatory impulsowe pomiarowe. Ogólne wymagania i badania” .

Generatory sygnałów sinusoidalnych

Generatory sygnałów sinusoidalnych są układami wzmacniacza ze sprzężeniem zwrotnym spełniającym warunek amplitudy tzn. wzmocnienie amplitudy w pętli sprzężenia

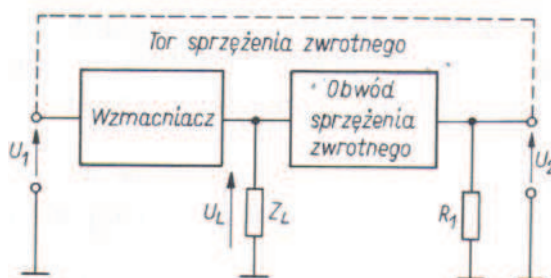
zwrotnego powinno być równe jedności ($K_u\beta = 1$) oraz warunek fazy tzn. całkowite przesunięcie fazy w pętli sprzężenia zwrotnego powinno być wielokrotnością kąta pełnego czyli: $\varphi + \psi = 2n\pi$ gdzie $n = 0, 1, 2, \dots$. Koncepcję układu generatora sygnału sinusoidalnego przedstawiono na rysunku 17. Jako sprzężenie zwrotne stosuje się obwody rezonansowe LC (generatory Hartleya, Colpittsa, Clappa, Meissnera oraz ich modyfikacje z rezonatorem kwarcowym) lub filtry selektywne (filtr lub mostek Wiena, fitry podwójne T).



Rys. 17. Układ generatora sygnału sinusoidalnego [5, s.34]

Generatory małej częstotliwości

Podstawowym elementem każdego generatora jest wzmacniacz. Jeżeli do jego wejścia zostanie doprowadzone napięcie U_1 , to na wyjściu pojawi się napięcie przemienne o wartości $U_L = KU_1$ (K - wzmacnienie napięciowe) i przesunięciu fazowym φ_1 . Wyjście wzmacniacza jest obciążone przez odbiornik o impedancji Z_L oraz przez obwód sprzężenia zwrotnego.



Rys. 18. Ilustracja do określania warunków występowania drgań generatora [2, s.98]

Napięcie na wyjściu obwodu sprzężenia zwrotnego ma wartość $U_2 = \beta U_L$ (β – współczynnik sprzężenia zwrotnego) oraz przesunięcie fazowe φ_2 względem napięcia U_L .

W celu sprawdzenia, czy generator ma właściwości wytwarzania drgań, przerywa się tor sprzężenia zwrotnego i obciąża wyjście tego obwodu rezystancją R_1 równą rezystancji wejściowej wzmacniacza (Rys. 18). Następnie doprowadza się do wejścia wzmacniacza napięcie U_1 i mierzy napięcie U_2 . Generator ma właściwości wytwarzania drgań wówczas, gdy napięcie wyjściowe jest równe napięciu wejściowemu. Warunkiem koniecznym wystąpienia drgań jest zatem:

$$\beta U_L = \beta K U_1 = U_1$$

stąd $\beta K = 1$, a ponieważ K i β są w ogólnym przypadku liczbami zespolonymi, więc

$$K\beta e^{j(\varphi_1 + \varphi_2)} = 1$$

Z równania tego wynikają dwa warunki:

$$K\beta = 1 \quad \text{i} \quad \varphi_1 + \varphi_2 = 2n\pi \quad \text{gdzie } n = 0, 1, 2, \dots$$

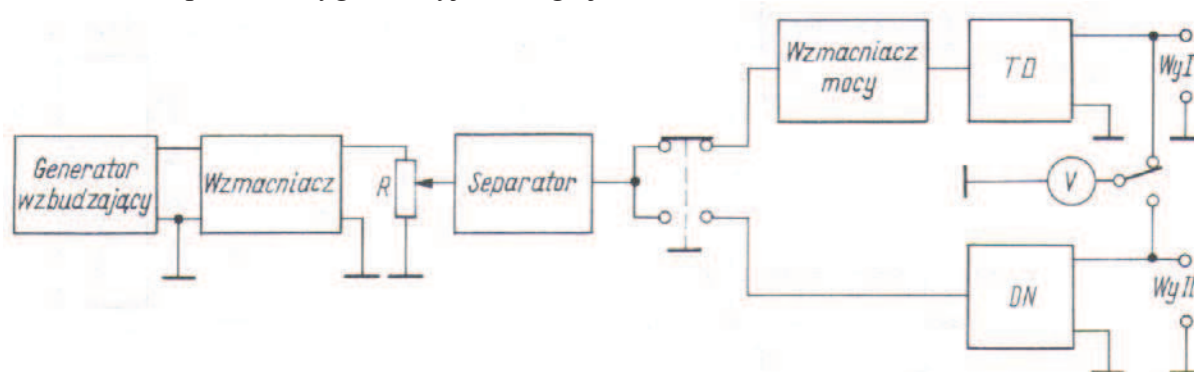
Pierwszy warunek nosi nazwę warunku amplitudy. Zgodnie z nim generator może generować tylko wtedy, gdy wzmacniacz kompensuje działanie tłumiące obwodu sprzężenia

zwrotnego. Drugi warunek - tzw. warunek fazy - wskazuje, że drgania mogą wystąpić tylko wtedy, gdy napięcie wyjściowe jest w fazie z napięciem wejściowym.

W zależności od elementów zawartych w obwodzie sprzężenia zwrotnego rozróżnia się generatory LC i RC.

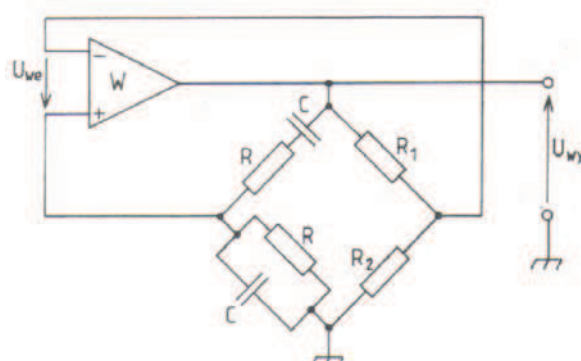
Generatory pomiarowe małej częstotliwości są wykonywane jako generatory RC i generatory dudnieniowe. Generatorów LC o takim zakresie częstotliwości nie buduje się, gdyż dobroć obwodów LC przy małych częstotliwościach jest niewielka – mała jest więc ich selektywność. Ponadto, aby pokryć cały zakres częstotliwości, elementy L i C musiałyby mieć duże wymiary. W generatorach dudnieniowych stosuje się obwody LC, ale pracują one w zakresie wielkich częstotliwości.

Schemat funkcjonalny generatora pomiarowego RC przedstawiono na rysunku 19. Blok generatora wzbudzającego to najczęściej wzmacniacz z mostkiem Wiena w torze sprzężenia zwrotnego. Potencjometr R umożliwia płynną regulację poziomu napięcia wyjściowego. Generator ma dwa wyjścia. Do wyjścia pierwszego sygnał jest podawany poprzez wzmacniacz mocy i transformator dopasowujący TD. Jest to wyjście o małej impedancji i dużej mocy. Do drugiego z wyjść sygnał jest podawany poprzez dzielnik napięcia DN. Wyjście przez dzielnik jest wyjściem o dużej impedancji (najczęściej 600Ω) i małej mocy. Wskaźnikiem poziomu sygnału wyjściowego jest woltomierz.



Rys. 19. Schemat funkcjonalny generatora RC [2, s.99]

Schemat generatora wzbudzającego z mostkiem Wiena przedstawiono na rys.20. W generatorze tym jako układ sprzężenia zwrotnego zastosowano układ mostkowy. Przez odpowiedni dobór własności elementów mostka uzyskuje się spełnienie warunków generacji ($\beta K=1$ i $\varphi_1 + \varphi_2 = 2n\pi$).



Rys. 20. Schemat generatora wzbudzającego z mostkiem Wiena [2, s.99]

Dla podanego na rys. 20 generatora z mostkiem Wiena stan równowagi występuje przy pulsacji

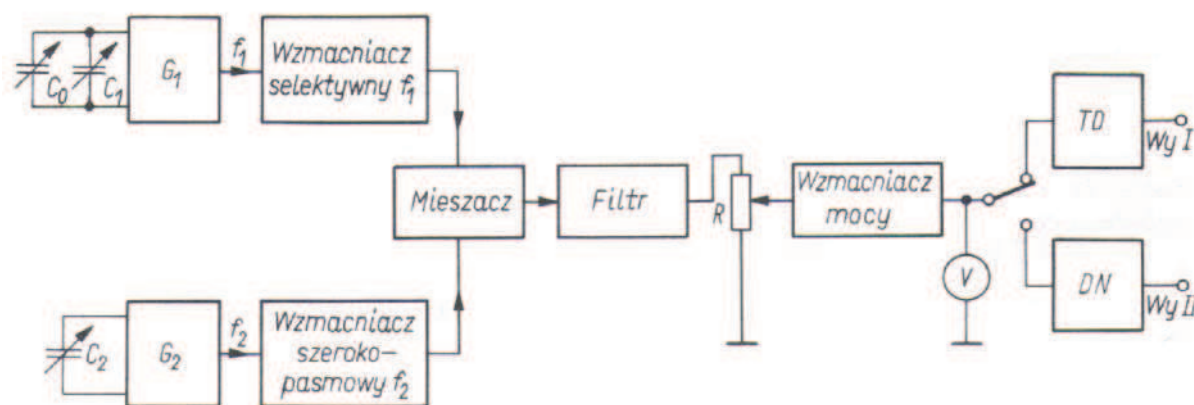
$$\omega_0 = \frac{1}{RC}.$$

Warunek amplitudy dla tego generatora z mostkiem symetrycznym Wiena wyraża się zależnością

$$\frac{R_1}{R_2} = 2.$$

Generatory pomiarowe RC są budowane na zakres częstotliwości 20 Hz ÷ 200 kHz. Częstotliwość sygnału wyjściowego jest regulowana w sposób ciągły lub skokowy (w generatorach dekadowych). Napięcie wyjściowe z generatorów pomiarowych RC odznacza się małym współczynnikiem zniekształceń nieliniowych (poniżej 0,1%) oraz dużą stabilnością częstotliwości ($1,5 \cdot 10^{-4} \div 2,5 \cdot 10^{-3}$).

Generatory pomiarowe małej częstotliwości mogą być również wykonywane jako generatory dudnieniowe. W generatorach tych sygnały małej częstotliwości uzyskuje się przez zmieszanie dwóch sygnałów wielkiej częstotliwości – tak dobranych, aby ich różnica była w zakresie małych częstotliwości. Jeżeli charakterystyka mieszacza jest nieliniowa, a na jego wejście podano dwa sygnały o częstotliwościach f_1 i f_2 , to na wyjściu pojawi się, między innymi, składowa sygnału o częstotliwości różnicowej $f = f_1 - f_2$. Eliminując za pomocą filtru wszystkie częstotliwości, oprócz różnicowej, można na wyjściu otrzymać sygnał o małej częstotliwości.



Rys. 21. Schemat blokowy generatora dudnieniowego [2, s. 100]

Schemat strukturalny takiego generatora przedstawiono na rysunku 21. Generatory G_1 i G_2 pracują najczęściej w układach w obwodami LC. Generator G_1 pracuje przy ustalonej częstotliwości f_1 . Trymery C_0 i C_1 służą do odstrajania częstotliwości w niewielkich granicach (± 100 Hz) i zerowania generatora. Drugi z generatorów jest przestrajany za pomocą kondensatora C_2 w granicach od $f_2 = f_1 - f_m$ (gdzie f_m – zakres generowanej małej częstotliwości) do $f_2 = f_1$. Sygnały wielkiej częstotliwości po wzmacnieniu – pierwszy o częstotliwości f_1 za pomocą wzmacniacza selektywnego, drugi o częstotliwości f_2 za pomocą wzmacniacza szerokopasmowego – są podawane na wejście mieszacza.

W produkowanych obecnie generatorach dudnieniowych mieszaczami są układy zrównoważonych modulatorów pierścieniowych. Cechą charakterystyczną takich mieszaczy jest obecność w sygnale wyjściowym jedynie sygnałów o częstotliwości różnicowej ($f_1 - f_2$) i sumarycznej ($f_1 + f_2$), pod warunkiem, że obydwie krzywe napięć w. cz. są idealnymi sinusoidami. Wówczas sygnał różnicowy łatwo wyodrębnić się za pomocą filtru dolnoprzepustowego.

Sygnał małej częstotliwości jest następnie wzmacniany przez wzmacniacz mocy i podawany na wyjście przez transformator dopasowujący TD lub przez dzielnik napięcia DN (tłumik).

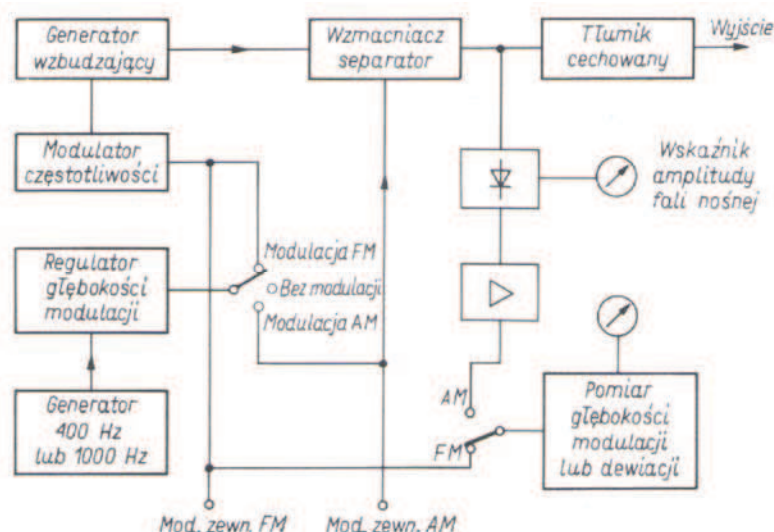
Stabilność częstotliwości sygnału wyjściowego zależy od stabilności generatorów G_1 i G_2 , bowiem bezwzględne zmiany częstotliwości tych generatorów przenoszą się bezpośrednio na częstotliwość różnicową. Niewielkie procentowe zmiany f_1 i f_2 mogą więc powodować znaczne procentowe zmiany częstotliwości różnicowej. Obydwa generatory w. cz. mają jednakowe układy i są identycznie zmontowane. Wpływ zmian napięć zasilających jest więc skompensowany. Nie są natomiast skompensowane wpływy temperatury, gdyż różne są obwody rezonansowe obydwu generatorów. Ponadto wpływ ten zmienia się w funkcji zmian częstotliwości, gdyż zmienne jest położenie ruchomej elektrody kondensatora C_2 . Szczególnie duży wpływ temperatury występuje w dolnym zakresie częstotliwości i dlatego konieczna jest regulacja zera częstotliwości różnicowej za pomocą trymera C_0 .

Generatory dudnieniowe są najczęściej budowane na zakresy $20 \text{ Hz} \div 20 \text{ kHz}$, a niekiedy $50 \text{ Hz} \div 5 \text{ MHz}$. Charakteryzują się one stabilnością częstotliwości od $1 \cdot 10^{-4}$ do $1,5 \cdot 10^{-3}$ i błędem nastawiania częstotliwości 1% do 2%. Zaletą tych generatorów jest ciągła regulacja częstotliwości w całym zakresie.

Generatory wielkiej częstotliwości

Generatory tej grupy są wykonywane na zakresy częstotliwości od 100 Hz do 150 MHz, a niekiedy do 400 MHz. Uproszczony schemat blokowy generatora wielkiej częstotliwości przedstawiono na rysunku 22.

Generator wzbudzący, realizowany najczęściej w układzie generatora z obwodem rezonansowym LC w pętli sprzężenia zwrotnego (generatory Colpitsa, Hartleya lub Clappa), ma zwykle elektroniczną lub piezoelektryczną stabilizację częstotliwości. zakres częstotliwości jest dzielony na kilka podzakresów realizowanych za pomocą przełączanych cewek indukcyjnych. Płynną regulację częstotliwości uzyskuje się w każdym podzakresie przez zmianę pojemności kondensatorów.



Rys. 22. Schemat blokowy generatora wielkiej częstotliwości [2, s. 101]

Rezonansowy wzmacniacz separator może pełnić różne funkcje. Separuje on generator od wpływu obciążenia, co przyczynia się do poprawy stabilności częstotliwości drgań, zwiększa poziom sygnału wyjściowego, pełni rolę modulatora amplitudy, a w niektórych generatorach podwajacza częstotliwości.

Modulatory stosowane w generatorach sygnałowych są budowane w różnych układach. Modulację częstotliwości, jeśli jest przewidziana w generatorze, realizuje się w układzie generatora wzbudzającego. Używa się do tego celu diody pojemnościowej, która w takt zmian napięcia polaryzującego zmienia swoją pojemność, a tym samym częstotliwość sygnału wyjściowego.

Zwykle w generatorze przewidziana jest zarówno możliwość modulacji wewnętrznej, jak i modulacji napięciem zewnętrznym. Źródłem wewnętrznego napięcia modulującego jest generator LC małej częstotliwości, który wytwarza drgania o jednej lub dwu częstotliwościach.

Poziom sygnału wyjściowego reguluje się za pomocą tłumika (dzielnik napięcia), a kontroluje się za pomocą woltomierza lub miernika mocy.

Jakość modulacji jest kontrolowana przez miernik głębokości modulacji lub miernik dewiacji częstotliwości.

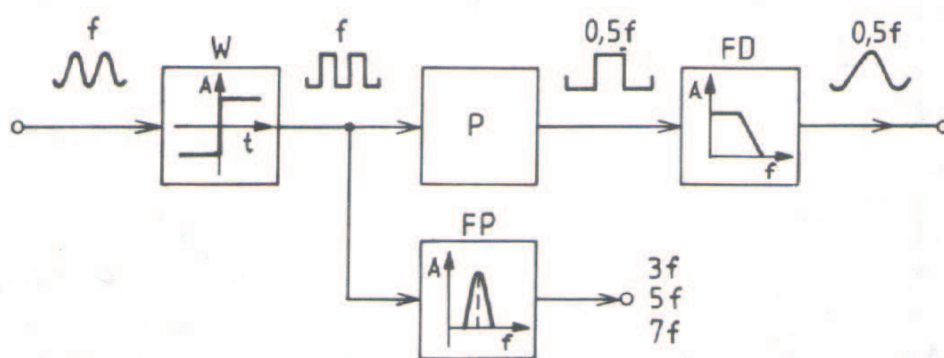
Błąd nastawiania częstotliwości sygnału wyjściowego w generatorach wielkiej częstotliwości jest z reguły mniejszy niż 1%. Poziom sygnału wyjściowego jest zawarty w granicach od jednego do kilku woltów.

Bardzo małą niepewność, tj. $10^{-8} \div 10^{-10}$, nastawienia częstotliwości sygnału wyjściowego generatora pomiarowego można osiągnąć dzięki syntezie częstotliwości pomiarowego w syntezerach.

Najważniejszym podzespołem syntezer jest wysokostabilny generator kwarcowy o niestabilności częstotliwości ok. 10^{-10} . Jego częstotliwość poddaje się zwielokrotnieniu w powielaczach oraz podzieleniu w dzielnikach częstotliwości. Z wielokrotności i podwielokrotności częstotliwości generatora kwarcowego, poprzez odpowiednie ich sumowanie, otrzymuje się żadaną częstotliwość. Najczęściej stosowanymi powielaczami są:

- generatory harmoniczných z diodami pasywnymi,
- tranzystorowe generatory harmoniczných.

Uproszczony układ generatora harmoniczných nieparzystych o częstotliwości $(2n - 1)f$, gdzie $n=2, 3, \dots$, oraz dzielnika częstotliwości f sygnału wejściowego przedstawiono na rysunku 23. Przekształcenie realizuje się za pomocą wzmacniacza W o bardzo dużym wzmocnieniu, którego punkty pracy znajdują się na obszarze odcięcia lub nasycenia. Harmoniczne, np. $3f, 5f, 7f$ otrzymuje się za pomocą filtra pasmowego FP. Elementem dzielącym częstotliwość f przez dwa jest przerzutnik P. Elementem



Rys. 23. Schemat strukturalny układu wytwarzania harmoniczných nieparzystych oraz dzielnika częstotliwości [5, s. 35]

Przebieg sinusoidalny o częstotliwości $0,5f$ otrzymuje się na wyjściu filtra dolnoprzepustowego FD.

Sumowanie częstotliwości realizuje się w układzie mnożącym zbudowanym z elementów nieliniowych. Jeżeli napięcia wejściowe wynoszą $u_1(t) = U_1 \cos \omega_1 t$

oraz

$u_2(t) = U_2 \cos \omega_2 t$, gdzie $\omega_k = 2\pi f_k$, to napięcie wyjściowe elementu mnożącego wynosi:

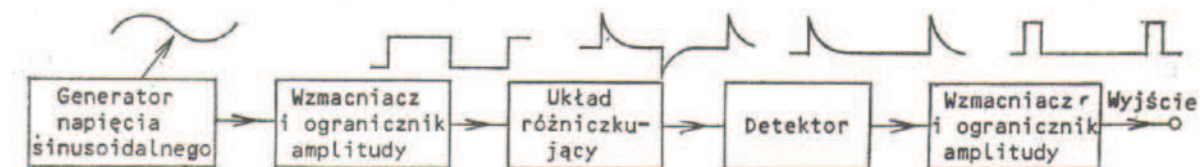
$$u(t) = u_1(t)u_2(t) = \frac{U_1 U_2}{2} [\cos(\omega_1 + \omega_2)t + \cos(\omega_1 - \omega_2)t].$$

Po odfiltrowaniu otrzymuje się jeden sygnał o częstotliwości $(f_1 + f_2)$ oraz drugi o częstotliwości $(f_1 - f_2)$. Te sygnały stosuje się do dalszego sumowania częstotliwości. W ten sposób otrzymuje się wyjściowe napięcie $u(t)$ o pulsacji ω , która jest sumą kilku składowych pulsacji tzn. $\omega = \omega_1 + \omega_2 + \dots$

Obecnie wytwarzane syntezery umożliwiają generację napięć sinusoidalnych od 1 μHz do wielu GHz z niepewnością nastawienia częstotliwości równą niepewności wzorcowego generatora kwarcowego, czyli ok. 10^{-10} . Dodatkowo – napięcie sinusoidalne może być przekształcone na prostokątne lub piłokształtne za pomocą konwerterów funkcji. Konwertery funkcji są to układy przekształcające przebiegi o różnym kształcie, w szczególności o kształcie trójkątnym, na przebiegi o innym kształcie.

Generatory impulsowe

Pomiarowe generatory impulsowe są źródłami sygnałów impulsowych o różnym kształcie. Najczęściej są stosowane generatory impulsów prostokątnych i szpilkowych. Generator impulsów prostokątnych wytwarza impulsy o regulowanej w szerokich granicach częstotliwości i czasie trwania impulsów. Budowane są generatory impulsów podwójnych o regulowanym opóźnieniu oraz generatory kodowych grup impulsów.

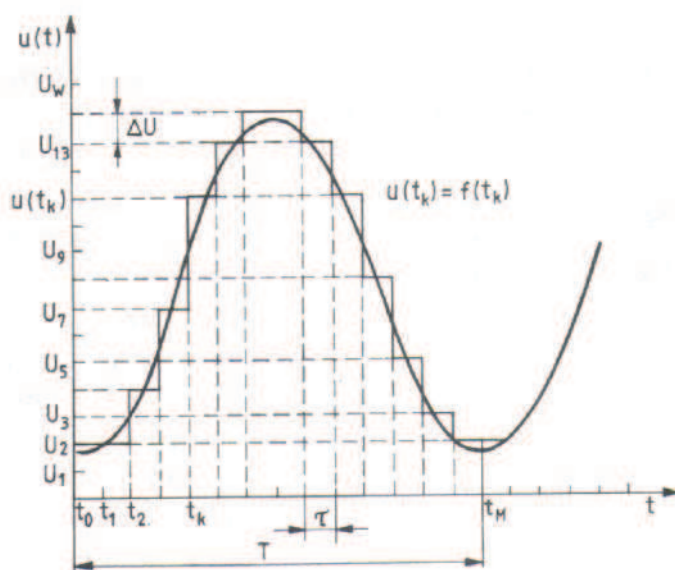


Rys. 24. Schemat blokowy generatora impulsów prostokątnych [4, s. 145]

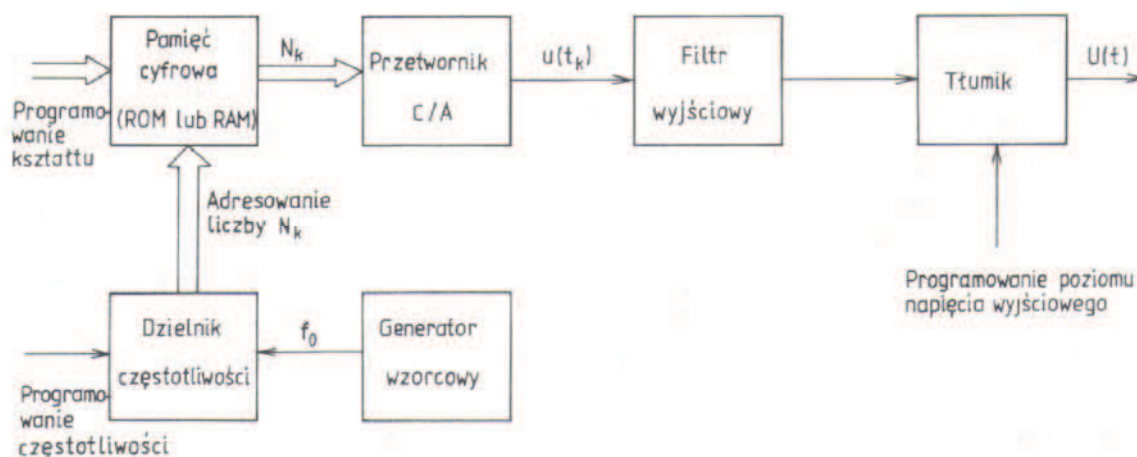
Istnieje wiele sposobów wytwarzania impulsów prostokątnych. Często kształtuje się te impulsy przez obcinanie, wzmacnianie i różniczkowanie napięcia sinusoidalnego (Rys. 24). W ten sposób można otrzymać impulsy prostokątne o czasie trwania znacznie krótszym od okresu ich powtarzania. Często takie impulsy prostokątne, wytwarza się przy zastosowaniu niesymetrycznego multiwibratora astabilnego. W generatorze takim regulację czasu trwania impulsów i okresu ich powtarzania uzyskuje się zwykle przez zmianę rezystancji lub pojemności w układzie multiwibratora.

Generatory cyfrowe

Wśród generatorów pomiarowych szczególne miejsce zajmują generatory budowane z zastosowaniem cyfrowych układów elektronicznych. Umożliwiają one uzyskanie przebiegów o dowolnym kształcie (nawet przebiegu o kształcie opisanym równaniem analitycznym – w przypadku cyfrowych generatorów programowalnych). **Generacja określonego przebiegu w generatorach programowalnych** polega na aproksymacji jego kształtu przebiegiem schodkowym, tak jak to wyjaśniono na rysunku 25. Przebiegi schodkowe uzyskuje się przy wykorzystaniu przetworników cyfrowo-analogowych. Ogólna zasadę działania programowalnego generatora funkcyjnego wyjaśniono na schemacie strukturalnym przedstawionym na rysunku 26.



Rys. 25. Aproksymacja przebiegu sinusoidalnego ze składową stałą przebiegiem schodkowym, zrealizowanym za pomocą 4-bitowego przetwornika A/C [5, s. 38]



Rys. 26. Schemat strukturalny cyfrowego generatora funkcyjnego [5, s.38]

Pożądany kształt przebiegu jest zakodowany w pamięci cyfrowej w postaci ciągu liczb N_k , określających wartości $u(t_k)$ napięcia wyjściowego w kolejnych chwilach t_k ($k=1,2,\dots,M$) oddległych od siebie o τ (patrz rysunek 25). Przedział czasu τ jest określony jako stosunek okresu T generowanego przebiegu do pojemności pamięci K , czyli

$$\tau = \frac{T}{K}$$

Częstotliwość $f=1/T$ przebiegu wyjściowego programuje się przez takie nastawienie dzielnika częstotliwości dzielnika częstotliwości wzorcowej f_0 , aby impulsy odczytu kolejnych komórek pamięci pojawiały się z częstotliwością Kf . Odczytywane z tą częstotliwością liczby N_i sterują przetwornikiem cyfrowo-analogowym (C/A), ja wyjściu którego pojawia się przebieg schodkowy aproksymujący przebieg o żądanym kształcie. Filtr wygładza ten przebieg, a tłumik umożliwia dobranie wartości amplitudy.

Generatory programowane mogą generować przebiegi o dowolnych kształtach. Jeżeli stosowana w układzie pamięć pozwala na wpis w dowolnej chwili (pamięć typu RAM), to jest możliwe uzyskiwanie przebiegów na podstawie równań analitycznych wprowadzonych do układu programowania kształtu. Układ ten jest wówczas specjalizowanym

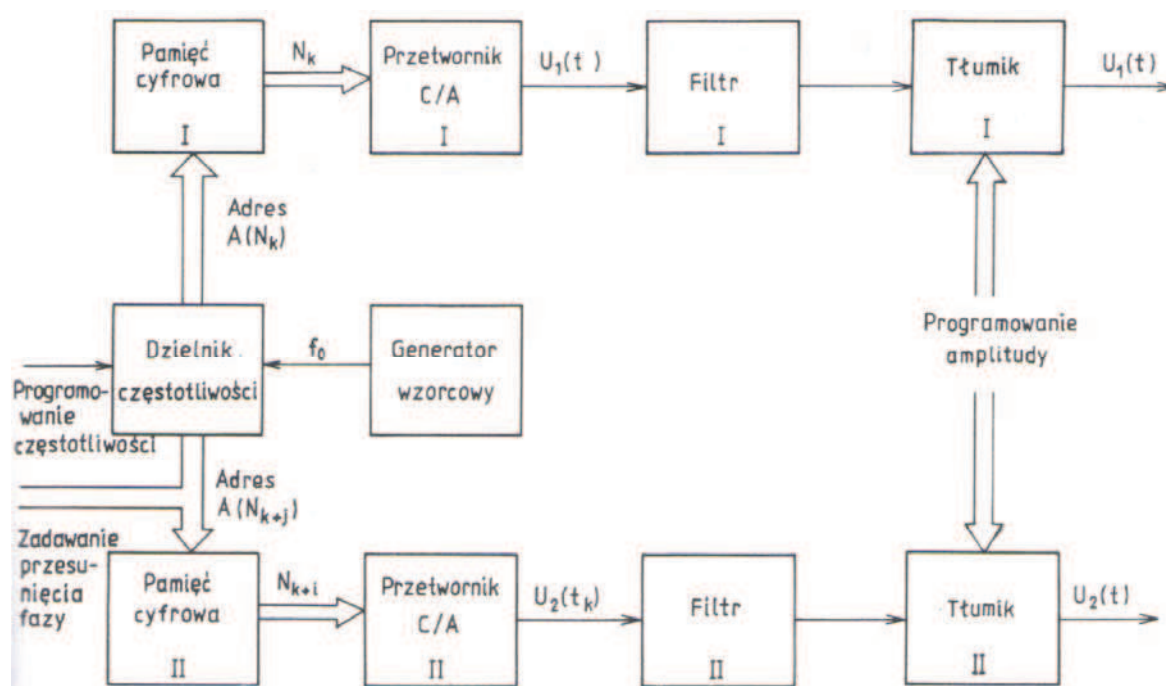
mikrokomputerem pozwalającym na wprowadzenie równania, przetwarzającym to równanie na ciąg liczb N_k i wprowadzającym ten ciąg do pamięci.

Cyfrowe generatory programowane umożliwiają także uzyskania dwóch przebiegów. Częstotliwość $f = 1/T$ przebiegu wyjściowego programuje się przez takie nastawienie dzielnika częstotliwości dzielnika częstotliwości wzorcowej f_0 , aby impulsy odczytu kolejnych komórek pamięci pojawiały się z częstotliwością Kf . Odczytywane z tą częstotliwością liczby N_i sterują przetwornikiem cyfrowo-analogowym (C/A), na wyjściu którego pojawia się przebieg schodkowy aproksymujący przebieg o żądanym kształcie. Filtrowy wygładza ten przebieg, a tłumik umożliwia dobranie wartości amplitudy.

Generatory programowane

Generatory programowane mogą generować przebiegi o dowolnych kształtach. Jeżeli stosowana w układzie pamięć pozwala na wpis w dowolnej chwili (pamięć typu RAM), to jest możliwe uzyskiwanie przebiegów na podstawie równań analitycznych wprowadzonych do układu programowania kształtu. Układ ten jest wówczas specjalizowanym mikrokomputerem pozwalającym na wprowadzenie równania, przetwarzającym to równanie na ciąg liczb N_k i wprowadzającym ten ciąg do pamięci.

Cyfrowe generatory programowane umożliwiają także uzyskania dwóch przebiegów o nastawianych z dużą dokładnością wartościach ich amplitud oraz wzajemnego przesunięcia fazowego (stosując generatory analogowe jest to bardzo trudno zrealizować w szerokim przedziale częstotliwości). Generację dwóch przebiegów o ściśle określonym przesunięciu fazowym można uzyskać w układzie pokazanym na rysunku 27, zawierającym dwa identyczne tory formowania przebiegu wyjściowego.



Rys. 27. Cyfrowy generator dwóch przebiegów przesuniętych w fazie [5, s. 39]

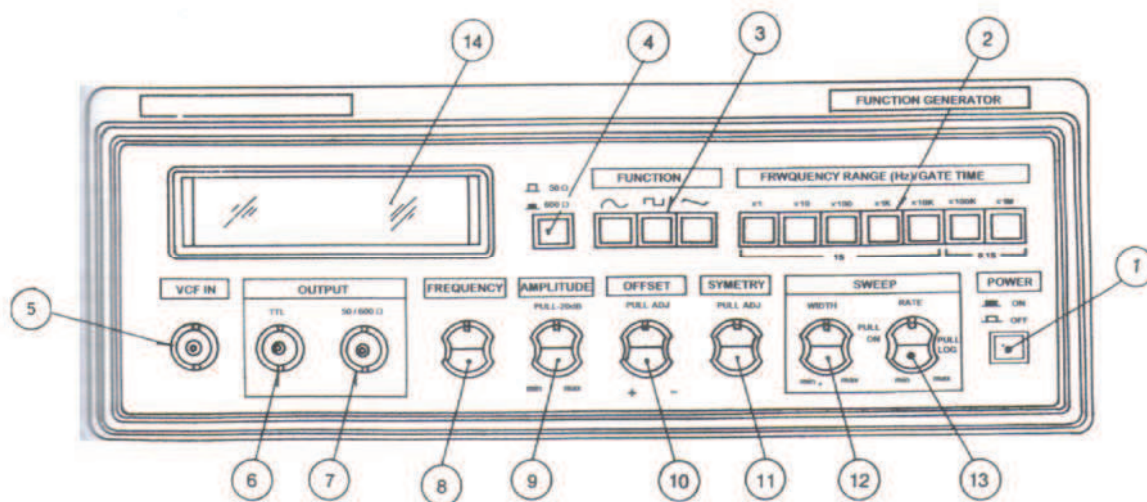
Impulsy odczytujące o tej samej częstotliwości są podawane na wejścia obu układów pamięci, lecz w taki sposób, że w jednym z nich odczytuje się liczbę N_k , a w drugim N_{k+m} . Liczba m wyznacza przesunięcie fazowe φ wg zależności

$$\varphi = \frac{360^\circ}{K} m.$$

Precyzja odwzorowania kształtu w generatorach cyfrowych jest związana z rozdzielczością przetwornika C/A oraz stabilnością częstotliwości wzorcowej. Zakres generowanych częstotliwości wynika z szybkości działania przetwornika C/A. Maksymalne częstotliwości nie przekraczają kilkudziesięciu MHz.

Obsługa generatora funkcyjnego

Produkowane obecnie generatory funkcyjne są przyrządami uniwersalnymi, wytwarzającymi sygnały: sinusoidalne, trójkątne oraz prostokątne. Charakteryzują się także możliwością regulacji parametrów tych przebiegów.



Rys. 28. Płyta czołowa generatora funkcyjnego. [3, s. 39]

Na rysunku 28 przedstawiono płytę czołową typowego generatora funkcyjnego. Sposób ustawienia przebiegów, wytwarzanych przez generator, omówiono jednocześnie z przedstawieniem funkcji poszczególnych przełączników i pokręteł.

- **Rodzaj przebiegu** Za pomocą przełącznika wyboru funkcji (FUNCTION) – 3 wybiera się kształt generowanego przebiegu
- **Zakres częstotliwości** (FREQUENCY RANGE) określa przedział częstotliwości, w którym będzie się zawierała częstotliwość wytwarzanego przebiegu. Regulacji częstotliwości dokonuje się wstępnie poprzez wybór zakresu za pomocą przycisku (FREQUENCY RANGE) – 2, a następnie dokładnie przy użyciu pokrętła płynnej regulacji (FREQUENCY) – 8. Jeżeli zostanie wybrany np. zakres x1k, to częstotliwość będzie można płynnie regulować w przedziale 100 Hz ÷ 10kHz

Produkowane obecnie generatory są na ogół wyposażone w wewnętrzny częstotlicznik cyfrowy (**wskaźnik częstotlicznika** – DISPLAY – 14), podający z dużą dokładnością wartość częstotliwości wytwarzanego przebiegu.

- **Amplituda napięcia** (AMPLITUDE). Wartość amplitudy wytwarzanego przebiegu ustala się za pomocą pokrętła płynnej regulacji - 9. Generator ma możliwość skokowej zmiany zakresu regulacji, w celu umożliwienia precyzyjnego ustalenia amplitudy. Dokonuje się tego poprzez wyciągnięcie pokrętła płynnej regulacji (PULL OFF). Wówczas zakres napięcia wyjściowego zmniejsza się do poziomu np. -20 dB (zmniejszenie dziesięciokrotne) i amplitudę można regulować płynnie w zakresie

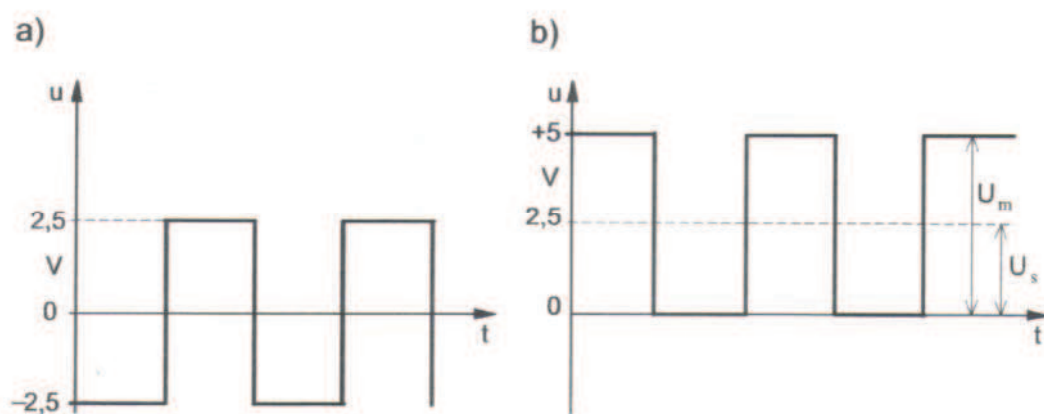
30mV÷1V. W pozycji wciśniętej (PULL ON), czyli 0 dB, można zmieniać amplitudę w zakresie 300 mV ÷ 10V. W starszych typach przyrządów zakres amplitudy sygnału wyjściowego jest zmieniany za pomocą odrębnego przełącznika (niezależnego od pokrętki płynnej regulacji), mającego zazwyczaj zakresy 0dB, -20dB, -40dB. Na zakresie 0dB napięcie generowane jest przyłączone bezpośrednio do gniazda wyjściowego, a na zakresach -20dB i -40dB – przez dzielniki odpowiednio 1:10 i 1:100.

- **Impedancja wyjściowa** (przełącznik **50Ω/600Ω**). Przełącznikiem tym dokonuje się wyboru impedancji wyjścia. Prezentowany generator ma dwa wyjścia (OUTPUT): 50Ω/600Ω - 7 oraz TTL – 6. Standardowa wartość impedancji wyjścia 50Ω/600Ω generatora wynosi 50Ω lub 600Ω, a wybory żądanej wartości dokonuje się za pomocą przełącznika 4.

Jeżeli sygnał wytwarzany przez generator jest przekazywany do obwodu za pomocą przewodu koncentrycznego o impedancji falowej 50 Ω, to impedancja wyjściowa generatora również powinna wynosić 50 Ω, aby osiągnąć dopasowanie falowe. W przypadku przesyłania sygnałów o małej częstotliwości, np. akustycznej, kiedy nie występują zjawiska falowe, rezystancja generatora powinna być jak najmniejsza w stosunku do rezystancji wejściowej odbiornika (np. wzmacniacza małej częstotliwości).

Wyjście oznaczone symbolem TTL wytwarza przebieg prostokątny o parametrach odpowiednich dla układów TTL.

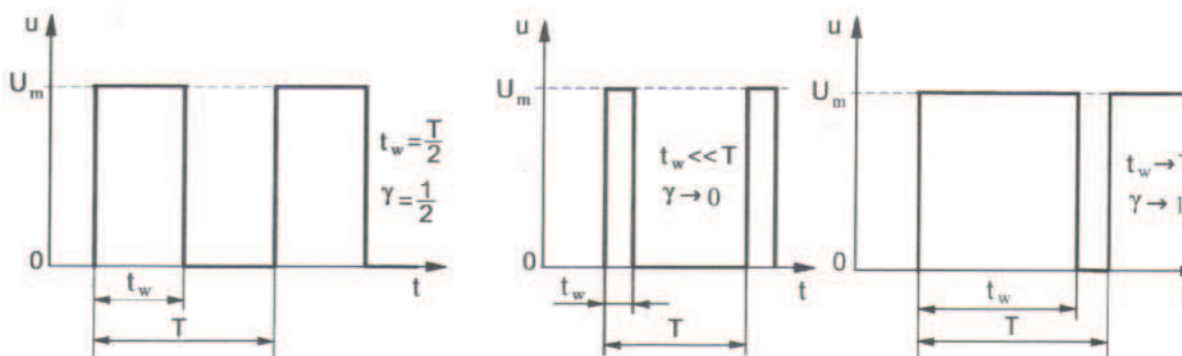
- **Składowa stała poziom** (OFFSET). Generowany przebieg może być przemienny, tzn. pozbawiony składowej stałej, albo może mieć składową stałą o wartości dodatniej lub ujemnej, regulowanej za pomocą pokrętki 10. W celu włączenia regulacji poziomu należy wyciągnąć pokrętkę lub włączyć niezależny włącznik. Przykłady przebiegu prostokątnego przemiennego i „podwyższonego” o składową stałą (typowego dla układów TTL) przedstawiono na rysunku 29. Jeżeli generator nie ma wyjścia TTL, to funkcja regulacji poziomu umożliwia zastosowanie tych przyrządów do badania układów cyfrowych. Wartość napięcia stałego dodawanego do przebiegu wyjściowego może się zmieniać w zakresie kilku woltów, np. ±10 V. Do badań układów cyfrowych są stosowane generatory, które mają możliwość regulacji i składowej stałej.



Rys. 29. Regulacja poziomu (offset) generatora: a) regulacja poziomu wyłączona - sygnał przemienny o amplitudzie 2,5 V; b) wartość składowej stałej 2,5 V - sygnał typowy dla układów TTL [3, s. 40]

- **Symetryzacja** (SYMMETRY). Generator wytwarza przebiegi symetryczne, tzn. sinusoidalne, trójkątne lub prostokątne o współczynniku wypełnienia równym 1/2. Zmianę proporcji sygnału w ramach jednego okresu (Rys. 30) można uzyskać poprzez wyciągnięcie pokrętki 11 (lub włączenie przycisku) symetryzacji. Umożliwi to zmianę kształtu wytwarzanych przebiegów: trójkątnego na piłokształtny, fali prostokątnej na

ciągi impulsów o regulowanym czasie trwania itp. Zmiana proporcji sygnału, np. czasu trwania do okresu sygnału prostokątnego, nazywana **współczynnikiem wypełnienia** γ , odbywa się zwykle w stosunku od 1:10 do 10:1.



Rys. 30. Symetryzacja generatora [3, s. 40]

- **Wewnętrzne (automatyczne) przestrajanie częstotliwości (INTERNAL SWEEP).** Dzięki tej funkcji jest możliwe samoczynne przestrajanie częstotliwości wytwarzanego sygnału w wybranym zakresie i z wybraną szybkością. Włączenie przestrajania (SWEEP WIDTH – 12) umożliwia określenie przedziału wartości należącego do danego zakresu (FREQUENCY RANGE), w ramach którego będzie zmieniana liniowo (proporcjonalnie) częstotliwość. Przekręcenie pokrętki (SWEEP WIDTH) w pozycję „max” powoduje, że generator będzie zmieniał częstotliwość od najmniejszej do największej w danym zakresie. Za pomocą pokrętki szybkości przestrajania (SWEEP RATE – 13) określa się, jak długo ma trwać cykl zmiany częstotliwości w przyjętych granicach. Wartość czasu przestrajania można regulować w zakresie np. 10 ms ÷ 1 s. Oznacza to, że w położeniu "max" pokrętek (SWEEP RATE) oraz (SWEEP WIDTH), w ciągu jednej sekundy częstotliwość wzrośnie ze 100 Hz do 10 kHz (przy wybranym zakresie częstotliwości x1k).
- W generatorach, które nie mają funkcji wewnętrznego przestrajania, jest realizowane **zewnętrzne przestrajanie częstotliwości (EXTERNAL SWEEP).** Przyrządy przestrajane zewnętrznym napięciem mają wejście przestrajania napięciem (VCO IN). Doprowadzenie napięcia stałego do tego wejścia umożliwia zmianę częstotliwości wytwarzanego sygnału w wybranym zakresie. Podanie przebiegu piłokształtnego spowoduje automatyczne przestrajanie częstotliwości. Zakres przestrajania, będący częścią wybranego zakresu częstotliwości, zależy od amplitudy przebiegu liniowego (lub wartości napięcia stałego) doprowadzonego do wejścia VCO. Wartość napięcia stałego doprowadzonego do wejścia VCO zmienia się w zakresie kilku woltów. Funkcja przestrajania częstotliwości (wewnętrzna lub zewnętrzna) jest bardzo przydatna np. przy
- badaniu układów selektywnych.

Prawidłowa eksploatacja generatora

Produkowane obecnie generatory funkcyjne są wyposażone w układy zabezpieczeń przed zwarcie zacisków wyjściowych. Jednak starsze typy przyrządów nie mają takich zabezpieczeń i zwarcie wyjścia do masy może spowodować uszkodzenie wyjściowego wzmacniacza mocy. W celu zagwarantowania prawidłowej eksploatacji tych generatorów należy zatem:

1. Sprawdzić przewód koncentryczny, który zostanie połączony z wyjściowym gniazdem BNC generatora. Podłączenie do przewodu końcówek BNC czy tzw. wtyków „bananowych” powinno być wykonane bardzo starannie, aby wyeliminować

ewentualne zwarcia wewnątrz przewodu. Używanie przewodu, który jest niestarannie wykonany, może uszkodzić generator.

2. Jeżeli drugi koniec przewodu koncentrycznego, podłączonego do generatora, jest rozdwojony i zakończony wtykami, to **należy wyraźnie zaznaczyć, która końcówka stanowi potencjał równy zeru (masa), a która doprowadza sygnał (zacisk „gorący”)**. Utrudni to przypadkowe pomyłki. Najlepiej zastosować różne kolory przewodów lub wtyków dla masy (np. niebieski) i dla przewodu sygnałowego (np. czerwony).
3. W celu obserwowania na ekranie oscyloskopu sygnału podawanego z generatora, należy przyłączyć równolegle do wejścia badanego układu przewody generatora i oscyloskopu. Jeżeli przewody te są zakończone wtykami bananowymi, to koniecznie trzeba zwrócić uwagę, czy właściwie jest przyłączone wejście kanału oscyloskopu. **Przyłączenie do wejścia badanego układu masy przewodu oscyloskopu powoduje zwarcie wyjścia generatora poprzez przewód masy oscyloskopu.**

4.2.2. Pytania sprawdzające

Odpowiadając na pytania, sprawdzisz, czy jesteś przygotowany do wykonania ćwiczeń.

1. Czy potrafisz sklasyfikować generatory ze względu na częstotliwość?
2. Czy potrafisz sklasyfikować generatory ze względu na moc sygnału wyjściowego?
3. Czy potrafisz sklasyfikować generatory ze względu na kształt generowanych napięć?
4. Jakie wymagania stawiamy generatorom?
5. W jakim zakresie częstotliwości budowane są generatory RC, RL, kwarcowe?
6. Jakie parametry określają jakość generowanych sygnałów?
7. Na jakiej zasadzie działają syntezy?
8. Czy potrafisz wymienić właściwości cyfrowych generatorów programowanych?
9. Czy potrafisz narysować i omówić schemat blokowy generatora impulsów prostokątnych?

4.2.3 Ćwiczenia

Ćwiczenie 1

Określ $f_{\min}$ i $f_{\max}$ dla wszystkich kształtów generowanego napięcia.

Sposób wykonania ćwiczenia

Aby wykonać ćwiczenie powinieneś:

- 1) zapoznać się z dokumentacją badanego generatora funkcyjnego,
- 2) narysować schemat połączeń,
- 3) skonsultować się z nauczycielem,
- 4) połączyć układ pomiarowy,
- 5) poprosić nauczyciela o sprawdzenie prawidłowości połączeń,
- 6) uruchomić układ,
- 7) odczytać częstotliwość,
- 8) wyszukać elementami nastawczymi częstotliwość minimalną,
- 9) odczytać jej wartość,
- 10) ustalić przedział nieufności (błąd aparatu),
- 11) wykonać podobnie ćwiczenie dla przebiegu prostokątnego i piłokształtnego,
- 12) sformułować wnioski na podstawie uzyskanych wyników pomiarów.

Wyposażenie stanowiska pracy:

- generator funkcyjny,
- częstotściomierz,
- oscyloskop elektroniczny,
- instrukcje obsługi przyrządów pomiarowych i badanego generatora funkcyjnego.

Ćwiczenie 2

Zbadać kształt przebiegu prostokątnego wytwarzanego przez generator funkcyjny.

Sposób wykonania ćwiczenia

Aby wykonać ćwiczenie powinienś:

- 1) zapoznać się z dokumentacją badanego generatora funkcyjnego,
- 2) zmontować układ pomiarowy włączając do zacisków wyjściowych generatora oscyloskop elektroniczny,
- 3) określić parametry impulsu prostokątnego (amplitudę, czas trwania, czas narastania, czas opadania) na podstawie otrzymanego przebiegu,
- 4) zmierzyć częstotliwość badanego przebiegu,
- 5) wyznaczyć wypełnienie sygnału prostokątnego,
- 6) sformułować wnioski na podstawie uzyskanych wyników pomiarów.

Wyposażenie stanowiska pracy:

- generator funkcyjny,
- oscyloskop elektroniczny,
- instrukcje obsługi przyrządów pomiarowych i badanego generatora funkcyjnego.

4.2.4 Sprawdzian postępów

Czy potrafisz:

	Tak	Nie
1) scharakteryzować parametry generatorów?	☐	☐
2) rozpoznać na schematach ideowych bloki funkcyjne?	☐	☐
3) podać zasadę działania funkcjonalnego generatora RC?	☐	☐
4) narysować schemat blokowy generatora dudnieniowego?	☐	☐
5) narysować schemat blokowy generatora wielkiej częstotliwości?	☐	☐
6) narysować schemat strukturalny cyfrowego generatora funkcyjnego?	☐	☐
7) wyjaśnić zasadę działania generatorów programowalnych?	☐	☐
8) dobrać rodzaj generatora do określonych pomiarów?	☐	☐
9) rozpoznać gniazda oraz elementy regulacyjne na płycie czołowej generatorów?	☐	☐
10) zmierzyć parametry przebiegów elektrycznych wytwarzanych przez generatory?	☐	☐
11) obsługiwać generatory z wykorzystaniem instrukcji?	☐	☐

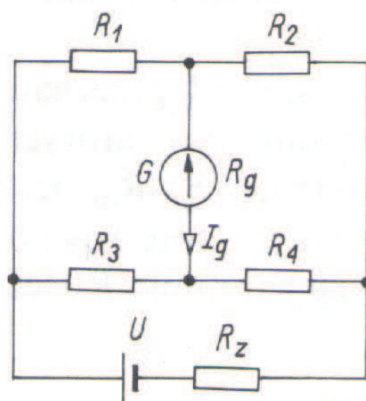
4.3. Mostki i mierniki RLC

4.3.1 Materiał nauczania

Mostki prądu stałego

Mostki rezystancyjne zasilane prądem stałym stanowią grupę narzędzi pomiarowych przeznaczonych do pomiaru rezystancji. Stosowane są dwie podstawowe odmiany – mostki czteroramienne i sześcioramienne.

Mostek czteroramienny o układzie przedstawionym na rys. 31, nazywany mostkiem Wheatstone'a lub mostkiem pojedynczym, umożliwia pomiar rezystancji przez porównanie z rezystancjami oporników dokładnie wywzorcowanych. Oporniki R_1 , R_2 , R_3 , R_4 stanowią ramiona mostka.



Rys. 31 Mostek Wheatstone'a [2, s. 327]

Zwykle opornik R_1 jest elementem o mierzonej rezystancji R_x , wtedy

$$R_x = R_2 \frac{R_3}{R_4}$$

Równoważenie mostka może odbywać się przez zmianę rezystancji R_2 przy stałym stosunku $\frac{R_3}{R_4}$ lub przez zmianę R_3 przy stałym stosunku $\frac{R_3}{R_4}$, albo też przez zmianę stosunku

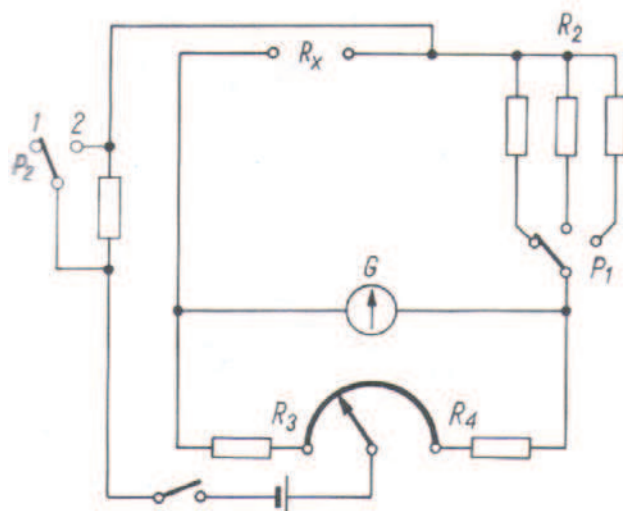
$\frac{R_3}{R_4}$ przy stałej wartości R_2 .

Techniczne mostki Wheatstone'a

Techniczne mostki Wheatstone'a są przeznaczone do szybkich pomiarów rezystancji w warunkach warsztatowych. Są łatwe w użyciu, małe, lekkie przenośne, zawierają wbudowany galwanometr, błąd pomiaru $\approx 1\%$.

Typowy układ technicznego mostka Wheatstone'a przedstawiono na rys 30. Przełączane oporniki R_2 służą do zmiany zakresu pomiaru. Równoważenie mostka, czyli sprowadzanie wskazania galwanometru do zera, odbywa się to przez obrót pokrętła potencjometru drutowego. Zmienia się w ten sposób stosunek rezystancji $\frac{R_3}{R_4}$, aż do osiągnięcia równowagi.

Wynik pomiaru odczytuje się z położenia obrotowej podziałki, połączonej z pokręteł potencjometru, z uwzględnieniem mnożnika zakresu.

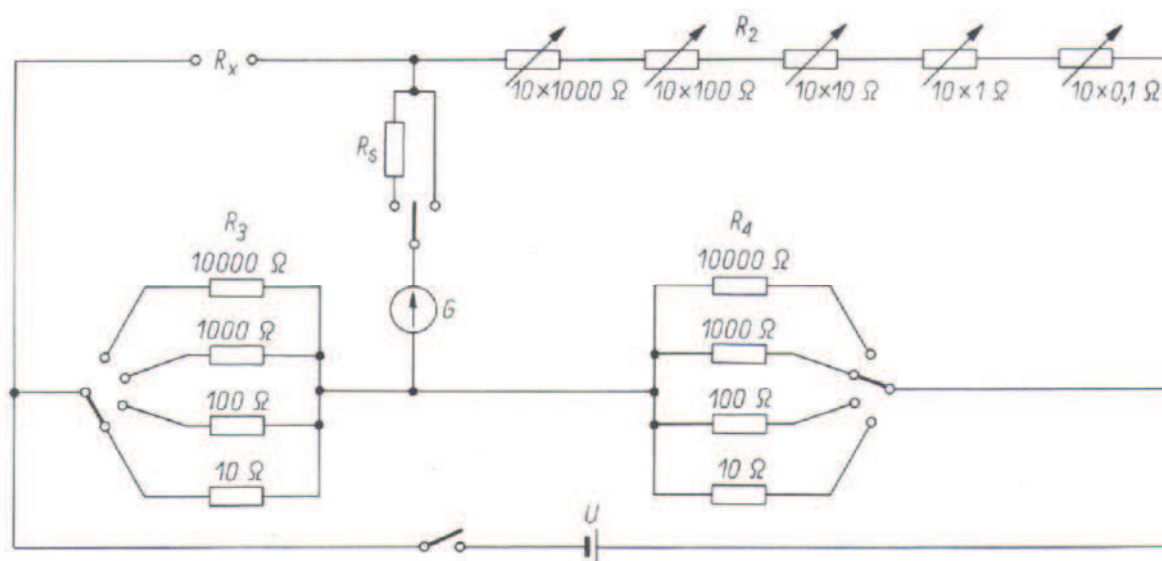


Rys. 32 Uproszczony układ technicznego mostka Wheatstone’a . [2, s. 329]
 P_1 –przełącznik zmiany zakresów, P_2 –przełącznik czułości mostka.

Przeciętny mostek techniczny wielozakresowy umożliwia pomiar rezystancji od około $1\ \Omega$ do około $100\ \text{k}\Omega$.

Laboratoryjne mostki Wheatstone’a są przeznaczone do dokładnych pomiarów rezystancji.

Układ laboratoryjnego mostka Wheatstone’a przedstawiono na rys. 33.



Rys. 33. Układ laboratoryjnego mostka Wheatstone’a. [2, s. 330]

Opornik R_3 i R_4 nazywane opornikami stosunkowymi umożliwiają w różnych kombinacjach nastawianie stosunku $\frac{R_3}{R_4}$ o wartościach od $0,001 \dots 1 \dots$ do 1000 . Pięciodekadowy lub sześciodekadowy zestaw oporników R_2 służy do równoważenia mostka przy wybranym stosunku $\frac{R_3}{R_4}$. Przy największej wartości $R_2 = 10\ 000\ \Omega$ można mostkiem zmierzyć $R_x = 10\ \text{M}\Omega$, a najmniejszą wartość R_x , jaką można zmierzyć z wykorzystaniem pięciu dekad, jest $1\ \Omega$.

Stosuje się napięcia o wartościach od ok. 2 V przy pomiarach $R_x \leq 100 \text{ k}\Omega$ do kilkudziesięciu woltów przy R_x rzędu megaomów.

Przeciętne laboratoryjne mostki Wheatstone'a są przewidziane do pomiaru rezystancji od ok. $0,18 \text{ }\Omega$ do ok. $10 \text{ M}\Omega$. Do pomiaru rezystancji dużych, większych od ok. $10 \text{ M}\Omega$, buduje się mostki specjalne.

Błąd względny systematyczny pomiaru określa wzór:

$$\delta_{sRx} = \delta_{R2} + \delta_{R3} - \delta_{R4}$$

Rozróżnia się kilka określeń czułości mostka:

1. Względna czułość mostka - jest to stosunek odchylenia Δa wskazówki galwanometru do małej względnej zmiany rezystancji ramienia mostka w pobliżu stanu równowagi

$$S_m = \frac{\Delta a}{\delta_{Ri}}, \text{ przy czym: } \delta_{Ri} = \frac{\Delta R_i}{R_i} \text{ jest względną zmianą rezystancji jednego z ramion}$$

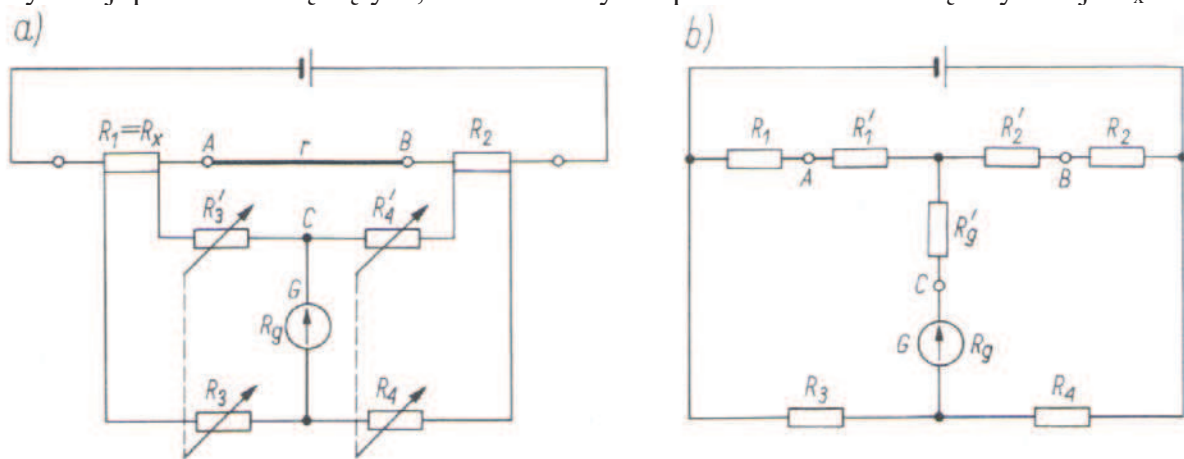
mostka, $i=1, 2, 3, 4$.

2. Względna czułość prądowa mostka - jest to stosunek prądu I_g w przekątnej galwanometru do względnej zmiany (od stanu równowagi) rezystancji

$$\text{jednej z gałęzi } S_{ml} = \frac{I_g}{\delta_{Ri}}.$$

Mostek Thomsona

Przeznaczony jest do pomiaru małych rezystancji, umożliwia eliminowanie wpływu rezystancji przewodów łączących, która może być współmierna z mierzoną rezystancją R_x .



Rys. 34. Mostek Thomsona: a) układ; b) układ zastępczy. [2, s. 336]

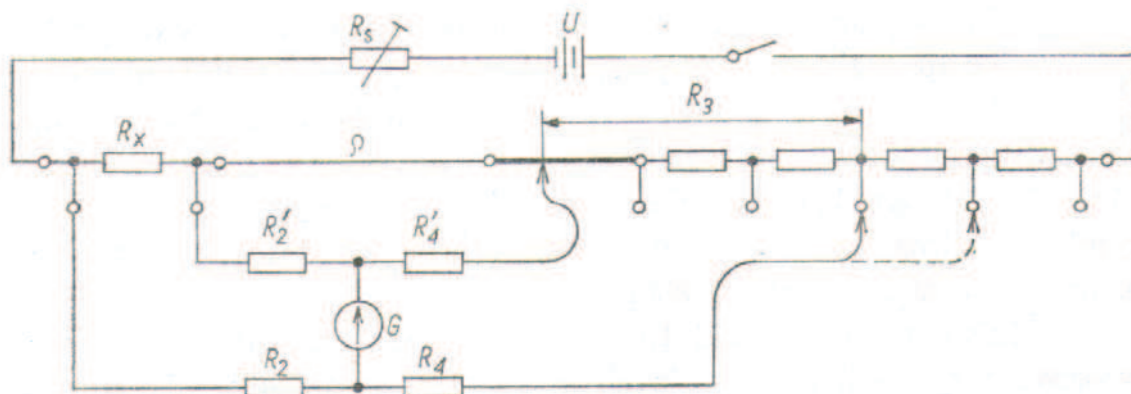
Przy założeniu: $\frac{R_3'}{R_3} = \frac{R_4'}{R_4}$ otrzymujemy $R_x = R_1 = R_3 \frac{R_2}{R_4}$

Na rys. 35 przedstawiono schemat mostka technicznego, w którym równoważenie jest dokonywane za pomocą zmian rezystancji w ramieniu R_3 . Mostki techniczne pozwalają na wykonywanie pomiarów rezystancji w zakresie $(10^{-4} \div 1) \text{ }\Omega$ z dokładnością $\pm(1 \div 2)\%$.

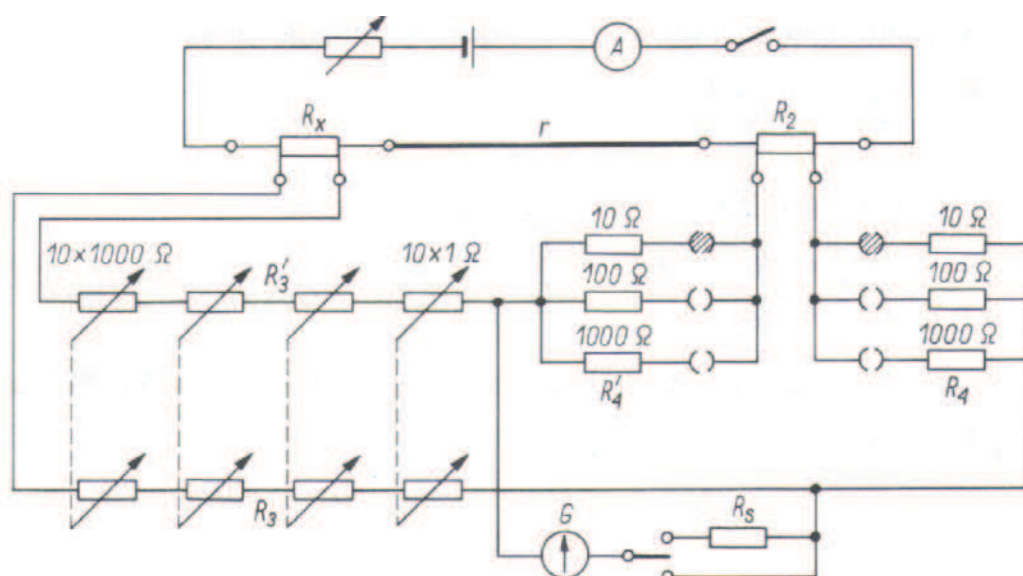
Układ połączeń laboratoryjnego mostka Thomsona, wraz z obwodem zasilającym przedstawiono na rys.36. Oporniki R_x i R_2 (wzorcowy, o rezystancji zbliżonej do R_x) są włączone w zewnętrzny obwód prądowy, zamykający się poza mostkiem właściwym. Zacisk prądowy opornika R_x i opornika R_2 łączy się przewodem miedzianym, możliwie krótkim i grubym, aby jego rezystancja r była jak najmniejsza. Zaciski napięciowe tych oporników dołącza się do mostka.

Zakres pomiaru mostka zmienia się przełącznikiem kołowym, wybierając odpowiednią parę jednakowych wartości R_4 i R_4' .

Zakresy pomiarowe laboratoryjnych mostków Thomsona obejmują rezystancje $10^{-6} \Omega$ do 10Ω przy łącznym błędzie pomiaru w granicach od 0,05% do 0,2 %.



Rys. 35. Techniczny mostek Thomsona. [4, s. 307]



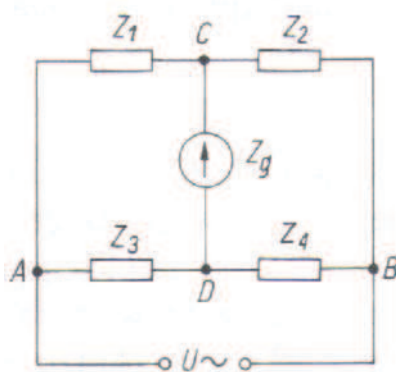
Rys. 36. Uproszczony układ laboratoryjnego mostka Thomsona. [2, s. 338]

Mostki prądu przemiennego

Mostki prądu przemiennego są przeznaczone do pomiarów parametrów elektrycznych, cewek i kondensatorów a także obwodów, w których występują indukcyjności lub pojemności. Mostki laboratoryjne umożliwiają pomiary z błędem nie przekraczającym 0,5%. Mostki zasilane są napięciem sinusoidalnym.

Mostki prądu przemiennego są układami czteroramiennymi, jak na rys.37. W stanie równowagi mostka wskaźnik równowagi wskazuje zerowe napięcie co świadczy o tym, że potencjały w punktach dołączenia wskaźnika (CD) są jednakowe. Obowiązuje wtedy podstawowe równanie równowagi mostków:

$$\underline{Z}_1 \underline{Z}_4 = \underline{Z}_2 \underline{Z}_3$$



Rys. 37 Układ mostka prądu przemiennego. [2, s. 339]

Mostek Maxwella

Mostek Maxwella służy do pomiaru indukcyjności własnej obwodów liniowych (nie zawierających rdzeni ferromagnetycznych).

Indukcyjność i rezystancję badanego obwodu wyznaczają wzory:

$$L_x = L_w \frac{R_3}{R_4} \quad R_x = R_w \frac{R_3}{R_4}.$$

Na podstawie pomiaru mostkiem Maxwella można obliczyć indukcyjność wzajemną dwóch cewek połączonych szeregowo – zgodnie i szeregowo – przeciwsobnie.

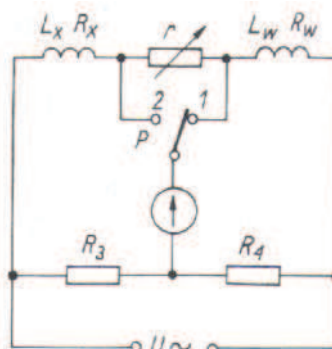
$$M = \frac{L' - L''}{4} \quad \text{gdzie: } L' = L_1 + L_2 + 2M; \quad L'' = L_1 + L_2 - 2M$$

Do pomiarów indukcyjności stosuje się również tzw. mostki Maxwella – Wiena, w których mierzoną indukcyjność porównuje się z pojemnością kondensatora wzorcowego.

Z warunku równowagi mostka otrzymuje się wzory określające mierzone parametry cewki:

$$R_1 = \frac{R_2 R_3}{R_4}, \quad L_1 = R_2 R_3 C_4.$$

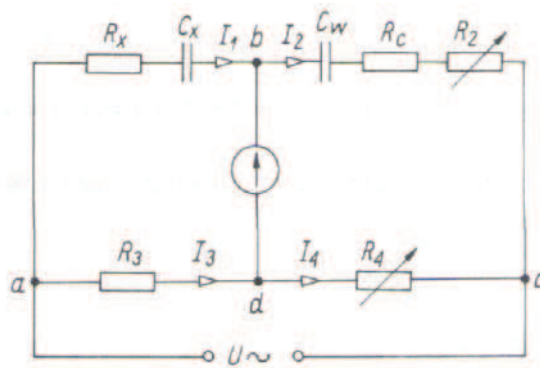
Mostki takie są stosowane do pomiaru indukcyjności w zakresie do ok. 10 H z błędem podstawowym od 0,1% do 0,2% w dość szerokim zakresie częstotliwości.



Rys. 38 Układ mostka Maxwella. [2, s. 341]

Mostek Wiena

Jest przeznaczony do pomiarów pojemności i kąta strat kondensatorów. Uproszczony układ pomiarowy mostka przedstawiono na rysunku 39. Pojemność mierzoną C_x porównuje się z pojemnością C_w kondensatora wzorcowego. Równoważenia mostka dokonuje się kolejno opornikami R_4 i R_2 .

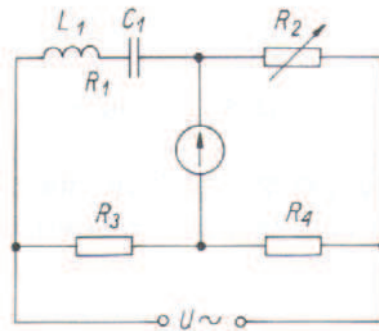


Rys. 39. Układ mostka Wiena. [2, s. 343]

$$C_x = C_w \frac{R_4}{R_3}, \quad R_x = (R_c + R_2) \frac{R_3}{R_4}$$

Mostek rezonansowy

Mostek rezonansowy o układzie szeregowym elementów L i C przedstawiono na rys.40. Równowaga mostka występuje przy rezonansie szeregowym w ramieniu Z_1 . Zastosowanie mostka może być różne. Mostkiem można mierzyć pojemność C_1 przy znanych wartościach ω i L_1 lub mierzyć indukcyjność L_1 znając ω i C_1 . Mostek stosowany jest również do pomiaru częstotliwości, gdy znane są wartości L_1 i C_1 .



Rys. 40. Układ mostka rezonansowego. [2, s. 346]

Dla warunku równowagi otrzymujemy zależności:

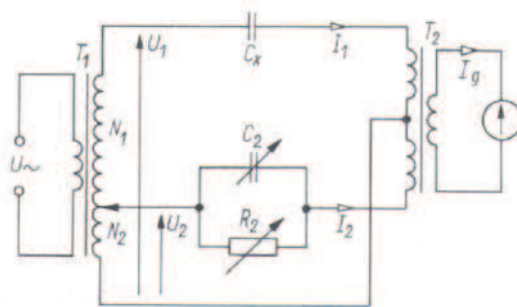
$$R_1 = R_2 \frac{R_3}{R_4}, \quad \omega^2 L_1 C_1 = 1$$

Mostki transformatorowe

Mostki transformatorowe stosuje się do pomiarów parametrów zarówno kondensatorów C_x i $\text{tg}\delta_x$, jak i cewek L_x i R_x .

Mostki transformatorowe są budowane w układach z jednym lub z dwoma transformatorami. Układy o dwóch transformatorach wykazują wiele zalet, dlatego też są częściej stosowane. Przykładem mostka transformatorowego o regulowanej impedancji równoważącej, jest układ przedstawiony na rysunku 41. Pomiar mostkiem polega na zrównaniu wartości prądów I_1 i I_2 w symetrycznych połowach uzwojenia transformatora różnicowego T_2 . Mierzoną pojemność i stratność określają wzory:

$$C_x = C_2 \frac{N_2}{N_1}, \quad \text{tg}\delta_x = \text{tg}\delta_2 = \frac{1}{\omega R_2 C_2}$$



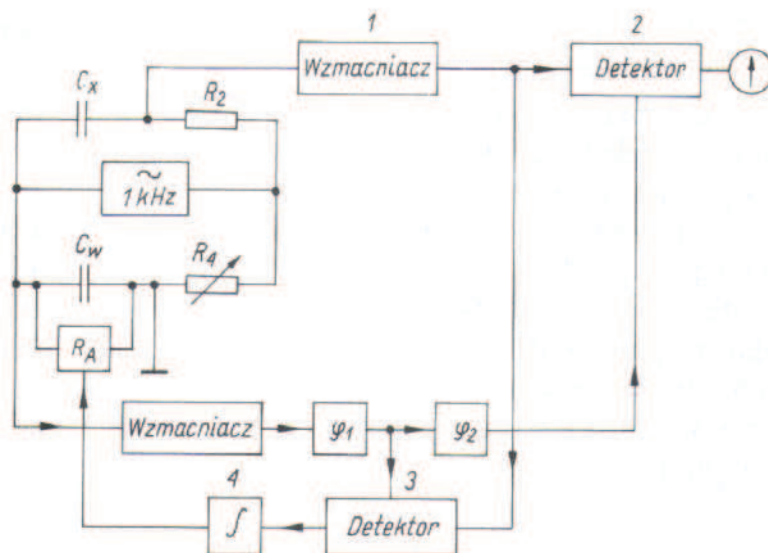
Rys. 41. Układ mostka transformatorowego równoważonego kondensatorem C_2 i opornikiem R_2 . [2, s. 347]

Mostki półautomatyczne RLC

Są przeznaczone do pomiaru rezystancji, indukcyjności i pojemności oraz umożliwiają wyznaczenie Q cewek i współczynnika stratności kondensatorów $\text{tg}\delta$.

W mostkach półautomatycznych jedna wartość ustawia się ręcznie druga natomiast zmienia się samoczynnie. Typowy mostek półautomatyczny RLC umożliwia siedem rodzajów pomiarów:

- rezystancji mierzonej prądem stałym,
- indukcyjności L_S i rezystancji R_S cewki wyznaczonych dla szeregowego układu zastępczego,
- indukcyjności L_P i rezystancji R_P cewki wyznaczonych dla równoległego układu zastępczego,
- indukcyjności L_a z automatycznym równoważeniem rezystancji strat
- pojemności C_s i rezystancji strat R_s kondensatora wyznaczonych dla szeregowego układu zastępczego,
- pojemności C_p i rezystancji strat R_p kondensatora wyznaczonych dla równoległego układu zastępczego,
- pojemności C_a kondensatora z automatycznym równoważeniem strat.



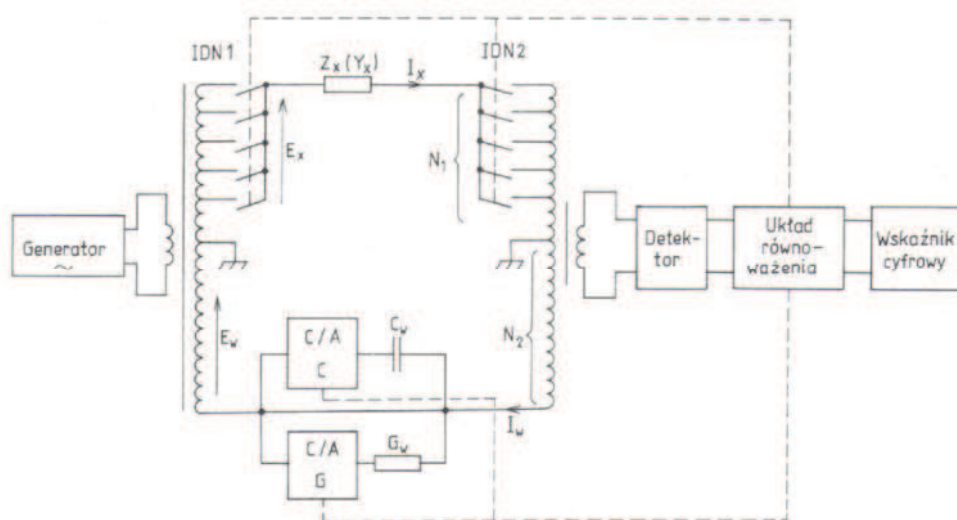
Rys. 42. Schemat blokowy półautomatycznego mostka do pomiaru pojemności. [2, s. 353]

Mostki automatyczne RLC – cyfrowe

Mostki cyfrowe prądu przemiennego, podobnie jak równoważone ręcznie są stosowane do pomiarów indukcyjności, pojemności, kąta strat dielektrycznych i rezystancji.

Równoważenie mostka odbywa się przez zmianę stosunków N_1/N_2 i E_x/E_w oraz składowych impedancji Z_w . Automatyczna zmiana zakresu odbywa się przez zmianę

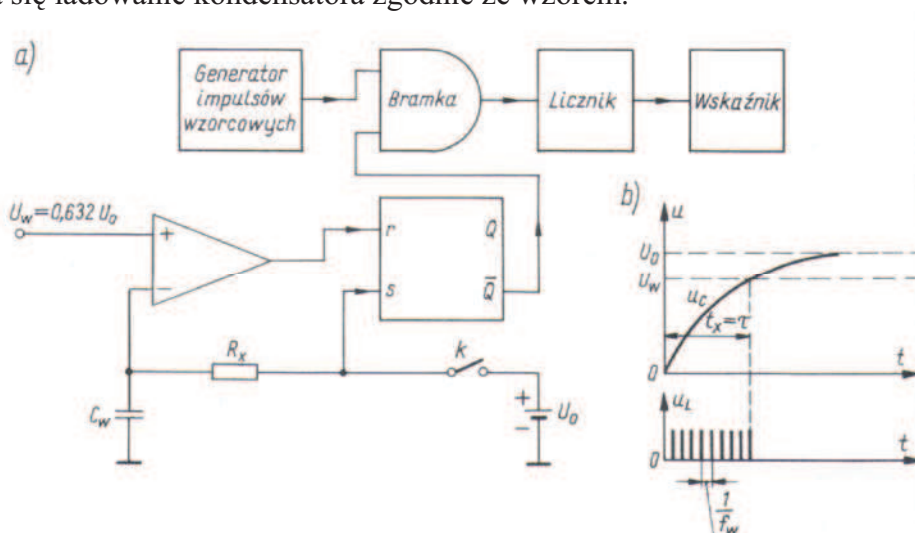
stosunków N_1/N_2 i E_x/E_w . Uzyskuje się to za pomocą odpowiednich układów przełączających, składających się z przełączników tranzystorowych i przekaźników. Dokładne zrównoważenie mostka występuje wówczas gdy $N_1 I_x = N_2 I_w$.



Rys. 43. Schemat funkcjonalny cyfrowego mostka prądu przemiennego. [2, s. 354]

Cyfrowe mierniki RLC

W metodzie przetwarzania rezystancji na proporcjonalny przedział czasu wykorzystuje się stany nieustalone występujące w dwójniku RC przy ładowaniu lub rozładowaniu kondensatora. Na rysunku 44 przedstawiono układ, w którym uzyskuje się przebieg napięcia na kondensatorze C_w ładowanym przez badany opornik R_x . Po zamknięciu przełącznika k rozpoczyna się ładowanie kondensatora zgodnie ze wzorem.



Rys. 44. Zasada cyfrowego pomiaru rezystancji-przy przetwarzaniu rezystancji w przedział czasu: a) schemat funkcjonalny; b) przebiegi sygnałów pomiarowych. [2, s. 273]

W chwili startu przerzutnik przechodzi do stanu 1 i rozpoczyna się przechodzenie impulsów o wzorcowej częstotliwości powtarzania do licznika. Zliczanie impulsów zakończy się po zamknięciu bramki. Nastąpi to wówczas, gdy napięcie na kondensatorze zrówna się z wzorcowym i komparator wyśle impuls przełączający przerzutnik bramkujący, a więc gdy

$$u_c = U_0(1 - e^{-1}) = 0,632U_0 = U_w$$

tzn., gdy $t_x = \tau = R_x C_w$.

Przeciętne zakresy tego typu przyrządów zawierają się w granicach $1\Omega \div 100\Omega$ albo $100\text{ pF} \div 1\text{ }\mu\text{F}$, przy błędzie pomiaru $\pm(0,1 \div 0,5)\%$. Zmianę okresów uzyskuje się przez zmianę pojemności kondensatora wzorcowego (lub rezystancji opornika wzorcowego) oraz przez zmianę częstotliwości impulsów zliczanych przez licznik.

Z uwagi na to, że w miernikach takich występuje ta sama wielkość pośrednia (tj. przedział czasu) co i przy pomiarze napięcia, wykonuje się je jako woltomierze. Większość bloków funkcjonalnych jest wówczas wspólna dla woltomierza i omomierza.

W podobny do omawianego poprzednio sposobu pomiaru rezystancji i pojemności można zrealizować cyfrowy pomiar indukcyjności. Wykorzystuje się wówczas stany nieustalone w obwodzie R_L , L_X .

Błędy pomiarowe – bezwzględny i względny.

Ograniczona dokładność narzędzia pomiarowego powoduje, że wartość wyniku pomiaru różni się od wartości wielkości mierzonej. Różnicę między tymi wartościami nazywa się **błędem pomiaru**. Ze względu na przyczynę powstania błędów rozróżnia się: błędy podstawowe i dodatkowe, błędy metody, błędy bezwzględne i względne, błędy systematyczne, przypadkowe, nadmierne i inne.

Błąd podstawowy narzędzia pomiarowego występuje wówczas, gdy narzędzie jest stosowane w warunkach znamionowych określonych przez normy.

Błędy dodatkowe występują wówczas, gdy narzędzie jest stosowane w warunkach różnych od warunków znamionowych (op. błąd temperaturowy, częstotliwościowy).

Błąd metody jest najczęściej spowodowany energią pobieraną przez zastosowane narzędzie pomiarowe.

Błąd bezwzględny Δ jest różnicą między wynikiem pomiaru x a wartością rzeczywistą wielkości mierzonej v , czyli

$$\Delta = x - v$$

Błąd bezwzględny Δ , zawsze wyrażony w jednostkach wielkości mierzonej, ma konkretny znak: plus (+) lub minus (-).

Błąd względny δ jest to stosunek błędu bezwzględnego Δ do wielkości mierzonej v

$$\delta = \frac{\Delta}{v} = \frac{x - v}{v}$$

lub wyrażonego w procentach

$$\delta = \frac{\Delta}{v} 100.$$

Zmierzona wartość x jest nazywana niekiedy surowym wynikiem pomiaru. Wartość rzeczywista v jest w praktyce nieznana. W pomiarach zastępuje się ją względnie dokładnym przybliżeniem, tzw. **wartością poprawną** x_p otrzymaną za pomocą wzorcowego narzędzia pomiarowego.

Błąd bezwzględny Δ , lecz ze znakiem przeciwnym, nazywa się **poprawką**:

$$p = -\Delta$$

Dodając algebraicznie poprawkę p do wartości x uzyskanej z pomiarów, otrzymuje się wynik poprawiony, równy wartości poprawnej

$$x_p = x + p$$

Przy wykonywaniu bezpośrednich pomiarów należy obliczyć i uwzględnić błąd podstawowy, błąd metody oraz błędy dodatkowe. Niepewność wyniku pomiaru przeważnie ocenia się na podstawie klasy dokładności przyrządu.

Klasa dokładności przyrządu

Klasą dokładności przyrządu kl nazywamy stosunek maksymalnego błędu bezwzględnego $\Delta_{\max}$ przyrządów danego typu do zakresu przyrządu α_N (maksymalnego wskazania) pomnożonym przez 100 i zaokrąglony do liczby z określonego szeregu liczb

$$kl = \frac{|\Delta_{\max}|}{\alpha_N} \cdot 100$$

gdzie:

$|\Delta_{\max}|$ - maksymalny bezwzględny błąd pomiaru,

α_N - znamionowy zakres pomiarowy przyrządu.

Bezwzględną przyrządową niepewność Δ_p wskazania α wyniku pomiaru (inaczej: **błąd bezwzględny dopuszczalny** - rys.44a) oblicza się z zależności

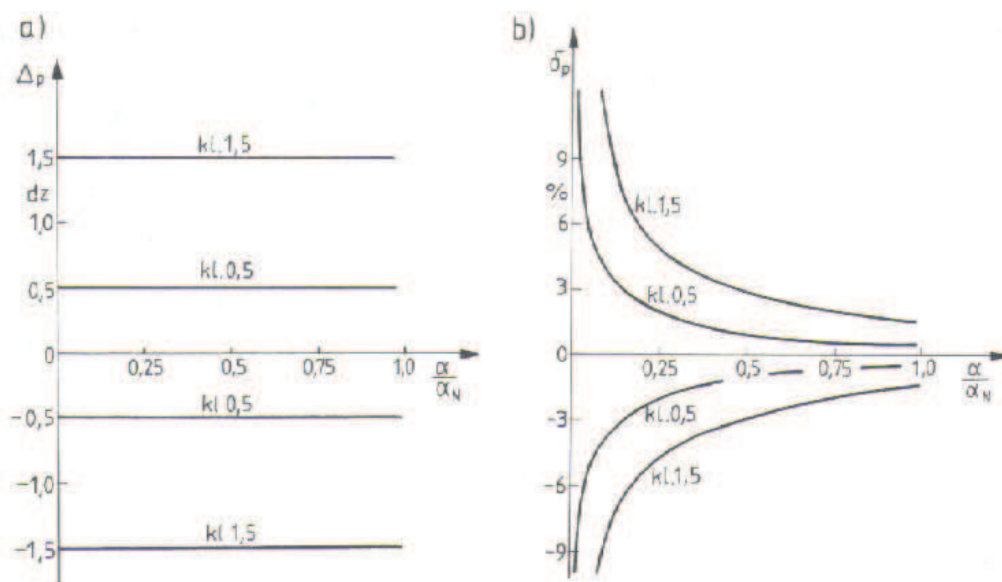
$$\Delta_p = \pm \frac{kl}{100} \alpha_N$$

a **względną przyrządową niepewność** δ_p [%] wskazania α wyniku pomiaru (inaczej: **błąd względny dopuszczalny** - rys.46b) wyznacza się ze wzoru

$$\delta_p = \pm kl \frac{\alpha_N}{\alpha}$$

przy czym: kl oznacza klasę dokładności zastosowanego przyrządu, α jest wynikiem pomiaru, α_N oznacza znamionowy zakres pomiarowy przyrządu.

Jeżeli przyrząd ma podziałkę nieliniową (np. omomierz), to w miejsca α i α_N należy wstawić odpowiednio długość l [mm] odcinka odpowiadającego wskazaniu α i długość znamionową l_N [mm] odpowiadające zakresowi podziałki α_N przyrządu.



Rys. 45. Niepewność wskazań: a) bezwzględna Δ_p , b) względna w funkcji wychylenia wskazówki wychylenia wskazówki miernika analogowego. [5, s. 56]

W przypadku stosowania przyrządów cyfrowych **bezwzględna przyrządowa niepewność** wyniku pomiaru

$$\Delta_p = \pm (|\delta_Z N_Z| + |\delta_X N_X|)$$

a względna przyrządowa niepewność

$$\delta_p = \pm \frac{(|\delta_z N_z| + |\delta_x N_x|)}{N_x} = \frac{\Delta_p}{N_x}$$

gdzie:

N_x - cyfrowy wynik pomiaru,

N_z - nastawiony zakres (podzakres),

δ_x - względna niepewność przyrządu wartości zmierzonej,

δ_z - względna wartość końcowa (pod)zakresu przyrządu.

4.3.2. Pytania sprawdzające

Odpowiadając na pytania, sprawdzisz, czy jesteś przygotowany do wykonania ćwiczeń.

1. Co to jest mostek pomiarowy?
2. Jakie znasz mostki pomiarowe prądu stałego?
3. Jakie znasz mostki pomiarowe prądu przemiennego?
4. Do jakich pomiarów przeznaczone są laboratoryjne mostki Wheatstone'a?
5. Do jakich pomiarów przeznaczone laboratoryjne mostki Thomsona?
6. Dlaczego rezystancje o wartości mniejszej niż 1Ω można dokładniej zmierzyć mostkiem Thomsona niż mostkiem Wheatstone'a?
7. Jakie wielkości można mierzyć mostkiem prądu przemiennego?
8. Jakie zalety ma mostek transformatorowy?
9. Co to są mostki uniwersalne RLC i do czego służą?
10. Do czego przeznaczone są mostki półautomatyczne RLC?
11. Jaka jest zasada działania cyfrowego mostka prądu przemiennego?

4.3.3. Ćwiczenia

Ćwiczenie 1

Sprawdzić klasę dokładności mostka technicznego Wheatstone'a.

Sposób wykonania ćwiczenia

Aby wykonać ćwiczenie powinieneś:

- 1) przygotować wzorce rezystancyjne 10Ω , 100Ω i 1000Ω o klasę dokładniejszą niż badany mostek,
- 2) wykonać pomiar rezystancji wzorców,
- 3) obliczyć niepewność pomiaru i klasę dokładności mostka,
- 4) sformułować wnioski dotyczące dokładności pomiaru mostka.

Wyposażenie stanowiska pracy:

- mostek Wheatstone'a,
- instrukcja obsługi mostka,
- wzorce rezystancyjne 10Ω , 100Ω i 1000Ω .

Ćwiczenie 2

Sprawdzić dokładność pomiaru pojemności. Pomiar przeprowadzić mostkami dostępnymi w laboratorium.

Sposób wykonania ćwiczenia

Aby wykonać ćwiczenie powinienś:

- 1) przygotować 3 wzorce pojemności,
- 2) wykonać pomiary pojemności dla 3 częstotliwości,
- 3) obliczyć niepewność pomiaru i klasę dokładności mostka,
- 4) sformułować wnioski dotyczące dokładności pomiaru mostka.

Wyposażenie stanowiska pracy:

- mostek do pomiaru pojemności,
- instrukcja obsługi mostka,
- wzorce pojemności.

Ćwiczenie 3

Sprawdzić poprawność pomiaru mostkiem cyfrowym RLC.

Sposób wykonania ćwiczenia

Aby wykonać ćwiczenie powinienś:

- 1) przygotować 3 wzorce rezystancji,
- 2) przygotować 3 wzorce indukcyjności,
- 3) przygotować 3 wzorce pojemności,
- 4) wykonać pomiar impedancji wzorców,
- 5) obliczyć błędy pomiarowe.

Wyposażenie stanowiska pracy:

- mostek cyfrowy RLC,
- instrukcja obsługi mostka,
- wzorce rezystancji, indukcyjności, pojemności.

4.3.4. Sprawdzian postępów

Czy potrafisz:

- 1) dobrać mostki do pomiaru rezystancji?
- 2) dobrać mostki do pomiaru indukcyjności?
- 3) dobrać mostki do pomiaru pojemności?
- 4) wyjaśnić zasadę działania mostka Wheatstone'a?
- 5) wyjaśnić zasadę działania mostka Thomsona/?
- 6) wyjaśnić zasadę działania mostka Maxwella ?
- 7) wyjaśnić zasadę działania mostka Wiena ?
- 8) wyjaśnić zasadę działania mostka Maxwella ?
- 9) wyjaśnić zasadę działania mostka Scheringa /?
- 10) wyjaśnić zasadę działania mostka rezonansowego ?
- 11) wyjaśnić zasadę działania mostka transformatorowego?
- 12) narysować schemat blokowy półautomatycznego mostka ?

Tak

Nie

☐	☐
☐	☐
☐	☐
☐	☐
☐	☐
☐	☐
☐	☐
☐	☐
☐	☐
☐	☐
☐	☐
☐	☐

- | | | |
|--|--------------------------|--------------------------|
| 13) do pomiaru pojemności? | ☐ | ☐ |
| 14) wyjaśnić zasadę działania mostka półautomatycznego? | ☐ | ☐ |
| 15) wyjaśnić zasadę działania cyfrowego mostka prądu przemiennego? | ☐ | ☐ |
| 16) wyjaśnić budowę mostków uniwersalnych? | ☐ | ☐ |
| 17) wyjaśnić zasadę działania mostków uniwersalnych ? | ☐ | ☐ |
| 18) oszacować błędy pomiaru? | ☐ | ☐ |

6. LITERATURA

1. Chwaleba A., Moeschke B., Płoszajski G.: Elektronika, WSiP, Warszawa 1999
2. Chwaleba A., Poniński M., Siedlecki A.: Metrologia elektryczna, WNT, Warszawa 2003
3. Grabowski L.: Pracownia elektroniczna, WSiP, Warszawa 1999
4. Marcyniuk A., Pasecki E., Pluciński M., Szadkowski B.: Podstawy metrologii elektrycznej, WNT, Warszawa 1984
5. Parchański J.: Miernictwo elektryczne i elektroniczne, WSiP, Warszawa 1997
6. Pilawski M. Winek T.: Pracownia elektryczna, WSiP Warszawa 2005
7. Pióro B., Pióro M.: Podstawy elektroniki cz.2; WSiP, Warszawa 1997