

Ćwiczenie M (3 × 90 minut) Miernictwo

Przed zapoznaniem się z instrukcją i przystąpieniem do wykonywania ćwiczenia należy opanować następujący materiał teoretyczny:

1. Prąd stały i zmienny. Napięcie i natężenie prądu, opór elektryczny. [1], [2].
2. Zasady pomiaru wielkości elektrycznych. [3], [4].
3. Czwórniki. [1], [2].
4. Zasada działania oscyloskopu. [5].

Cel ćwiczenia

Celem ćwiczenia jest zapoznanie się z właściwościami i zasadami użytkowania wybranych elektronicznych przyrządów pomiarowych. Do przeprowadzenia pomiarów w ramach ćwiczenia przewidziane jest wykorzystanie: zasilacza stabilizowanego, generatora funkcyjnego, oscyloskopu dwukanałowego oraz multimetrów cyfrowych.

Metoda pomiaru

Wykonywanie prac laboratoryjnych wymaga znajomości aparatury pomiarowej, jej budowy oraz zasad funkcjonowania. Istotna jest także umiejętność prawidłowego przeprowadzenia pomiaru. Pomiar polega na porównaniu wartości wielkości mierzonej z pewną jej wartością przyjętą za jednostkę. Porównania tego dokonuje się za pomocą przyrządu pomiarowego – miernika. Mierniki są wyskalowane w jednostkach wielkości mierzonej. Nazwa miernika pochodzi najczęściej od jednostki wielkości mierzonej (np. woltomierz, amperomierz, omomierz, częstotściomierz). Rzeczywista wartość mierzonej wielkości nigdy nie jest znana. W wyniku pomiaru zastępuje się ją pewnym przybliżeniem obarczonym błędem. W przypadku pojedynczego pomiaru tym przybliżeniem jest wartość odczytana z miernika. W przypadku serii pomiarów tej samej wielkości najczęściej jest to średnia arytmetyczna obliczona na podstawie wyników uzyskanych w danej serii pomiarowej.

Czułością przyrządu pomiarowego nazywamy miarę jego reakcji na zmiany wartości mierzonej. Rozdzielczością nazywamy najmniejszą zmianę wartości wielkości mierzonej, którą można odczytać. Teoretyczna rozdzielczość miernika (r) wynika z ilości wyświetlanych cyfr (N) oraz wybranego zakresu pomiarowego (Z). W multimetrach cyfrowych spotykamy dwa rodzaje wyświetlaczy: pełne, tzn. takie, w których na wszystkich miejscach są wyświetlane wszystkie cyfry od 0 do 9 oraz niepełne, na których na najwyższej pozycji (pierwsza z lewej cyfra) jest wyświetlana jedynka lub nie wyświetlana jest żadna cyfra. Dla tzw. wyświetlaczy pełnych rozdzielczość odczytu obliczamy korzystając z zależności: $r = Z/10^N$. Np. dla woltomierza z pełnym wyświetlaczem 4-cyfrowym na zakresie 100mV możemy dokonywać pomiarów w przedziale $0 \div 99,99\text{mV}$ z rozdzielczością odczytów: $r = 100/10^4 = 0,01\text{mV}$. Dla miernika z wyświetlaczem niepełnym przy określaniu rozdzielczości bierzemy pod uwagę jedynie liczbę cyfr w pełni wyświetlanych. Jednocześnie zamiast pełnej wartości zakresu do rozważań bierzemy rząd wybranego zakresu (przy wybranym zakresie np. 20V, bierzemy $Z = 10\text{V}$). Np. dla miernika z wyświetlaczem pokazującym 3½ cyfry (w zasadzie wyświetlacz jest 4-cyfrowy, ale na pierwszej z lewej pozycji może on wyświetlać tylko jedynkę) i dla zakresu 200mV (rząd zakresu 100mV) możemy dokonywać pomiarów w zakresie $0 \div 199,9\text{mV}$ z rozdzielczością odczytu: $r = 100/10^3 = 0,1\text{mV}$.

Niedokładność pomiaru (błąd bezwzględny pomiaru) ma dwa składniki. Jeden stanowi procentową część wartości odczytanej, oznaczanej jako rdg, np. $\pm 0,5\% \text{ rdg}$. Drugi składnik zależy od rozdzielczości r (oznaczanej również jako LSB, LSD lub dgts) i najczęściej podawany jest w postaci krotności rozdzielczości, np. $+5\text{dgts}$. Na polu odczytowym mierników cyfrowych nie ma żadnych informacji dotyczących ich dokładności, konieczne jest zatem skorzystanie z danych zawartych w instrukcji obsługi miernika. Jeśli przykładowo cyfrowy woltomierz na zakresie 2V wskazuje wartość 1,00V, a z instrukcji woltomierza odczytano, że na zakresie 2V błąd bezwzględny miernika wynosi $\Delta U = \pm(0,7\% \text{ rdg} + 2\text{dgts})$, natomiast jego rozdzielczość wynosi 0,01V to oznacza, że bezwzględny błąd pomiaru napięcia $\Delta U = \pm(0,007 \cdot 1 + 2 \cdot 0,01\text{V}) = 0,027\text{V} \approx 0,03\text{V}$. Zwróćmy uwagę na istotną różnicę między rozdzielczością, a wartością błędu bezwzględnego. Rozdzielczość wynosi w tym przykładzie $\text{dgts} = 0,01\text{V}$ a zatem prawidłowo obliczony błąd bezwzględny $\Delta U = 0,03\text{V}$ jest 3 razy większy od rozdzielczości. Jak łatwo zauważyć, błąd bezwzględny jest zazwyczaj większy a jedynie w najlepszym przypadku równy rozdzielczości. Wybór zakresu w zasadniczy sposób wpływa na dokładność odczytu. Optymalnym wyborem (ze względu na obniżenie wartości błędu zależnego od rozdzielczości) jest najmniejszy dopuszczalny dla mierzonej wielkości zakres (wartość mierzona jest wtedy najbardziej zbliżona do maksymalnej wartości danego zakresu).

Każde stanowisko laboratoryjne wyposażone jest w zestaw aparatury pomiarowej, w skład którego wchodzi następujące elementy:

- zasilacz stabilizowany DF1731SB3A lub MPS-3003L-3,
- generator funkcyjny DF1641A,
- analogowy oscyloskop dwukanałowy GOS-620 lub GOS-630.

Dodatkowo każde stanowisko może być wyposażone w przenośne multimetry cyfrowe typu M-4650 i M-4660 oraz komplet niezbędnego okablowania.

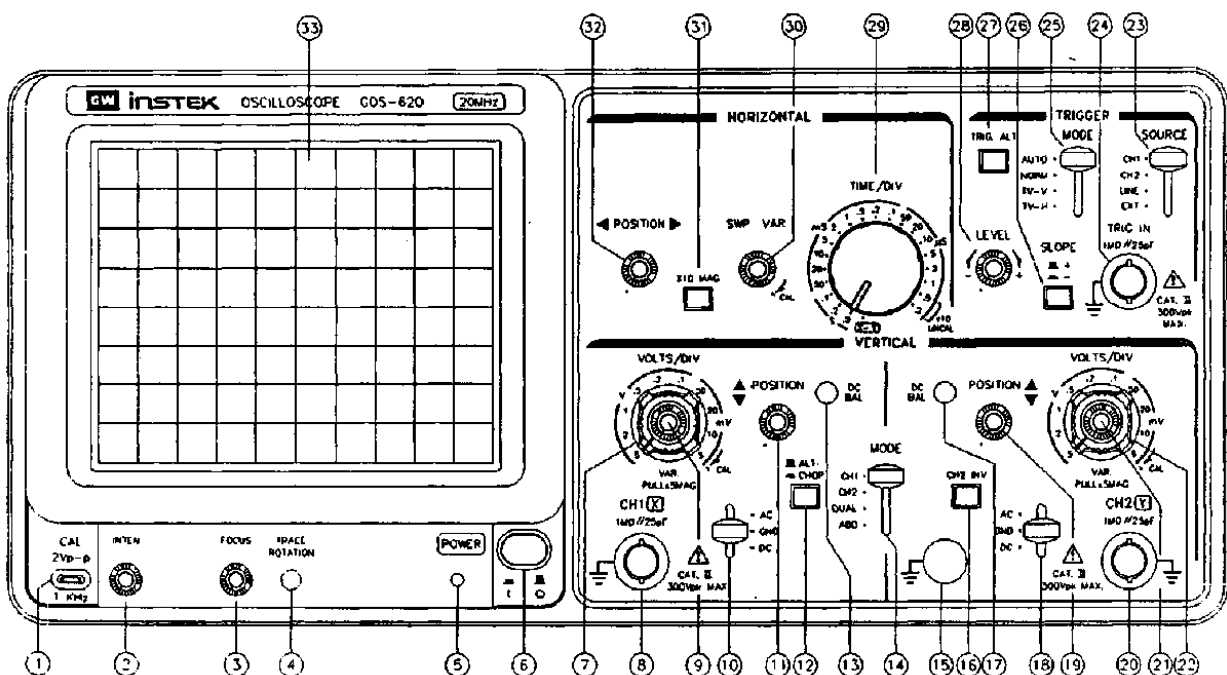
Zasilacz stabilizowany jest regulowanym źródłem napięcia lub prądu stałego. Na płycie czołowej zasilacza umieszczone są:

- pokrętła płynnej regulacji napięcia i natężenia prądu wyjściowego,
- 2 pary gniazd wyjść regulowanych (+) i (–) oraz 2 gniazda uziemienia (GND),
- gniazda wyjścia stabilizowanego napięcia 5V,
- 4 kontrolne mierniki wielkości wyjściowych (2 woltomierze oraz 2 amperomierze),
- kontrolki sygnalizujące tryb pracy,
- przyciski wyboru rodzaju pracy zasilacza (sekcje pracują szeregowo, równolegle bądź niezależnie).

Zazwyczaj stabilizacji podlega napięcie na zaciskach wyjściowych zasilacza. Jeżeli z zasilacza pobiera się prąd o natężeniu mniejszym od nastawionego, wówczas na zaciskach wyjściowych utrzymuje się stałe nastawione napięcie. Po zwiększeniu natężenia pobieranego prądu ponad nastawioną wartość zasilacz przechodzi w tryb stabilizacji natężenia prądu (sygnalizuje to odpowiednia kontrolka), przy czym tak obniża napięcie, aby utrzymywać nastawioną wartość natężenia prądu. Możliwość nastawy maksymalnego natężenia prądu (podczas pracy ze stabilizacją napięcia) lub maksymalnego napięcia (podczas pracy ze stabilizacją natężenia prądu) wykorzystuje się w celu zabezpieczenia zasilanego układu przed uszkodzeniem. Należy pamiętać że nastawy maksymalne powinny być nieco wyższe od spodziewanych rzeczywistych wartości dla danego obciążenia.

Generator funkcyjny jest źródłem przebiegów napięciowych (sinusoidalnego, trójkątnego lub prostokątnego) o nastawialnej częstotliwości, amplitudzie i składowej stałej. Rodzaj przebiegu i zakres częstotliwości wybiera się za pomocą przełączników umieszczonych na płycie czołowej. Po wybraniu zakresu częstotliwość ustawia się płynnie za pomocą pokrętła (FREQUENCY). Wartość częstotliwości można odczytać z wyświetlacza. Amplitudę można zmieniać za pomocą pokrętła (AMPLITUDE). Sygnał wyjściowy dostępny jest na gnieździe BNC oznaczonym jako (OUTPUT). Impedancja wyjściowa generatora DF1641A wynosi 50Ω, dlatego trzeba się liczyć z możliwością wyraźnego zmniejszenia się amplitudy sygnału na wyjściu generatora przy wzroście jego obciążenia (czyli przy zmniejszaniu impedancji obciążenia np. do wartości poniżej 1kΩ).

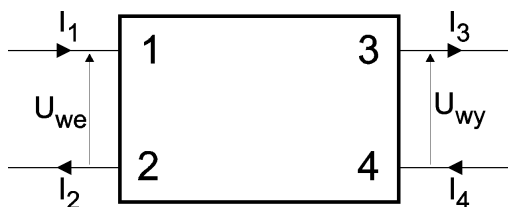
Analogowy oscyloskop dwukanałowy jest typowym przyrządem przeznaczonym do obserwacji i pomiarów przebiegów elektrycznych zarówno napięcia stałego jak i zmiennego w zakresie częstotliwości od kilku Hz do kilkunastu MHz. Płyta czołowa oscyloskopu pokazana została na rys. 1.



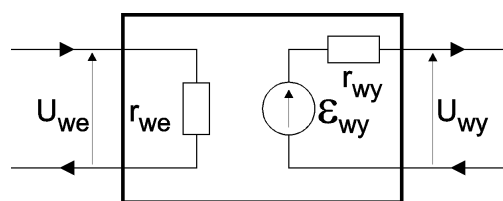
Rys. 1. Płyta czołowa oscyloskopu GOS-620

Oscyloskop składa się z zasadniczych modułów takich jak lampa oscyloskopowa, wzmacniacze odchyłania oraz generator podstawy czasu. Czułość lampy oscyloskopowej jest stała i niewielka, a w praktyce często musimy dokonywać pomiaru napięć z dużego zakresu wartości amplitud, np. rzędu ułamków wolta albo kilkudziesięciu woltów. Dlatego też w oscyloskop są wbudowane odpowiednie wzmacniacze. Są to wzmacniacze szerokopasmowe, tzn. mogące wzmacniać napięcia zmienne w szerokim zakresie częstotliwości (od ułamka Hz do kilkudziesięciu MHz), o dużym współczynniku wzmocnienia (kilka tysięcy razy). Wzmocnienie reguluje się poprzez dobór właściwego współczynnika odchyłania. Współczynnik odchyłania ustawia się – patrz rysunek 1 – pokrętkami (7) i (22) odpowiednio dla kanału pierwszego – wejście CH1 (8) – i drugiego – wejście CH2 (20). Ponieważ wyjścia wzmacniaczy dołączone są do układu odchyłania pionowego lampy oscyloskopowej dokonując regulacji wzmocnienia wpływamy na wielkość (wysokość) obserwowanego przebiegu. Jeżeli natomiast do układu podstawy czasu lampy oscyloskopowej przyłożymy zmienne napięcie o kształcie zębów piły, czyli tzw. napięcie piłokształtne, to na ekranie lampy plamka świetlna będzie się bardzo szybko przesuwiała ze strony lewej na prawą kreśląc jednocześnie odpowiedni przebieg sygnału z wejścia (8) lub (20). Do wytwarzania napięcia piłokształtnego służy wbudowany w oscyloskop generator podstawy czasu. Częstotliwość tego generatora jest regulowana pokrętkiem (29) w stosunkowo szerokim zakresie od mikrosekund do sekund. Obraz, który powstaje na ekranie oscyloskopu jest stabilny i nieruchomy tylko wtedy, gdy częstotliwości sygnału badanego i generatora podstawy czasu są jednakowe lub są wielokrotnościami. Przykładowo jeżeli częstotliwość badanego napięcia sinusoidalnego będzie równa częstotliwości generatora podstawy czasu, uzyskamy na ekranie jeden pełny okres sinusoidy, jeśli będzie dwa razy większa – dwa pełne okresy itd. Ustalenie ścisłej zgodności częstotliwości dokonywane jest automatycznie poprzez synchronizację generatora podstawy czasu sygnałem mierzonym. Przy braku pełnej synchronizacji obraz na ekranie lampy oscyloskopowej będzie się przesuwał w poziomie (w lewo lub w prawo).

Układy elektroniczne zawierają źródła (np. źródła prądu lub napięcia) i odbiorniki sygnału. Pomiedzy te dwie podstawowe części układu najczęściej włączone są inne elementy, które ogólnie biorąc posiadają jedno wejście i jedno wyjście. Wejście i wyjście mają po dwa zaciski. Ze względu na cztery zaciski elementy te nazywamy czwórnikami. Stan czwórnika opisują dwa napięcia U_{we} i U_{wy} oraz natężenia prądu I_1 , I_2 , I_3 i I_4 spełniające warunek równości prądów na wejściu i równości prądów na wyjściu ($I_1 = I_2$ oraz $I_3 = I_4$). Pojedynczy czwórnik charakteryzuje się określonymi właściwościami. Na ogół odnoszą się one tylko do jednej częstotliwości. Z tego powodu podane niżej definicje są słuszne dla ustalonej w danym przypadku częstotliwości.



Rys. 2. Schemat czwórnika



Rys. 3. Model czwórnika liniowego

Ogólnie czwórnik stanowi element z dwoma zaciskami wejściowymi (1 i 2) oraz dwoma zaciskami wyjściowymi (3 i 4). Schemat czwórnika przedstawiony jest na rys. 2.

Czwórnik czynny jest w stanie dostarczyć odbiornikowi większą moc czynną od pobranej ze źródła. Wykazuje zatem pewne wzmocnienie mocy, które ma wartość większą od jedności. Przykładem takiego czwórnika może być wzmacniacz tranzystorowy.

Czwórnik bierny może oddać odbiornikowi co najwyżej tyle mocy czynnej, ile otrzymuje na wejściu. Czwórnikami biernymi są zatem takie układy, które poza kondensatorami, cewkami i rezystorami nie zawierają żadnych innych elementów lub takie układy wzmacniaczy, których wzmocnienie mocy nie przekracza jedności niezależnie od typu odbiornika dołączonego do wyjścia wzmacniacza.

Czwórnik liniowy charakteryzuje się tym, że po podłączeniu do wyjścia czwórnika (zaciski 3 i 4) liniowego odbiornika, zależności między napięciem wejściowym U_{we} , napięciem wyjściowym U_{wy} i natężeniem prądu wyjściowego $I_{wy} = I_3 = I_4$ są liniowe. Oznacza to, że do opisu czwórnika liniowego można stosować prawa Kirchhoffa i zasadę superpozycji. Słuszny zatem będzie związek $U_{wy} = k_U U_{we}$ wiążący napięcie wejściowe i wyjściowe, w którym k_U oznacza stały współczynnik wzmocnienia napięciowego czwórnika liniowego.

Do dalszych rozważań przyjęty został model czwórnika liniowego pokazany na rys. 3. W przyjętym modelu czwórnik ten charakteryzuje się impedancją wejściową r_{we} , impedancją wyjściową r_{wy} oraz zastępczą SEM wyjściową $\mathcal{E}_{wy}$.

Przebieg pomiaru

Przed przystąpieniem do pomiarów za pomocą multimetru cyfrowego należy sprawdzić czy przełącznikiem został wybrany właściwy przyrząd pomiarowy oraz czy końcówki pomiarowe przyłączone zostały do właściwych zacisków wejściowych. Należy jednocześnie pamiętać o wyborze odpowiedniego zakresu pomiarowego. Oddziaływanie przyrządu pomiarowego na źródło wielkości mierzonej charakteryzuje rezystancja wejściowa (wewnętrzna) przyrządu. Obciążenie źródła wielkości mierzonej rezystancją wewnętrzną przyrządu może spowodować zmianę wartości wielkości mierzonej. Do najczęściej dokonywanych pomiarów w elektronice należy pomiar napięcia stałego jak i zmiennego. Pomiary napięć dokonywane są za pomocą woltomierzy. Ze względu na rodzaj mierzonego napięcia woltomierze dzieli się na woltomierze napięcia stałego (DC) i woltomierze napięcia zmiennego (AC). Napięcie zmienne może być opisane przez trzy wartości: szczytową, skuteczną i średnią. Wartość szczytowa jest największą wartością chwilową napięcia w czasie obserwacji. Wartość skuteczna U_{sk} jest definiowana jako średnia liczona po okresie T z kwadratu wszystkich wartości chwilowych $u(t)$:

$$U_{sk} = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T u^2(t) dt} . \quad (1)$$

Woltomierze napięcia zmiennego wskazują najczęściej wartości skuteczne dla przebiegów sinusoidalnych z określonego przez producenta zakresu częstotliwości. W przypadku innych przebiegów zmiennych (np.: prostokątnych i trójkątnych) wskazania woltomierzy napięcia zmiennego obarczone są zazwyczaj bardzo dużym błędem. Wartość średnia napięcia U_{sr} liczona po okresie T jest definiowana jako:

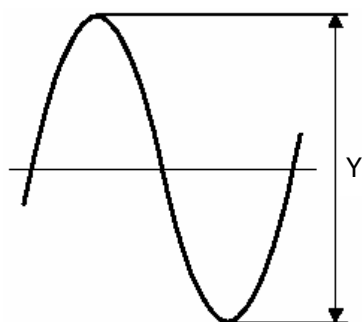
$$U_{sr} = \frac{1}{T} \int_0^T u(t) dt . \quad (2)$$

Do bezpośredniego pomiaru napięcia woltomierz włączany jest pomiędzy dwa punkty o określonych potencjałach, których różnica jest napięciem mierzonym. Woltomierz należy włączać w obwód pomiarowy równolegle. Do bezpośredniego pomiaru natężenia prądu służy amperomierz. Miernik ten włączany jest w obwód pomiarowy szeregowo. Przy doborze amperomierza szczególną uwagę należy zwrócić na wybór właściwego zakresu pomiarowego, gdyż przekroczenie dopuszczalnej wartości natężenia prądu może być przyczyną uszkodzenia miernika. Do pośredniego pomiaru natężenia prądu może służyć woltomierz. W takim przypadku dokonuje się pomiaru spadku napięcia na rezystorze wzorcowym włączonym szeregowo w obwód pomiarowy. Pomiaru rezystancji można dokonywać metodą bezpośrednią przy użyciu omomierza lub metodą techniczną polegającą na równoczesnym pomiarze napięcia na zaciskach rezystora i natężenia prądu płynącego przez rezystor.

Przed włączeniem zasilania oscyloskopu należy przygotować oscyloskop do pracy. W tym celu należy zmniejszyć do minimum jasność (2) oraz ustawić minimalne wzmocnienie sygnału wejściowego (7)/(22). Następnie pokrętką płynnej regulacji wzmocnienia (9)/(21) i podstawy czasu (30) powinny zostać ustawione w pozycji CAL. Z kolei pokrętką ostrości (3) oraz położenia poziomego (32) i pionowego (11)/(19) należy ustawić w położeniach środkowych. Po wykonaniu opisanych czynności wstępnych można włączyć zasilanie oscyloskopu (6) i odczekać kilka minut, aby oscyloskop się nagrzał. Istotną trudnością dla początkujących użytkowników oscyloskopu jest uzyskanie stabilnego obrazu na ekranie oscyloskopu. Najwygodniej jest rozpocząć pracę od lokalizacji linii poziomej kreślonej na ekranie dla zerowej wartości sygnału wejściowego. W tym celu przełączniki sprzężenia sygnału badanego (10) oraz (18) należy ustawić w pozycji GND. Aby uruchomić generator podstawy czasu, należy przełącznikiem (25) wybrać tryb wyzwalania automatycznego AUTO. Następnie pokrętkami jasności (2) INTEN i ostrości (3) FOCUS trzeba skorygować jaskrawość i ostrość obserwowanego na ekranie obrazu (powinna być widoczna ostra linia pozioma), a potem pokrętkami położenia (11)/(19) i (32) przesunąć obraz na środek ekranu. Jeżeli do gniazda wejściowego (8) CH1 lub (20) CH2 doprowadzony jest sygnał to po zmianie sprzężenia wejścia (10)/(18) na DC powinien on być widoczny na ekranie oscyloskopu, choć może być niestabilny. Może się również zdarzyć, że składowa stała sygnału jest tak duża, że obraz przesunięty jest w pionie poza widoczny obszar ekranu. W takim przypadku należy zwiększać współczynnik odchyłania (7)/(22) wybranego kanału wejściowego, aż do uzyskania widocznego obrazu. W przypadku sygnałów o dużej wartości składowej stałej konieczna może być zmiana sprzężenia (10)/(18) na AC. Aby obraz widoczny na ekranie oscyloskopu był stabilny, konieczne jest spełnienie warunku synchronicznego wyzwalania podstawy czasu. Najłatwiej i najczęściej spełnienie powyższego warunku osiąga się stosując synchronizację wewnętrzną. Jeśli badany sygnał podawany jest na wejście CH1 przełącznik źródła wyzwalania (23) ustawia się w pozycji CH1. W przypadku obserwacji dwukanałowych przełącznikiem (23) można wybrać zarówno pozycję CH1, jak i CH2, zależnie od celu obserwacji i właściwości

sygnałów. W szczególnych przypadkach, gdy obserwowane przebiegi są synchroniczne z napięciem sieci zasilającej o częstotliwości 50Hz, wygodne może być wykorzystanie pozycji LINE przełącznika (23). Po ustawieniu we właściwej pozycji przełącznika (23) oraz po wybraniu prawidłowego poziomu wyzwania (np. ręcznie za pomocą pokrętki (28) LEVEL i przełącznika (26) SLOPE) obraz powinien być stabilny. Po uzyskaniu stabilnego obrazu należy ewentualnie skorygować jasność i ostrość obrazu za pomocą pokręteł (2) INTEN i (3) FOCUS. Podczas wykonywania wszystkich omówionych wyżej czynności można ograniczyć się do korzystania z trybu wyzwania automatycznego (przełącznik (25) pozycja AUTO). Jest to wygodne nie tylko w trakcie wstępnej lokalizacji obrazu, ale również podczas obserwacji i pomiarów. Z trybu NORM należy korzystać jedynie w przypadku sygnałów stwarzających trudności z synchronizacją. W trybie X-Y ustawianym przełącznikiem (29) wzmacniacz podstawy czasu jest sterowany sygnałem zewnętrznym. Wybór trybu pracy X-Y oznacza przyłączenie sygnału z kanału CH1 do wzmacniacza podstawy czasu (X), a sygnału z kanału CH2 do wzmacniacza odchylenia pionowego (Y).

Po zapoznaniu się z obsługą oscyloskopu należy połączyć wejście oscyloskopu z wyjściem generatora funkcyjnego. Po wstępnym ustawieniu parametrów sygnału pojawiającego się na wyjściu generatora należy tak dobrać położenia nastaw oscyloskopu, aby obraz widoczny na ekranie wypełniał go w 80% (cały przebieg „mieści” się na ekranie). Dokonując zmiany współczynnika podstawy czasu, pokrętką (29) należy z kolei wybrać takie położenie, aby obraz był stabilny i nieruchomy a jednocześnie, aby na ekranie widoczne było kilka pełnych okresów przebiegu badanego sygnału.



Rys. 4. Idea pomiaru napięcia

Przykładowy przebieg napięcia sinusoidalnego przedstawiony jest na rys. 4. Wartość międzyszczytową napięcia U_{PP} wyznaczyć można ze wzoru:

$$U_{PP} = Y \cdot C, \quad (3)$$

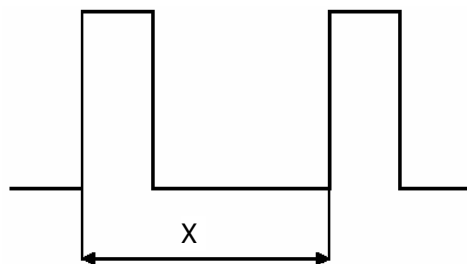
gdzie Y oznacza odczytaną z ekranu wysokość obrazu badanego przebiegu mierzoną w działkach [DIV], natomiast C przyjmuje wartość aktualnego współczynnika odchylenia mierzoną w woltach na działkę [V/DIV], odczytaną ze skali przełącznika (7)/(22). Amplituda U_m przykładowego przebiegu jest równa połowie napięcia międzyszczytowego U_{PP} :

$$U_m = \frac{1}{2} \cdot U_{PP} = \frac{1}{2} \cdot Y \cdot C. \quad (4)$$

Przy ustawieniu przełącznika (10)/(18) w pozycji AC występuje sprzężenie pojemnościowe eliminujące z badanego sygnału składową stałą. Jeżeli badany sygnał ma składową stałą, to przełączenie przełącznika z pozycji AC na DC spowoduje przesunięcie przebiegu obserwowanego na ekranie oscyloskopu w górę (przy dodatniej składowej stałej) lub w dół (przy ujemnej składowej stałej). Wartość składowej stałej U_{DC} można określić mnożąc wielkość przesunięcia przebiegu Δy (mierzoną w działkach) przez aktualną wartość współczynnika odchylenia C. Pomiar częstotliwości ν można dokonać poprzez pomiar okresu T badanego sygnału. W celu zwiększenia dokładności pomiaru przełącznikiem skokowej regulacji podstawy czasu (29) należy wybrać taką pozycję, aby na ekranie uzyskać jak najmniejszą liczbę pełnych okresów (jednak nie mniejszą niż jeden). Przykładowy przebieg napięcia prostokątnego przedstawiony jest na rys. 5. Częstotliwość badanego sygnału można określić ze wzoru:

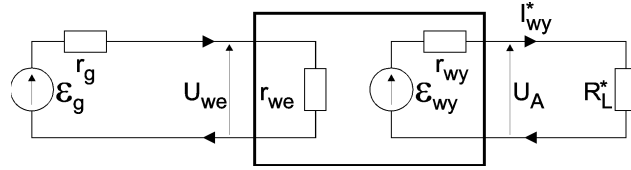
$$\nu = \frac{1}{T} = \frac{1}{X \cdot G}, \quad \text{przy czym okres } T = X \cdot G, \quad (5)$$

gdzie X oznacza odczytaną z ekranu długość (w działkach – [DIV]) odcinka odpowiadającego okresowi badanego sygnału, natomiast G przyjmuje wartość aktualnego współczynnika podstawy czasu mierzoną w sekundach na działkę [s/DIV], odczytaną ze skali przełącznika (29).



Rys. 5. Idea pomiaru okresu

W celu oszacowania impedancji wyjściowej r_{wy} badanego czwórnika, przy ustalonej SEM ε_g na generatorze o impedancji wyjściowej r_g , należy dokonać pomiarów napięć wyjściowych U_A i U_B w dwu przypadkach: bez dodatkowego obciążenia czwórnika ($R_L \rightarrow \infty$; rys. 6, pomiar napięcia U_A) oraz z dodatkowym obciążeniem ($R_L \neq \infty$; rys. 7, pomiar napięcia U_B).



Rys. 6. Schemat układu do pomiaru napięcia wyjściowego U_A

Przeprowadzimy następujące rozumowanie dla układu z rys. 6:

zakładamy, że:

$$R_L^* \rightarrow \infty \Rightarrow R_L^* \gg r_{wy} \Rightarrow \frac{r_{wy}}{R_L^*} \rightarrow 0, \quad (Z1)$$

wtedy dla obwodu wyjściowego naszego czwórnika z II prawa Kirchhoffa wynika, że:

$$\varepsilon_{wy} = I_{wy}^* r_{wy} + I_{wy}^* R_L^*, \quad (6)$$

po przekształceniach wzoru (6) otrzymujemy:

$$\frac{\varepsilon_{wy}}{R_L^*} = I_{wy}^* \frac{r_{wy}}{R_L^*} + I_{wy}^*, \quad (7a)$$

wykorzystując założenie (Z1) w (7a) mamy:

$$\frac{\varepsilon_{wy}}{R_L^*} \cong I_{wy}^*, \quad (7b)$$

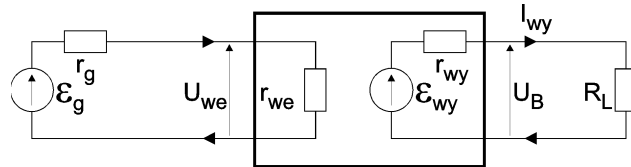
po przekształceniu dostajemy:

$$\varepsilon_{wy} \cong I_{wy}^* R_L^*, \quad (8)$$

ostatecznie otrzymujemy zależność:

$$\varepsilon_{wy} \cong U_A. \quad (9)$$

Wykazaliśmy zatem, że zmierzone napięcie U_A jest równe zastępczej SEM w przyjętym modelu czwórnika.



Rys. 7. Schemat układu do pomiaru napięcia wyjściowego U_B

Podobne rozumowanie można przeprowadzić dla układu z rys. 7:

zakładamy, że:

$$R_L \neq \infty, \quad (Z2)$$

z II prawa Kirchhoffa oraz z (9) wynika, że:

$$I_{wy} = \frac{\varepsilon_{wy}}{r_{wy} + R_L} = \frac{U_A}{r_{wy} + R_L}, \quad (10)$$

z prawa Ohma mamy:

$$U_B = I_{wy} R_L, \quad (11)$$

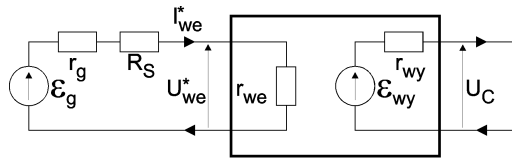
podstawiając (10) do (11) otrzymujemy:

$$U_B = \frac{U_A R_L}{r_{wy} + R_L} . \quad (12)$$

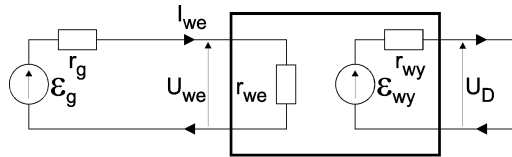
W ten sposób znaleźliśmy związek między napięciami U_A oraz U_B . Na podstawie wzoru (12) można wyznaczyć wartość impedancji wyjściowej rozważanego czwórnika:

$$r_{wy} = R_L \frac{U_A - U_B}{U_B} . \quad (13)$$

W celu oszacowania impedancji wejściowej r_{we} , przy ustalonej SEM ε_g na generatorze o impedancji wyjściowej r_g , należy dokonać pomiarów napięć wyjściowych U_C i U_D w dwu przypadkach: z dodatkowym szeregowym rezystorem na wejściu czwórnika ($R_S \neq 0$; rys. 8, pomiar napięcia U_C) oraz bez dodatkowego szeregowego rezystora na wejściu czwórnika ($R_S = 0$; rys. 9, pomiar napięcia U_D).



Rys. 8. Schemat układu do pomiaru napięcia wyjściowego U_C



Rys. 9. Schemat układu do pomiaru napięcia wyjściowego U_D

Przeprowadzając następujące rozumowanie dla układu z rys. 8:

$$\varepsilon_g = I_{we}^* (r_g + R_S + r_{we}) \quad (14)$$

$$U_C = k_U U_{we}^* \quad (15a)$$

$$U_C = k_U I_{we}^* r_{we} \quad (15b)$$

oraz analogiczne rozumowanie dla układu z rys. 9:

$$\varepsilon_g = I_{we} (r_g + r_{we}) \quad (16)$$

$$U_D = k_U U_{we} \quad (17a)$$

$$U_D = k_U I_{we} r_{we} , \quad (17b)$$

a następnie porównując (15b) i (17b) można pokazać (zakładając że współczynnik wzmocnienia napięciowego k_U jest stały w obu przypadkach pokazanych na rys. 8 i rys. 9), że napięcia U_C oraz U_D są ze sobą związane zależnością:

$$\frac{U_C}{U_D} = \frac{I_{we}^*}{I_{we}} , \quad (18)$$

dzieląc stronami (14) i (16) dostajemy:

$$\frac{I_{we}^*}{I_{we}} = \frac{r_g + r_{we}}{r_g + R_S + r_{we}} , \quad (19)$$

podstawiając (19) do (18) otrzymujemy:

$$\frac{U_C}{U_D} (r_g + R_S + r_{we}) = r_g + r_{we} , \quad (20)$$

po przekształceniach (20) mamy:

$$\frac{U_C}{U_D} (r_g + R_S) - r_g = r_{we} \left(1 - \frac{U_C}{U_D} \right) , \quad (21)$$

stąd łatwo już wyznaczyć poszukiwaną impedancję wejściową czwórnika:

$$r_{we} = \frac{R_S U_C - r_g (U_D - U_C)}{U_D - U_C} , \quad (22)$$

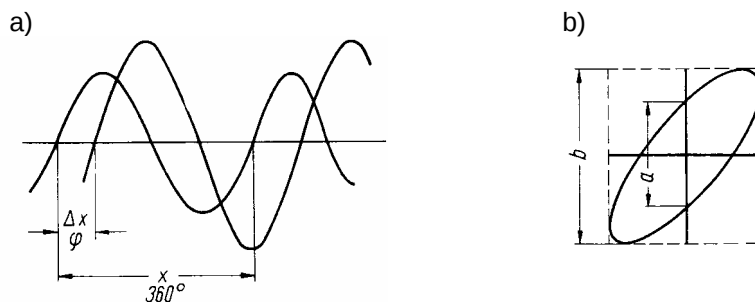
czyli ostatecznie po przekształceniu (22) otrzymujemy:

$$r_{we} = R_S \frac{U_C}{U_D - U_C} - r_g . \quad (23)$$

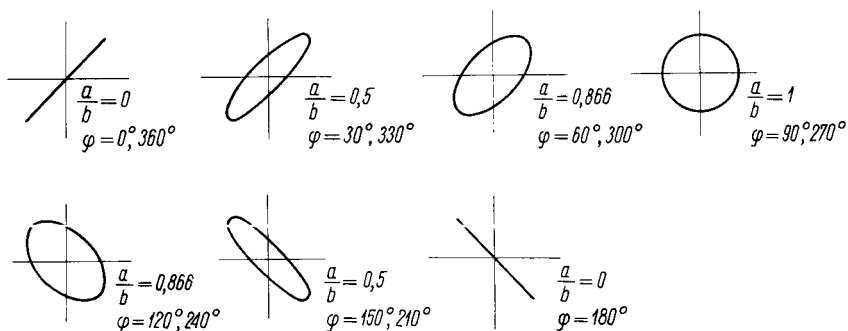
Najprostszą metodą pomiaru przesunięcia fazowego między dwoma sygnałami sinusoidalnymi jest porównanie ich przebiegów na ekranie oscyloskopu dwukanałowego. Przy pomiarze należy pamiętać o tym, że poziome osie zerowe obu przebiegów muszą się pokrywać tak jak pokazano na rys. 10a. Przesunięcie fazowe oblicza się ze wzoru:

$$\varphi = 360^\circ \frac{\Delta x}{x} , \quad (24)$$

przy czym: Δx – mierzony w działkach odstęp między dwoma przebiegami na przecięciu z osią zerową (rys. 10a); x – mierzona w działkach długość odpowiadająca pełnemu okresowi przebiegu sinusoidy. Za pomocą pokręteł płynnej regulacji wzmacnienia (9)/(21) – rys. 1 – ustalamy wysokość obu przebiegów na jednakową wartość 5 działek. Podstawę czasu dobieramy pokrętłami (29)/(30) – rys. 1 – tak, aby jeden okres przebiegu zajął ok. 75% szerokości ekranu oscyloskopu.



Rys. 10. Idea pomiaru przesunięcia fazowego (a) w trybie pracy dwukanałowej i (b) w trybie pracy X-Y oscyloskopu



Rys. 11. Przykładowe przebiegi zarejestrowane w trybie pracy X-Y oscyloskopu i odpowiadające im wartości przesunięć fazowych

Drugą bardzo popularną metodą pomiaru przesunięcia fazowego jest pomiar parametrów figury Lissajous (rys. 10b) uzyskanej na ekranie oscyloskopu pracującego w trybie X-Y. Na rys. 11 pokazane zostały figury uzyskane na ekranie, gdy do wejść X i Y oscyloskopu doprowadzono sygnały sinusoidalne o tej samej częstotliwości, ale przesunięte w fazie o pewien kąt fazowy φ . Amplitudy badanych przebiegów mogą być różne i nie mają wpływu na wynik pomiaru, wygodnie jest jednak stosować amplitudy o zbliżonych wartościach, przez co w pełni wykorzystuje się pole ekranu oscyloskopu. Z pomiaru parametrów elipsy uzyskanej dla dwu przebiegów sinusoidalnych o tej samej częstotliwości możemy obliczyć przesunięcie fazowe. W tym celu korzystamy z następującego wzoru:

$$\varphi = \arcsin \frac{a}{b} . \quad (25)$$

Wielkości występujące we wzorze (25) są zdefiniowane na rys. 10b. Należy pamiętać, że opisana metoda pomiarów parametrów elipsy jest mało precyzyjna w przypadku analizy przesunięć fazowych mniejszych niż 10° .

Kolejność czynności

1. Wykorzystując wszystkie dostępne zakresy omomierza multimetru dokonać pomiaru rezystancji opornika wzorcowego. Pomiary rozpocząć od największego zakresu. Na podstawie danych zawartych w instrukcji obsługi multimetru oraz wskazówek z punktu A9 aneksu do niniejszej instrukcji podać odpowiednie wzory i obliczyć błąd pomiaru rezystancji na każdym z zakresów. Po wykonaniu rachunków ustalić, na którym zakresie omomierza wykonane pomiary są najdokładniejsze.
2. W szereg z **amperomierzem** multimetru włączyć opornik obciążenia (rezystor zamocowany na radiatorze) i taki układ podłączyć do regulowanego wyjścia sekcji MASTER zasilacza (gniazdo czarne i czerwone). Narysować schemat badanego układu. Na amperomierzu wybrać zakres 200mA DC. Pokrętkę regulacji ograniczenia prądowego w zasilaczu (CURRENT) ustawić w położeniu odpowiadającym połowie zakresu regulacji (w przypadku wątpliwości poprosić prowadzącego zajęcia o sprawdzenie). Pokrętkę regulacji napięcia (VOLTAGE) ustawić w lewym skrajnym położeniu. Włączyć zasilacz i pokrętką regulacji napięcia ustawić napięcie 28V posilkując się woltomierzem wbudowanym w zasilacz. Pokrętką regulacji ograniczenia prądowego stopniowo zmniejszać natężenie prądu płynącego przez rezystor obciążenia odczytując wartość tego natężenia z amperomierza multimetru (zauważyć, że od pewnego momentu zaczną również maleć wartości napięcia zasilacza). Ustawić wartość ograniczenia prądowego na ok. 150mA (ze względu na niską jakość potencjometru w zasilaczu ustawienie dokładnej wartości może być utrudnione). Zanotować ustaloną wartość natężenia prądu odczytaną z multimetru oraz odpowiadające mu napięcie odczytane z woltomierza zasilacza. Powtórzyć pomiar dla ograniczenia prądowego ok. 100mA. Wyłączyć zasilacz i rozmontować badany układ. Przy pomocy omomierza zmierzyć rezystancję opornika obciążenia. Porównać wartości napięć odczytanych z zasilacza (odpowiadających dwu ustalonym wartościom ograniczenia prądowego) z wartościami napięć wyliczonymi na podstawie prawa Ohma zastosowanego do badanego układu (czyli dla znanego natężenia prądu płynącego przez opór obciążenia o znanej rezystancji). Wyjaśnić dlaczego ustawienie pokrętki regulacji ograniczenia prądowego w lewym skrajnym położeniu uniemożliwia regulację napięcia zasilacza (można to sprawdzić doświadczalnie przystępując do wykonania kolejnego punktu ćwiczenia).
3. Ustawić określone napięcia na regulowanych wyjściach zasilacza korzystając z **woltomierzy** napięcia stałego w multimetrach. Zwrócić szczególną uwagę na właściwy dobór zakresu woltomierzy. Ustawienia wykonać dla trzech różnych trybów pracy sekcji MASTER i SLAVE zasilacza. Dla sekcji pracujących niezależnie ustawić napięcia: 5V (MASTER) i 10V (SLAVE). Dla sekcji połączonych szeregowo ustawić symetryczne napięcie $\pm 15V$ z „zerem na masie”. Dla sekcji połączonych równolegle ustawić napięcie 18V. Na podstawie instrukcji do multimetru i wskazówek z punktu A9 aneksu do niniejszej instrukcji obliczyć błędy pomiarów napięć.
4. W szereg z woltomierzem włączyć rezystor wzorcowy (wykorzystując zaciski I_1 oraz I_2) i taki układ podłączyć do regulowanego wyjścia sekcji MASTER zasilacza. Na woltomierzu wybrać zakres 20V DC. Włączyć zasilacz i ustawić napięcie 10V. Przy pomocy drugiego woltomierza dokonać pomiaru spadku napięcia na zaciskach U_1 i U_2 rezystora wzorcowego. Narysować schemat badanego układu. Na podstawie schematu wyprowadzić wzór na impedancję wejściową woltomierza połączanego szeregowo z rezystorem wzorcowym. Korzystając z wyprowadzonego wzoru oraz na podstawie wskazań woltomierzy i odczytanej z rezystora wzorcowego wartości rezystancji wyznaczyć wartość impedancji wejściowej woltomierza. Wyprowadzić wzór na błąd pomiaru impedancji wejściowej woltomierza i wykonać odpowiednie rachunki liczbowe.
5. Połączyć generator funkcyjny z wejściem (8) CH1 oscyloskopu. Przed rozpoczęciem właściwych pomiarów sprawdzić, czy sprzężenie wejścia (10) jest ustawione na DC. Amplitudę sygnału ustawić w generatorze na wartość $U_m = 3V$. Sprawdzić czy zmiana częstotliwości i kształtu generowanego sygnału wpływa na wartość amplitudy przebiegu obserwowanego na ekranie oscyloskopu. Częstotliwość zmieniać w przedziale od 1Hz do 2MHz. Dla dwóch rodzajów generowanego sygnału (sinus, prostokąt) wyznaczyć częstotliwość minimalną i maksymalną, czyli zakres częstotliwości, w którym amplituda nie ulega zmianie.

6. Połączyć generator funkcyjny z wejściem (8) CH1 oscyloskopu. Przy pomocy generatora ustawić przebieg sinusoidalny o amplitudzie 8V i częstotliwości 1kHz. Sprawdzić, jakie zmiany amplitudy wywołuje użycie tłumika wyjściowego generatora. Pomiary wykonać dla tłumienia 0dB, 20dB, 40dB, 60dB. Na podstawie przebiegów obserwowanych na ekranie oscyloskopu narysować cztery oscylogramy z zaznaczeniem wartości tłumienia oraz nastaw oscyloskopu. Otrzymane wyniki porównać z przewidywaniami teoretycznymi – patrz punkt A3 aneksu do niniejszej instrukcji.
7. Połączyć generator funkcyjny z wejściem (20) CH2 oscyloskopu. Ustawić następujące parametry generatora: kształt przebiegu – prostokąt, amplituda $U_m = 2V$, częstotliwość $\nu = 1kHz$, współczynnik wypełnienia $W\% = 50\%$ (p.A4 aneksu) i składowa stała $U_{DC} = 1V$ (p.A1 aneksu). Ustawić stabilny obraz na ekranie oscyloskopu. Parametry nastaw oscyloskopu dobrać w taki sposób, aby uzyskać możliwie najlepszą dokładność pomiaru, co zapewnia największy rozmiar obrazu umożliwiający wykonanie pomiaru. Wykonać odpowiedni oscylogram. Nanieść na oscylogram parametry nastaw oscyloskopu. Zaznaczyć na oscylogramie wielkości takie jak: napięcie międzyszczytowe, amplituda, okres oraz poziom odniesienia i składowa stała.
8. Połączyć generator funkcyjny z wejściem (20) CH2 oscyloskopu. Ustawić następujące parametry generatora: kształt przebiegu – trójkąt, amplituda $U_m = 0,2V$, częstotliwość $\nu = 5kHz$ i składowa stała $U_{DC} = 0V$. Doprowadzić do otrzymania stabilnego obrazu na ekranie oscyloskopu. Uzyskać możliwie najlepszą dokładność pomiaru, co zapewnia największy rozmiar obrazu umożliwiający wykonanie pomiaru. Wykonać odpowiedni oscylogram. Nanieść na oscylogram parametry nastaw oscyloskopu. Zaznaczyć na oscylogramie wielkości takie jak: napięcie międzyszczytowe, amplituda oraz okres.
9. Połączyć generator funkcyjny z wejściem (20) CH2 oscyloskopu. Na generatorze ustawić przebieg sinusoidalny o częstotliwości 50Hz. Przełącznikiem oscyloskopu (23) wybrać tryb LINE. Korygować częstotliwość generatora do momentu uzyskania nieruchomego obrazu (brak samoczynnego przesuwu w lewo bądź w prawo). Oszacować błąd wskazań częstotliwości na wyświetlaczu generatora przyjmując za wzorcową częstotliwość sieci zasilającej równą 50Hz.
10. Połączyć generator funkcyjny z oscyloskopem. Wybrać sinusoidalny kształt przebiegu wyjściowego z generatora. Ustawić amplitudę sygnału na 6V oraz jego częstotliwość na 5kHz. Uzyskać stabilny obraz przebiegu na ekranie oscyloskopu. Pokrętem przesuwu poziomego (32) przesunąć obraz na ekranie w prawo w taki sposób, aby widoczny był początek obrazu (jego lewa krawędź). Pokrętem (28) LEVEL zmieniać poziom wyzwalania i obserwować wpływ tych zmian na obraz oscyloskopowy. Porównać obrazy uzyskane przy wyzwalaniu zboczem dodatnim i ujemnym wybieranym przełącznikiem (26) SLOPE. Wykonać oscylogramy wraz z opisem nastaw oscyloskopu dla czterech przebiegów (wyzwalanie zboczem dodatnim dla dwu poziomów wyzwalania +3V oraz -3V oraz wyzwalanie zboczem ujemnym dla dwu poziomów wyzwalania +3V oraz -3V).
11. Połączyć generator funkcyjny z oscyloskopem i woltomierzem napięcia zmiennego (zastosować trójkąt rozdzielający sygnał z wyjścia generatora). Przy pomocy multimetru zmierzyć wartości skuteczne napięcia o przebiegu sinusoidalnym i prostokątnym dla pięciu zadanych częstotliwości: 50Hz, 500Hz, 5kHz, 50kHz i 500kHz. Na podstawie przebiegów obserwowanych równolegle na ekranie oscyloskopu wykonać pięć odpowiednich oscylogramów. Nanieść na oscylogramy parametry nastaw oscyloskopu. Dokonać porównania wartości skutecznych odczytanych z multimetru z wartościami wyznaczonymi na podstawie wykonanych oscylogramów oraz wzoru (1) – patrz również punkt A2 aneksu do niniejszej instrukcji. Wykonać rachunek błędów zarówno dla pomiarów przeprowadzonych przy użyciu multimetru jak i oscyloskopu. We wnioskach należy przeprowadzić krytyczną analizę otrzymanych wyników w oparciu o uwagi wymienione pod wzorem (1) oraz w oparciu o wskazówki zawarte w instrukcji do multimetru. W instrukcji obsługi multimetru należy sprawdzić, dla jakiego rodzaju sygnałów i w jakim zakresie częstotliwości producent miernika dopuszcza przeprowadzanie rzetelnych pomiarów wartości skutecznych.
12. Połączyć oscyloskop i generator funkcyjny z czwórnikiem (poprosić dyżurnego technika o wypożyczenie odpowiedniego czwórnika). Korzystając z multimetru i/lub oscyloskopu dokonać pomiarów napięć U_A , U_B , U_C oraz U_D w układach pokazanych na rysunkach od 6 do 9. Następnie przy pomocy multimetru odczytać z czwórnika i zanotować wartości R_L oraz R_S . Wartość r_g przyjąć równą 50Ω . Korzystając z wzorów (13) i (23) wykonać odpowiednie rachunki i oszacować impedancję wejściową i wyjściową badanego czwórnika.
13. Połączyć generator funkcyjny z dwoma wejściami (8)/(20) X i Y oscyloskopu (zastosować trójkąt rozdzielający sygnał z wyjścia generatora). Na generatorze ustawić przebieg sinusoidalny o częstotliwości 1kHz. Wybrać tryb pracy X-Y oscyloskopu – przełącznik (29). Poprzez regulację wzmocnienia w torach X i Y doprowadzić do uzyskania na ekranie oscyloskopu linii prostej nachylonej pod kątem 45° do poziomu. Zmieniać częstotliwość generatora i obserwować wpływ tych zmian na obraz oscyloskopowy. Wyznaczyć częstotliwość graniczną, przy której zaczyna występować niepożądane przesunięcie fazowe w torach pomiarowych X i Y oscyloskopu, objawiające się przekształceniem obserwowanej na ekranie oscyloskopu linii w elipsę.

Opracowanie sprawozdania

Sprawozdanie powinno zawierać:

1. Stronę tytułową (wg wzoru).
2. Sformułowanie celu ćwiczenia.
3. Schematy układów pomiarowych.
4. Wykaz aparatury (nr inwentarzowy, typ, wykorzystywane nastawy i zakresy).
5. Wyniki pomiarów oraz analizę wyników i wnioski odnoszące się do pierwszego punktu części „Kolejność czynności”).
6. Wyniki pomiarów (oscyllogramy i stabelaryzowane wyniki) oraz analizę wyników (analiza oscyllogramów, obliczenia wartości skutecznych, rachunek błędów itp.) i wnioski odnoszące się do każdego kolejnego punktu części „Kolejność czynności”.
7. Uwagi końcowe i wnioski odnoszące się do całego sprawozdania.

Wstęp do sprawozdania powinien zawierać definicje podstawowych pojęć występujących w sprawozdaniu. W celu łatwiejszego i jednoznacznego odwoływania się do wzorów występujących we wstępie jak i w dalszej części sprawozdania wszystkie z nich powinny być opatrzone numerami porządkowymi.

W sprawozdaniu należy umieścić schematy tylko takich układów, które były rzeczywiście zestawiane w trakcie wykonywania pomiarów. Każdy schemat powinien być zatytułowany i opatrzony numerem kolejnym. Wszystkie elementy pokazane na schemacie muszą być jednoznacznie opisane i oznaczone za pomocą powszechnie stosowanej symboliki.

W wykazie aparatury należy jednoznacznie opisać używaną aparaturę pomiarową poprzez podanie numeru inwentarzowego, typu itd. Nadane poszczególnym przyrządom oznaczenia należy konsekwentnie stosować na wszystkich schematach i w opisach.

Każdemu punktowi części „Kolejność czynności” niniejszej instrukcji powinien odpowiadać pewien fragment sprawozdania składający się z zestawionych wyników pomiarów, po których następuje ich analiza zakończona podsumowaniem i wnioskami cząstkowymi zawierającymi ocenę dokładności pomiarów. Po takim fragmencie powinien następować fragment odpowiadający kolejnemu punktowi części „Kolejność czynności” itd. Jako wyniki pomiarów należy zamieścić oscyllogramy oraz tabele ze zmierzonymi i obliczonymi wartościami badanych wielkości, łącznie z wartościami wyznaczonych błędów pomiarowych. Każda tabela powinna posiadać swój numer kolejny i tytuł oraz wyraźne oznaczenie, co zostało zmierzone, a co obliczone. Wszystkie oscyllogramy w sprawozdaniu powinny mieć numery porządkowe oraz podpisy zawierające informację o tym, co dany oscyllogram przedstawia.

W uwagach końcowych należy zamieścić własne spostrzeżenia, co do przebiegu całego ćwiczenia. Ważną częścią wniosków końcowych powinno być także wyszczególnienie czynności i procedur pomiarowych, które należałoby przeprowadzić inaczej (jak?), gdyby ćwiczenie miało zostać powtórzone.

Literatura

- [1] F. Przedziecki, A. Opolski, *Elektrotechnika i elektronika*, PWN, Warszawa, 1986.
- [2] M. Krakowski, *Elektrotechnika teoretyczna*, PWN, Warszawa, 1983.
- [3] B. B. Oliver, J. M. Cage, *Pomiary i przyrządy elektroniczne*, WKŁ, Warszawa, 1978.
- [4] B. Żółtowski, *Wprowadzenie do zajęć laboratoryjnych z fizyki*, Skrypt PŁ, Łódź, 2001.
- [5] J. Rydzewski, *Pomiary oscyloskopowe*, WNT, Warszawa, 1994.
- [6] Instrukcje obsługi oscyloskopu, zasilacza, generatora funkcyjnego oraz multimetrów.

A1. Pojęcia podstawowe

W celu uniknięcia nieporozumień podczas wykonywania ćwiczeń w pracowni należy zrozumieć, zapamiętać i stosować wymienione poniżej trzy podstawowe zasady:

Pierwsza zasada.

Pamiętajmy, że podając konkretne mianowane wartości fizycznych wielkości elektrycznych unikamy niejednoznaczności.

Starajmy się zatem unikać określeń w rodzaju: mniejsze napięcie, większy prąd, różne potencjały. Są to ogólniki, które niewiele mówią a często wprowadzają nawet w błąd. Przy rozpatrywaniu każdego obwodu elektrycznego musimy precyzyjnie i jednoznacznie określać: wartość natężenia prądu płynącego w obwodzie, oporność obwodu lub jego poszczególnych odcinków, napięcie źródła zasilania, napięcia w różnych punktach układu, moc wydzielaną na obciążeniu i wiele innych konkretnych wartości. Do precyzyjnego wyrażenia wartości wielkości elektrycznych służą liczby, natomiast do jednoznacznego wyrażenia wielkości elektrycznych służą jednostki główne: amper [A], volt [V], om [Ω], wat [W], farad [F], henr [H] i herc [Hz], wraz z pokrewnymi. Często jednostka główna jest zbyt duża (lub zbyt mała) dla wyrażenia pewnej wielkości. Z tego powodu wprowadza się jednostki pokrewne, które są wielokrotnościami 10^n jednostki głównej, przy czym n jest liczbą całkowitą (dodatnią lub ujemną). Jeśli n jest dodatnie to jednostkę pokrewną nazywamy wielokrotną, a jeśli n jest ujemne to jednostkę pokrewną nazywamy podwielokrotną. Nazwę jednostki pokrewnej tworzymy przez dodanie odpowiedniego przedrostka, zależnego od wartości 10^n .

PRZEDROSTKI JEDNOSTEK POKREWNYCH

10^n	przedrostek	skrót	10^n	przedrostek	skrót
10^3	kilo	k	10^{-3}	mili	m
10^6	mega	M	10^{-6}	mikro	μ
10^9	giga	G	10^{-9}	nano	n
			10^{-12}	piko	p

Przykładowo:

$$1 \text{ kiloom} = 1 \text{ k}\Omega = 10^3 \Omega$$

$$1 \text{ megaherc} = 1 \text{ MHz} = 10^6 \text{ Hz}$$

$$1 \text{ miliamper} = 1 \text{ mA} = 10^{-3} \text{ A}$$

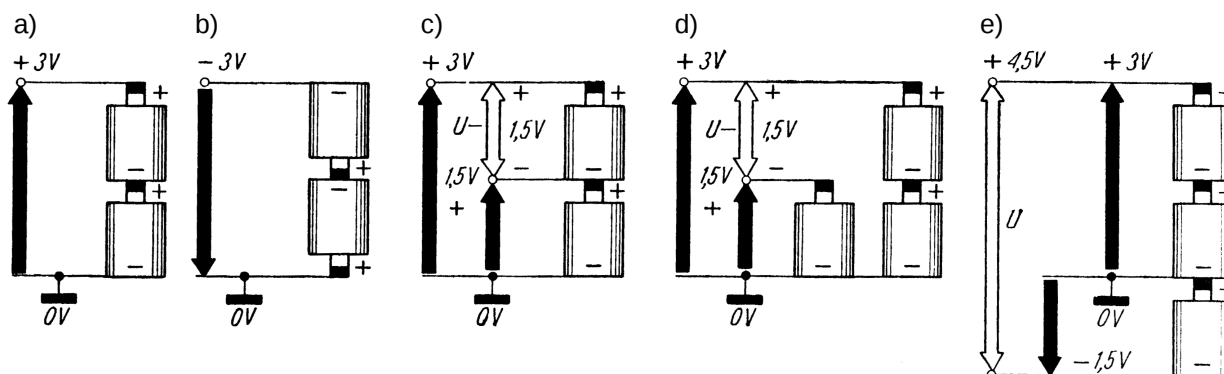
$$1 \text{ mikrowolt} = 1 \mu\text{V} = 10^{-6} \text{ V}$$

$$1 \text{ pikofarad} = 1 \text{ pF} = 10^{-12} \text{ F}$$

Druga zasada.

Pamiętajmy, że w elektronice wiele pojęć jest albo umownych albo względnych.

Początki „umowności” sięgają XVIII w. kiedy to Benjamin Franklin (1706 – 1790) wprowadził terminy „ładunek” i „bateria” oraz symbole „plus” i „minus”. Wybór znaków biegunów baterii niestety nie był udany, gdyż stał się podstawą utrzymywanej do dziś umowy, że prąd elektryczny płynie „od plusa do minusa”. Ta umowność pozostała z czasów, gdy nie znano jeszcze elektronów, a już ustalono podstawowe prawa elektrotechniki. Tymczasem obecnie wiemy, że nośnikami ładunku prądu elektrycznego w metalach są ujemnie naładowane elektrony, które poruszają się od ujemnego do dodatniego bieguna baterii. Umowy tej nie zmieniono, ponieważ bez względu na to, czy prąd w obwodzie płynie „od plusa do minusa”, czy „od minusa do plusa”, to i tak bieguny źródła prądu mogą pozostać na schemacie bez zmiany.



Rys. A1.1. „Względność” potencjałów elektrycznych: (a) potencjał dodatni (+3V) względem masy ($\perp$) – „minus” na masie; (b) potencjał ujemny (-3V) względem masy – „plus” na masie; (c) dwa potencjały dodatnie względem masy oraz różnica potencjałów $U = 1,5\text{V}$; (d) to samo co na rys. (c), lecz z dodatkowym ogniwem 1,5V; (e) potencjał dodatni (+3V) i ujemny (-1,5V) względem masy – „zero” na masie – oraz różnica potencjałów $U = 4,5\text{V}$

„Względność” można wyjaśnić na prostym przykładzie. Spośród kilku różnych potencjałów dodatnich na przykład +3V, +5V i +8V, potencjał +5V jest dodatni względem potencjału +3V, ale jednocześnie ujemny względem potencjału +8V. Jak w tej sytuacji można jednoznacznie określić czy potencjał elektryczny jakiegoś elementu jest dodatni czy ujemny? W tym celu wprowadzono umowny stan odniesienia – tzw. potencjał zerowy. Zgodnie z umową potencjał zerowy ma powierzchnia kuli ziemskiej. Ponieważ we współczesnej elektronice rzeczywiste połączenie urządzenia z ziemią stosuje się tylko wyjątkowo, przyjęto umownie że punkt „masy” ($\perp$) układu stanowi punkt potencjału zerowego, względem którego mierzymy wszystkie pozostałe potencjały (napięcia). W praktyce w pracowni spotkamy się z tym, że raz będziemy mieli do czynienia z trzema rodzajami potencjałów (dodatnim, zerowym i ujemnym), a drugi raz – tylko z dwoma (dodatnim i ujemnym). W pierwszym przypadku mówimy, że potencjał zerowy połączony jest z masą układu lub krótko, że „zero jest na masie”. W drugim przypadku potencjał zerowy będzie najczęściej utożsamiany z potencjałem ujemnym – mówimy wtedy, że potencjał ujemny połączony jest z masą układu lub krótko, że „minus jest na masie”.

Trzecia zasada.

Pamiętajmy, że poprawne działanie układu elektronicznego wymaga właściwego zasilania tego układu.

Zasada ta wynika z faktu, że podstawą działania wszystkich układów elektronicznych jest przepływ nośników prądu elektrycznego przez cewki, kondensatory, rezystory oraz przyrządy półprzewodnikowe.

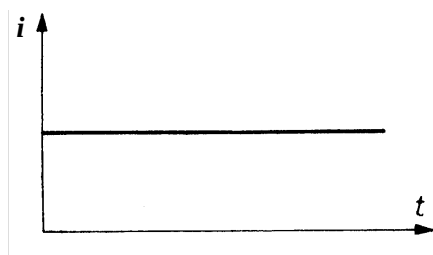
Rysunek składający się z szeregu połączonych ze sobą powszechnie przyjętych symboli graficznych, oznaczających poszczególne elementy elektryczne i elektroniczne nazywa się schematem elektrycznym. Schemat elektryczny, który obrazuje zasadę działania (ideę) układu lub urządzenia, nazywa się schematem ideowym, a schemat pokazujący, jak dane urządzenie jest wykonane (zmontowane) – schematem montażowym. Istnieje jeszcze trzeci rodzaj schematu, który nazywa się schematem blokowym. Pokazuje on, z jakich zasadniczych członów (bloków) składa się interesujące nas urządzenie. Schemat blokowy jest jakby streszczeniem schematu ideowego i stosuje się go przeważnie przy opisie bardziej złożonych układów i urządzeń. W pracowni wykorzystywane są głównie schematy ideowe i blokowe.

Sygnały, z którymi mamy do czynienia przy analizie schematów elektrycznych mogą być różnymi wielkościami fizycznymi zależnymi od czasu, jak na przykład natężenia prądów, napięcia, moce itp.

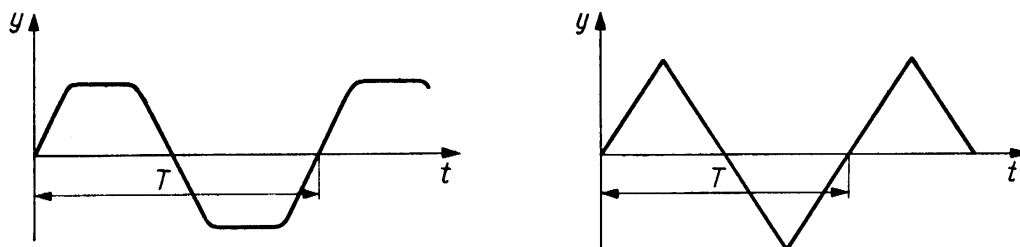
Dla ułatwienia rozpatrywania schematów ideowych stosuje się pewne zasady rysowania schematów. Tak więc, wszystkie obwody napięcia zasilającego rysuje się z reguły w górnej części schematu. Nieco niżej umieszcza się symbole elementów elektronicznych, zaś w dolnej części schematu – wspólną masę lub obwody drugiego bieguna zasilania. Na schematach ideowych i blokowych sygnał wejściowy „przechodzi” zazwyczaj od lewej strony rysunku do prawej. Elementy robocze stopnia (członu) wejściowego badanego układu (takie jak np. multimetr, oscyloskop, generator funkcji czy zadajnik stanów logicznych) umieszcza się z lewej strony. Elementy robocze stopnia (członu) wyjściowego analizowanego układu (takie jak np. multimetr, oscyloskop czy wskaźnik stanów logicznych) umieszcza się z prawej strony. Elementy odnoszące się do tego samego stopnia rysuje się obok siebie w pionie lub poziomie. Układy mostkowe (np. mostek Graetza) przedstawia się w postaci rombu. I tak dalej.

Każde, nawet najbardziej skomplikowane urządzenie elektroniczne można zawsze rozpatrywać jako zespół stosunkowo prostych układów lub obwodów. Te układy i obwody zostały na przestrzeni wielu lat bardzo starannie i wnikliwie zbadane i na tej podstawie sformułowano wiele praw rządzących przepływem sygnałów elektrycznych. Dlatego właśnie każde urządzenie może być rozpatrywane jako zespół względnie prostych obwodów stanowiących poszczególne stopnie (człony) urządzenia. Każdy schemat ideowy rozpatruje się stopniowo, kolejno od lewej do prawej. Analizę schematu zaczynamy od wyróżnienia poszczególnych stopni. Głównym elementem każdego stopnia jest najczęściej przyrząd półprzewodnikowy, np. tranzystor lub wzmacniacz operacyjny. Następnie oglądamy wszystkie części (rezystory, kondensatory, cewki) otaczające element główny, śledzimy drogę prądów przez nie płynących i staramy się ustalić drogę sygnału elektrycznego przepływającego od wejścia do wyjścia układu i w ten sposób określamy przeznaczenie danego stopnia (członu) analizowanego układu.

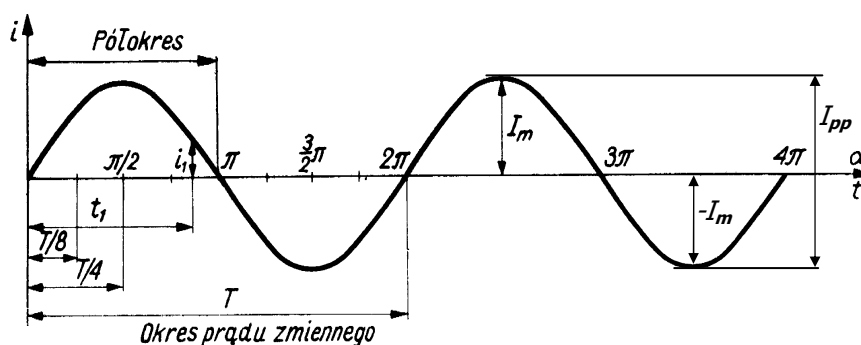
Prądy i napięcia stałe, niezależne od czasu, oznaczamy dużymi literami I oraz U. Natężenie prądu i oraz napięcie u są w ogólnym przypadku funkcjami czasu. Funkcje czasu $i = i(t)$ oraz $u = u(t)$ nazywamy wartościami chwilowymi odpowiednio prądu i napięcia. Wartości chwilowe oznacza się małymi literami. Przykładowo (patrz rys. A1.2) w chwili t_1 natężenie prądu ma wartość chwilową $i(t_1) = i_1$, a w chwili $T/4$ wartość chwilowa przyjmuje największą możliwą wartość równą $i(T/4) = I_m$. Wartości chwilowe prądu i napięcia mogą przyjmować zarówno wartości dodatnie jak i ujemne. Każdy sygnał jest w pełni określony przez funkcję czasu opisującą daną wielkość fizyczną. Funkcję tę przedstawia się często w postaci graficznej, a wykres tego rodzaju nazywa się przebiegiem czasowym lub po prostu przebiegiem sygnału.



Rys. A1.2. Przebieg czasowy prądu stałego



Rys. A1.3. Przykładowe przebiegi czasowe sygnałów okresowych



Rys. A1.4. Przebieg czasowy prądu sinusoidalnie zmiennego

Sygnały (np. prądy i napięcia), których wartości zmieniają się w czasie dzielimy na okresowe i nieokresowe. Wielkości nazywamy okresowymi, gdy ich wartości powtarzają się w jednakowych odstępach czasu. Ten charakterystyczny odstęp czasu nazywamy okresem i oznaczamy symbolem T (rys. A1.3 i A1.4). Odstęp czasu liczony od momentu $t = 0$ i równy połowie okresu nazywamy półokresem. Przebieg wszystkich zmian zachodzących w czasie jednego okresu nazywamy cyklem. Liczbę cykli przypadających na jednostkę czasu nazywamy częstotliwością. Na rys. A1.4 przedstawiono przebieg prądu sinusoidalnie zmiennego opisanego funkcją czasu:

$$i(t) = I_m \sin\left(\frac{2\pi}{T} t\right). \quad (\text{A1.1})$$

Amplitudą (lub maksymalną wartością szczytową) nazywamy największą wartość, jaką może osiągnąć wartość chwilowa (na rys. A1.2 oraz w wyrażeniu A1.1 amplituda natężenia prądu wynosi I_m). Amplitudę oznaczamy dużą literą z indeksem m . Minimalną wartością szczytową nazywamy najmniejszą możliwą wartość jaką może osiągnąć wartość chwilowa (na rys. A1.4 $i(\frac{3}{4}T) = -I_m$). Różnicę między maksymalną i minimalną wartością szczytową nazywamy wartością międzyszczytową. W przypadku przebiegu natężenia prądu z rys. A1.4 wartość międzyszczytową oznaczamy symbolem I_{pp} (indeks pp pochodzi od ang. peak-to-peak), przy czym $I_{pp} = I_m - (-I_m) = 2I_m$. Wartość chwilową $y(t)$ sygnału sinusoidalnego o amplitudzie Y_m można przedstawić za pomocą ogólnego wyrażenia:

$$y(t) = Y_m \sin(\omega t + \phi_y). \quad (\text{A1.2})$$

W wyrażeniu tym argument funkcji sinus nazywamy fazą, ϕ_y – fazą początkową, a ω – pulsacją. Podstawiając do wzoru (A1.2) $t = 0$ stwierdzamy, że faza początkowa ϕ_y równa jest fazie i określa wartość y w chwili $t = 0$. Ponieważ po upływie okresu T następuje powtarzanie się wartości chwilowych, więc:

$$y(t) = Y_m \sin[\omega(t + T) + \varphi_y] = Y_m \sin[\omega t + \varphi_y] . \quad (\text{A1.3})$$

Uwzględniając fakt, że okresem funkcji sinusoidalnej jest 2π , otrzymujemy:

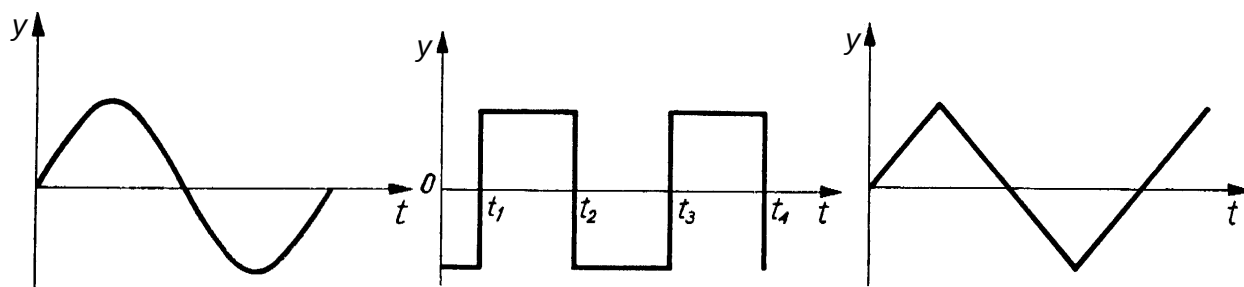
$$\omega T = 2\pi , \quad (\text{A1.4})$$

a stąd pulsacja

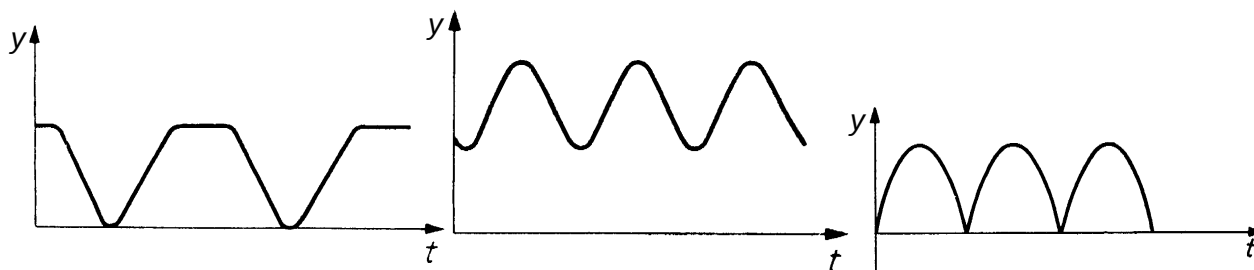
$$\omega = \frac{2\pi}{T} = 2\pi\nu , \quad (\text{A1.5})$$

przy czym symbolem $\nu = 1/T$ oznaczyliśmy częstotliwość.

Wielkości zmieniające się nieokresowo w funkcji czasu nazywamy nieokresowymi.

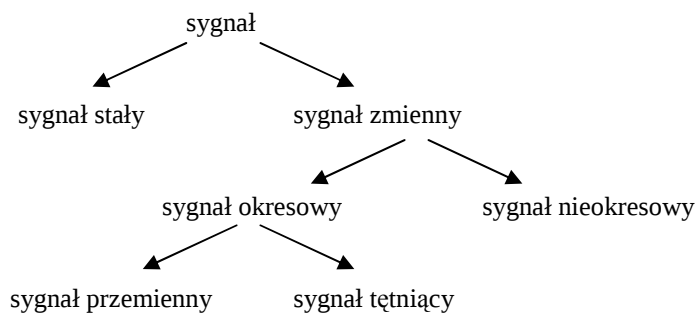


Rys. A1.5. Przykładowe przebiegi czasowe sygnałów przemiennych



Rys. A1.6. Przykładowe przebiegi czasowe sygnałów tętniących

Wielkości okresowe dzielimy na przemiennie oraz tętniące. Przemiennymi nazywamy wielkości okresowe, których wartość średnia w ciągu okresu równa się zero (patrz część A2). Przykładowe przebiegi sygnałów przemiennych są pokazane na rys. A1.5. Przebiegiem wielkości przemiennych jest krzywa oscylująca wokół osi odciętych (osi czasu). Tętniącymi nazywamy wielkości okresowe, których wartość średnia w ciągu okresu jest różna od zera. Przykładami przebiegów wielkości okresowych tętniących są krzywe oscylujące wokół prostej równoległej do osi odciętych (rys. A1.6). Podsumowując możemy stworzyć następujący schemat:



W dalszych rozważaniach przyjmujemy, że rozpatrywać będziemy okresową funkcję czasu $f(t)$ o okresie T , czyli $f(t + nT) = f(t)$, przy czym $n = \pm 1, \pm 2, \dots$; przyjmujemy również, że funkcja $f(t)$ spełnia następujące warunki (warunki Dirichleta):

1. Przedział czasu o długości T można podzielić na skończoną liczbę takich części, w których funkcja $f(t)$ jest monotoniczna, tzn. jest rosnąca, bądź też malejąca,
2. Funkcja $f(t)$ ma w przedziale czasu o długości T skończoną liczbę punktów nieciągłości, a ponadto jej wartość bezwzględna jest ograniczona w każdym punkcie tego przedziału czasu.

Niech $\omega = \frac{2\pi}{T}$ oznacza pulsację okresowej funkcji $f(t)$. Wtedy funkcję $f(t)$ można przedstawić w postaci szeregu:

$$f(t) = \frac{C_0}{2} + \sum_{z=1}^{\infty} [B_z \sin(z\omega t) + C_z \cos(z\omega t)] \quad (A1.6)$$

zwanego szeregiem Fouriera, przy czym:

$$B_z = \frac{2}{T} \int_{t_0}^{t_0+T} f(t) \sin(z\omega t) dt, \quad C_z = \frac{2}{T} \int_{t_0}^{t_0+T} f(t) \cos(z\omega t) dt. \quad (A1.7)$$

W powyższych wyrażeniach t_0 oznacza dowolną wartość czasu t . Współczynniki B_z oraz C_z są stałymi niezależnymi od t_0 . Zazwyczaj do obliczeń przyjmuje się $t_0 = 0$ lub $t_0 = -T/2$. W ten sposób otrzymuje się powszechnie stosowane wzory na współczynniki B_z i C_z :

$$B_z = \frac{2}{T} \int_0^T f(t) \sin(z\omega t) dt, \quad C_z = \frac{2}{T} \int_0^T f(t) \cos(z\omega t) dt \quad (A1.8)$$

lub

$$B_z = \frac{2}{T} \int_{-T/2}^{T/2} f(t) \sin(z\omega t) dt, \quad C_z = \frac{2}{T} \int_{-T/2}^{T/2} f(t) \cos(z\omega t) dt. \quad (A1.9)$$

Stałą C_0 obliczamy za pomocą wzoru na C_z , przyjmując $z = 0$. Łatwo zauważyć, że w przypadku sygnałów przemiennych $C_0 = 0$. Powyższe wzory (A1.8) i (A1.9) mają tę zaletę, że umożliwiają znalezienie współczynników szeregu Fouriera jedynie na podstawie znajomości postaci funkcji $f(t)$ oraz jej okresu T .

Wprowadzimy teraz trzy wielkości: A_{DC} (stała zależna od C_0), A_z (amplituda) oraz φ_z (faza początkowa) zdefiniowane następująco:

$$A_{DC} = \frac{C_0}{2}, \quad A_z = \sqrt{B_z^2 + C_z^2}, \quad \varphi_z = \arctg\left(\frac{C_z}{B_z}\right) \quad (A1.10)$$

wtedy:

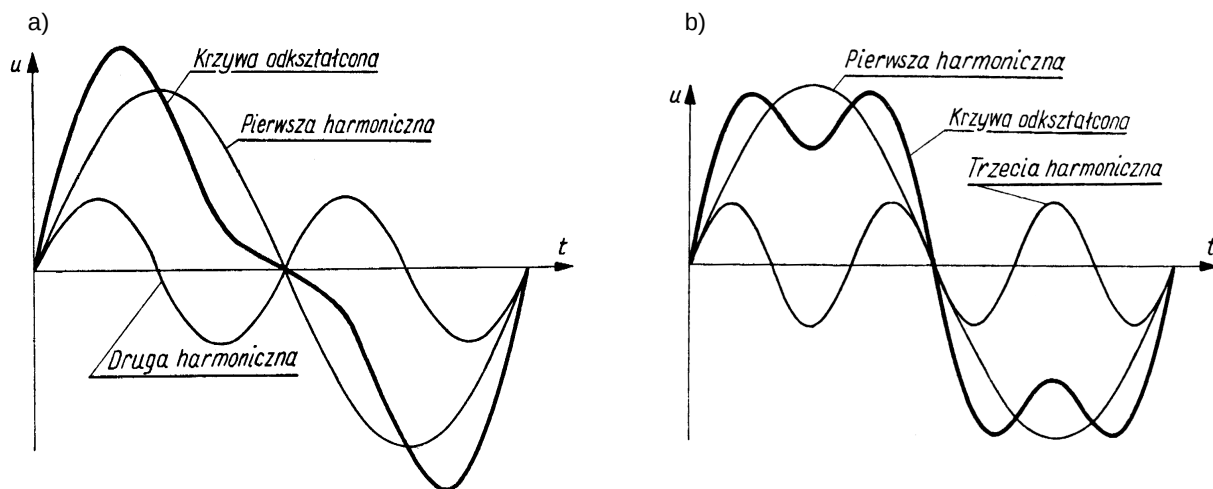
$$B_z = A_z \cos \varphi_z, \quad C_z = A_z \sin \varphi_z. \quad (A1.11)$$

Możemy zatem przedstawić szereg Fouriera (A1.6) w postaci następującej:

$$f(t) = A_{DC} + \sum_{z=1}^{\infty} A_z \sin(z\omega t + \varphi_z). \quad (A1.12)$$

Powyższe wyrażenie ma szczególnie prostą interpretację fizyczną: każdy sygnał okresowy spełniający warunki Dirichleta można przedstawić w postaci sumy wielkości stałej A_{DC} zwanej składową stałą oraz nieskończenie wielu sygnałów sinusoidalnych zwanych harmonicznymi. Sygnał sinusoidalny o najniższej ($z = 1$) wartości pulsacji nazywamy harmoniczną podstawową lub pierwszą harmoniczną. Harmoniczna podstawowa ma taką samą pulsację $\omega = 2\pi/T$, jak funkcja okresowa $f(t)$ o okresie T . Kolejne harmoniczne o pulsacjach $z\omega$, przy czym $z > 1$, nazywamy wyższymi harmonicznymi, a z oznacza rząd harmonicznego. Tak więc druga harmoniczna ($z = 2$) ma pulsację 2ω , trzecia harmoniczna ($z = 3$) ma pulsację 3ω itd., a ogólnie z -ta harmoniczna ma pulsację $z\omega$ (rys. A1.7). Rozwinięcie w szereg Fouriera zawiera teoretycznie nieskończenie wiele harmoniczych. W praktyce amplitudy

wyższych harmonicznych, których rząd jest wyższy od pewnej liczby z , są zazwyczaj pomijalnie małe, wobec czego można je zaniedbać. W związku z tym w szeregu Fouriera (A1.12) uwzględnia się najczęściej jedynie skończoną liczbę początkowych harmonicznych (patrz rys. A2.3 i A2.4 odpowiednio dla sygnału prostokątnego i trójkątnego).



Rys. A1.7. Krzywe odkształcone napięcia powstałe jako suma (a) pierwszej i drugiej harmonicznej oraz (b) pierwszej i trzeciej harmonicznej

A2. Wartości średnie i skuteczne

Wartość średnia A_{sr} funkcji okresowej $f(t)$ w ciągu okresu T zgodnie z definicją wyraża się wzorem:

$$A_{\text{sr}} = \frac{1}{T} \int_0^T f(t) dt. \quad (\text{A2.1})$$

Jeśli na podstawie podanego wcześniej wzoru (A1.8) wyznaczymy wartość C_z dla $z = 0$, to otrzymamy:

$$C_0 = \frac{2}{T} \int_0^T f(t) dt. \quad (\text{A2.2})$$

Jak łatwo zauważyć

$$A_{\text{sr}} = \frac{C_0}{2}, \quad \text{czyli na podstawie (A1.10) mamy: } A_{\text{sr}} = A_{\text{DC}}. \quad (\text{A2.3})$$

Stwierdzamy zatem, że wielkość stałą A_{DC} szeregu Fouriera (A1.12) można również obliczyć za pomocą wzoru (A2.1) na wartość średnią funkcji okresowej $f(t)$ w ciągu okresu T . Wartość średnia w ciągu okresu jest zatem równoważna wprowadzonemu wcześniej pojęciu składowej stałej. Wartość średnia w ciągu okresu T (składowa stała) dla sygnałów przemiennych jest równa zeru. W szczególności jeśli natężenie prądu zmiennego jest postaci $i(t) = I_m \sin(\omega t)$, to pamiętając, że:

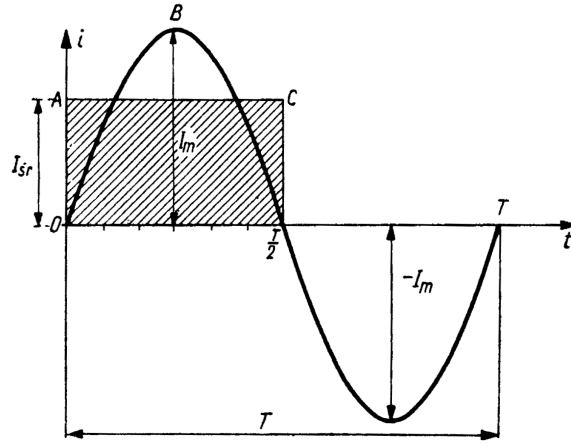
$$\omega = \frac{2\pi}{T} \quad \text{oraz} \quad \int_0^T \sin(\omega t) dt = -\frac{1}{\omega} \cos(\omega t) \Big|_0^T$$

można łatwo wykazać, że:

$$I_{\text{sr}} = \frac{1}{T} \int_0^T I_m \sin(\omega t) dt = \frac{I_m}{T} \int_0^T \sin\left(\frac{2\pi}{T} t\right) dt = -\frac{I_m}{T} \frac{T}{2\pi} \cos\left(\frac{2\pi}{T} t\right) \Big|_0^T = -\frac{I_m}{2\pi} + \frac{I_m}{2\pi} = 0. \quad (\text{A2.4})$$

Należy jednak zwrócić uwagę, że wartość średnia dla tego samego sygnału przemiennego liczona w ciągu innego przedziału czasu może być różna od zera. Przykładowo, wartość średnia w ciągu półokresu (rys. A2.1) będzie równa:

$$I_{sr} = \frac{2}{T} \int_0^{T/2} I_m \sin(\omega t) dt = \frac{2 I_m}{T} \int_0^{T/2} \sin\left(\frac{2\pi}{T} t\right) dt = -\frac{2 I_m}{T} \frac{T}{2\pi} \cos\left(\frac{2\pi}{T} t\right) \Big|_0^{T/2} = \frac{2}{\pi} I_m \approx 0,637 I_m. \quad (A2.5)$$



Rys. A2.1. Wartość średnia prądu przemiennego w ciągu półokresu

Wartość skuteczna A_{sk} sygnału okresowego $f(t)$ wyraża się wzorem:

$$A_{sk} = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T f^2(t) dt}. \quad (A2.6)$$

W celu wyjaśnienia sensu fizycznego pojęcia wartości skutecznej rozpatrzmy opornik idealny o rezystancji R , przez który przepływa prąd okresowy o wartości chwilowej i . Moc chwilowa p wydzielana w idealnym oporniku w postaci ciepła równa się $p(t) = Ri^2(t)$, a więc średnia moc w ciągu okresu wynosi:

$$P_{sr} = \frac{1}{T} \int_0^T p^2(t) dt = \frac{1}{T} \int_0^T Ri^2(t) dt = R \frac{1}{T} \int_0^T i^2(t) dt. \quad (A2.7)$$

Uwzględniając definicję (A2.6) wartości skutecznej A_{sk} otrzymujemy:

$$P_{sr} = RI_{sk}^2. \quad (A2.8)$$

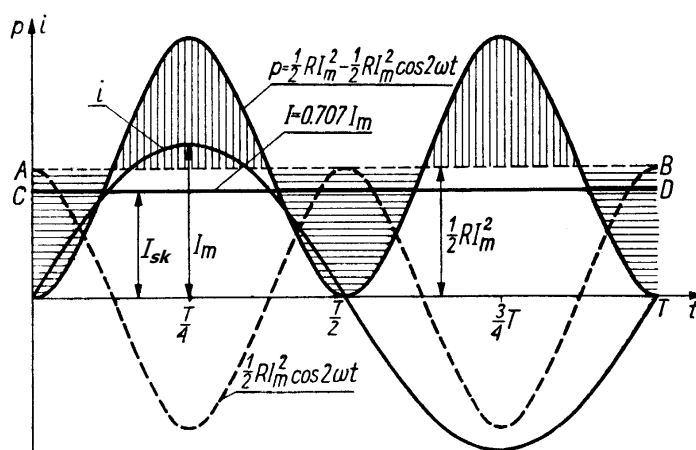
Zatem ilość ciepła Q wydzielonego w czasie równym okresowi T wynosi:

$$Q = RI_{sk}^2 T. \quad (A2.9)$$

W przypadku prądu stałego o natężeniu I ilość ciepła wydzieloną w oporniku R w czasie T można wyznaczyć jako:

$$Q = RI^2 T. \quad (A2.10)$$

Wobec tego jeśli $I_{sk} = I$, to skutek wywołany przez okresowy prąd zmienny o wartości skutecznej I_{sk} jest taki sam jak skutek wywołany przez prąd stały o natężeniu I . Inaczej mówiąc prąd stały o natężeniu równym wartości skutecznej okresowego prądu zmiennego wytwarza w oporniku w czasie równym okresowi T taką samą ilość ciepła, co okresowy prąd zmienny.



Rys. A2.2. Wartość skuteczna sinusoidalnego prądu przemiennego

Obliczmy teraz wartość skuteczną natężenia prądu sinusoidalnie przemiennego. Podstawiając $i(t) = I_m \sin(\omega t)$ do wzoru (A2.6) na wartość skuteczną, otrzymujemy:

$$I_{sk} = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T i^2(t) dt} = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T I_m^2 \sin^2(\omega t) dt} = I_m \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T \sin^2(\omega t) dt}. \quad (A2.11)$$

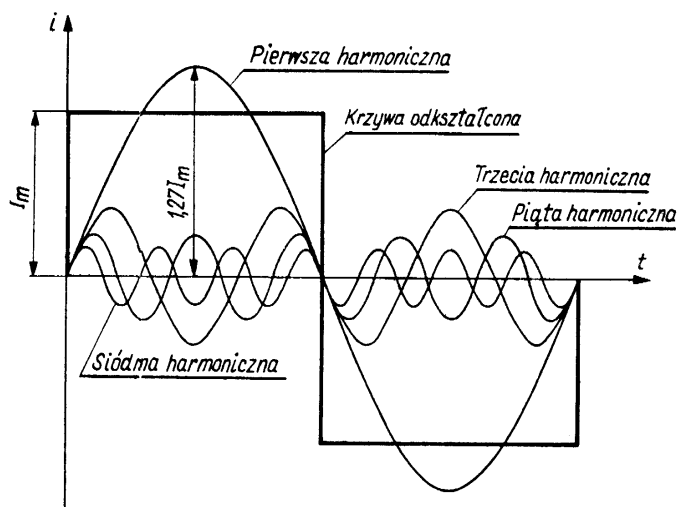
Ponieważ $\sin^2(\omega t) = \frac{1}{2} [1 - \cos(2\omega t)]$, więc

$$I_{sk} = I_m \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T \frac{1}{2} [1 - \cos(2\omega t)] dt} = I_m \sqrt{\frac{1}{2T} \int_0^T [1 - \cos(2\omega t)] dt} = I_m \sqrt{\frac{1}{2T} T} = \frac{I_m}{\sqrt{2}} \approx 0,707 I_m. \quad (A2.12)$$

Przeprowadzając analogiczne rachunki można obliczyć wartość skuteczną napięcia sinusoidalnie przemiennego. Podstawiając $u(t) = U_m \sin(\omega t)$ do wzoru (A2.6) na wartość skuteczną otrzymujemy:

$$U_{sk} = \frac{U_m}{\sqrt{2}} \approx 0,707 U_m. \quad (A2.13)$$

Wyznamy teraz wartości skuteczne okresowych sygnałów prostokątnego i trójkątnego pokazanych na rysunkach A2.3 oraz A2.4. Przyjmijmy, że pokazany na rys. A2.3 przebieg sygnału prostokątnego jest opisany funkcją $i(t)$ postaci:



$$i(t) = \begin{cases} I_m & \text{dla } t \in \left(0, \frac{T}{2}\right) \\ -I_m & \text{dla } t \in \left(\frac{T}{2}, T\right) \end{cases}. \quad (A2.14)$$

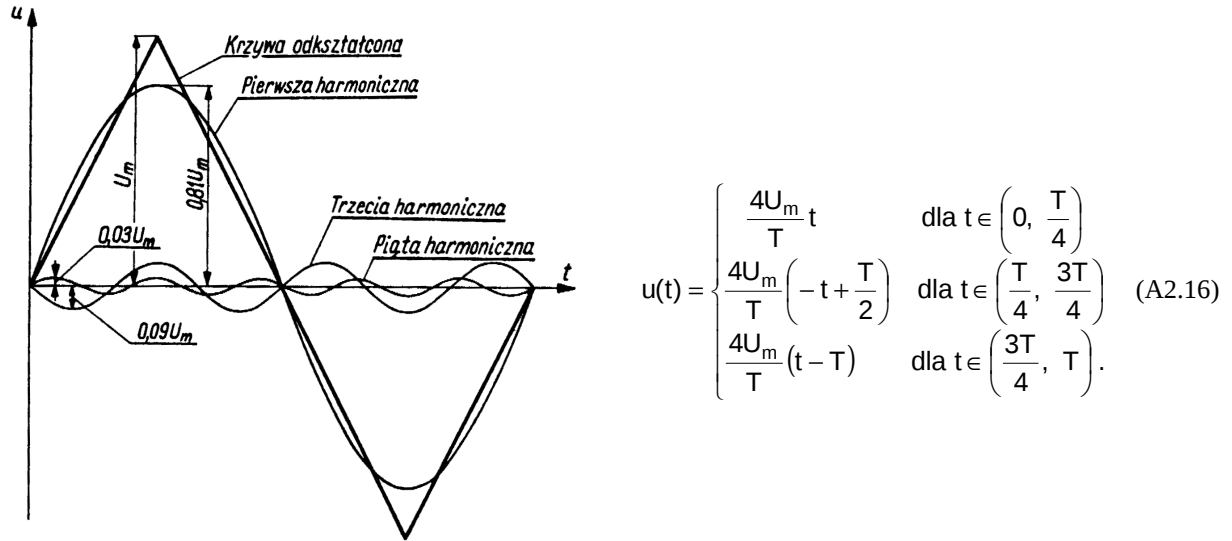
Wartość skuteczna I_{sk} tak określonego sygnału prostokątnego wynosi:

$$I_{sk} = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T i^2(t) dt} = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T I_m^2 dt} \quad (A2.15)$$

$$I_{sk} = \sqrt{\frac{1}{T} I_m^2 T} = I_m.$$

Rys. A2.3. Przebieg prostokątnego prądu przemiennego w ciągu okresu

Przyjmijmy z kolei, że pokazany na rys. A2.4 przebieg sygnału trójkątnego jest opisany funkcją $u(t)$ postaci:



Rys. A2.4. Przebieg trójkątnego napięcia przemiennego w ciągu okresu

Ze względu na symetrię tak określonego sygnału trójkątnego przy wyznaczaniu wartości skutecznej U_{sk} możemy uprościć rachunki ograniczając je do pierwszej ćwiartki okresu:

$$U_{sk} = \sqrt{\frac{4}{T} \int_0^{T/4} u^2(t) dt} = \sqrt{\frac{4}{T} \int_0^{T/4} \frac{16U_m^2}{T^2} t^2 dt} = \sqrt{\frac{64U_m^2}{T^3} \frac{t^3}{3} \Big|_0^{T/4}} = \sqrt{\frac{64U_m^2}{T^3} \frac{T^3}{192}} = \sqrt{\frac{U_m^2}{3}} = \frac{U_m}{\sqrt{3}}. \quad (\text{A2.17})$$

Wykonując rachunki dla całego okresu:

$$\begin{aligned} U_{sk} &= \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T u^2(t) dt} = \sqrt{\frac{1}{T} \frac{16U_m^2}{T^2} \left[\int_0^{T/4} t^2 dt + \int_{T/4}^{3T/4} \left(-t + \frac{T}{2}\right)^2 dt + \int_{3T/4}^T (t - T)^2 dt \right]} \\ U_{sk} &= \sqrt{\frac{16U_m^2}{T^3} \left[\frac{t^3}{3} \Big|_0^{T/4} + \left(\frac{t^3}{3} - \frac{T}{2} t^2 + \frac{T^2}{4} t \right) \Big|_{T/4}^{3T/4} + \left(\frac{t^3}{3} - T t^2 + T^2 t \right) \Big|_{3T/4}^T \right]} \\ U_{sk} &= \sqrt{\frac{16U_m^2}{T^3} \left[\frac{T^3}{192} + \left(\frac{26T^3}{192} - \frac{T^3}{4} + \frac{T^3}{8} \right) + \left(\frac{37T^3}{192} - \frac{7T^3}{16} + \frac{T^3}{4} \right) \right]} = \sqrt{\frac{16U_m^2}{T^3} \frac{4T^3}{192}} = \sqrt{\frac{U_m^2}{3}} = \frac{U_m}{\sqrt{3}} \end{aligned} \quad (\text{A2.18})$$

otrzymujemy dokładnie ten sam wynik co poprzednio – patrz wzór (A2.17).

A3. Współczynniki wzmocnienia i tłumienia

Nazwa jednostki bel pochodzi od nazwiska wynalazcy telefonu Alexandra Graham Bella (1847 – 1922). Bel (oznaczany symbolem B) jest jednostką wzmocnienia określoną przy użyciu logarytmu przy podstawie 10. Jeśli przyjmijmy, że P_{wy} jest mocą na wyjściu, a P_{we} odpowiadającą jej mocą na wejściu to współczynnik wzmocnienia mocy k_{wzm} definiujemy jako:

$$k_{wzm}[B] = \log \left(\frac{P_{wy}}{P_{we}} \right) \quad (\text{A3.1})$$

i wyrażamy go w belach. Bardziej dogodną w praktyce jednostką jest 1 decybel (dB), który równy jest 0,1 bel (1 dB = 0,1 B). Wyrażony w decybelach współczynnik wzmocnienia mocy wynosi:

$$k_{\text{wzm}}[\text{dB}] = 10 \log \left(\frac{P_{\text{wy}}}{P_{\text{we}}} \right). \quad (\text{A3.2})$$

Przykładowo, jeżeli moc na wyjściu P_{wy} jest 10 razy większa niż moc na wejściu P_{we} , to współczynnik wzmocnienia mocy wynosi $10 \log 10 = 10 \text{ dB}$. Natomiast jeżeli moc na wyjściu jest 100 razy większa niż moc na wejściu, to współczynnik wzmocnienia mocy wynosi $10 \log 100 = 20 \text{ dB}$.

Jeśli w obwodzie istnieje tłumienie i moc na wyjściu jest mniejsza niż moc na wejściu, to współczynnik wzmocnienia mocy przyjmuje wartości ujemne. W przypadku tłumienia można się również spotkać z pojęciem współczynnika tłumienia. Współczynnik tłumienia mocy definiujemy jako:

$$k_{\text{tł}}[\text{dB}] = 10 \log \left(\frac{P_{\text{we}}}{P_{\text{wy}}} \right). \quad (\text{A3.3})$$

Ponieważ moc wydzielana w obwodzie elektrycznym jest proporcjonalna do kwadratu napięcia lub natężenia prądu płynącego w obwodzie ($P \sim U^2$ albo $P \sim I^2$) to ze względów praktycznych często spotykamy się z pojęciem współczynnika wzmocnienia napięciowego $k_{U\text{wzm}}$ (lub rzadziej prądowego k_I). Współczynnik wzmocnienia napięciowego $k_{U\text{wzm}}$ podobnie jak współczynnik wzmocnienia mocy wyrażamy w decybelach i definiujemy go jako:

$$k_{U\text{wzm}}[\text{dB}] = 20 \log \left(\frac{U_{\text{wy}}}{U_{\text{we}}} \right). \quad (\text{A3.4})$$

Słuszność definicji współczynnika wzmocnienia napięciowego można łatwo wykazać na podstawie wzoru (A3.2):

$$k_{U\text{wzm}}[\text{dB}] = 10 \log \left(\frac{U_{\text{wy}}^2}{U_{\text{we}}^2} \right) = 10 \log \left(\frac{U_{\text{wy}}}{U_{\text{we}}} \right)^2 = 20 \log \left(\frac{U_{\text{wy}}}{U_{\text{we}}} \right). \quad (\text{A3.5})$$

Zatem kiedy napięcie na wyjściu U_{wy} jest 10 razy większe niż napięcie na wejściu U_{we} , to współczynnik wzmocnienia napięciowego wynosi $20 \log 10 = 20 \text{ dB}$, a kiedy napięcie na wyjściu jest 100 razy większe niż napięcie na wejściu to współczynnik wzmocnienia napięciowego wynosi $20 \log 100 = 40 \text{ dB}$.

Jeśli w obwodzie istnieje tłumienie i napięcie na wyjściu jest mniejsze niż napięcie na wejściu, to współczynnik wzmocnienia napięciowego przyjmuje wartości ujemne. W przypadku tłumienia można się również spotkać z pojęciem współczynnika tłumienia. Współczynnik tłumienia napięciowego definiujemy jako:

$$k_{U\text{tł}}[\text{dB}] = 20 \log \left(\frac{U_{\text{we}}}{U_{\text{wy}}} \right). \quad (\text{A3.6})$$

Generatory funkcji dostępne w pracowni mają wbudowane tłumiki wyskalowane w dB. Na płycie czołowej każdego generatora znajdują się dwa przełączniki. Cztery możliwe kombinacje ustawień tych przełączników umożliwiają wybór jednej z zadanych wartości (0 dB, 20 dB, 40 dB, 60 dB) współczynnika tłumienia napięciowego opisanego wzorem (A3.6).

W decybelach można zatem określać wzmocnienie i tłumienie sygnału elektrycznego, ale także parametry urządzeń, przyrządów, anten czy też selektywność filtrów. Decybel nie jest wielkością fizyczną, jak wolt, amper lub wat, ale pojęciem matematycznym opisującym względną zmianę mocy lub napięcia (natężenia) prądu elektrycznego.

A4. Współczynnik wypełnienia

Współczynnik wypełnienia W definiujemy jako bezwymiarowy współczynnik charakteryzujący impulsowy przebieg okresowy, liczbowo równy stosunkowi efektywnego czasu trwania impulsu t_{ef} do okresu przebiegu T . W przypadku przebiegu prostokątnego pokazanego na rys. A1.5 czas efektywnego trwania impulsu $t_{ef} = (t_2 - t_1)$, natomiast okres $T = (t_3 - t_1)$, więc współczynnik wypełnienia jest w tym przypadku równy:

$$W = \frac{t_{ef}}{T} = \frac{t_2 - t_1}{t_3 - t_1} . \quad (A4.1)$$

Współczynnik wypełnienia przyjmuje wartości z przedziału $(0, 1)$. Wartość współczynnika wypełnienia często podaje się również w procentach:

$$W_{\%} = \frac{t_{ef}}{T} 100\% . \quad (A4.2)$$

A5. Wprowadzenie do pomiarów oscyloskopowych

Jednym z podstawowych i zarazem najważniejszych elementów składowych oscyloskopu jest lampa oscyloskopowa, na ekranie której wyświetlany jest obraz badanych przebiegów sygnałów elektrycznych. W pracowni dostępne są:

- ❖ oscyloskop cyfrowy Rigol DS5000
- ❖ oscyloskop analogowy GOS-620
- ❖ oscyloskop analogowy GOS-630.

W oscyloskopie cyfrowym badany przebieg jest przechowywany w pamięci cyfrowej oscyloskopu, a następnie może być zobrazowany na ekranie lampy oscyloskopowej (przy użyciu odpowiedniego oprogramowania – umożliwiającego przeprowadzenie transmisji poprzez interfejs USB – badany przebieg może być również zapamiętany w pamięci komputera i wyświetlony na ekranie monitora).

W oscyloskopach analogowych obraz przebiegu jest rysowany na ekranie lampy oscyloskopowej w czasie rzeczywistym, tzn. że plamka świetlna na bieżąco odwzorowuje na ekranie zmiany przebiegu sygnału wejściowego. Do podstawowych parametrów oscyloskopów analogowych zaliczamy:

- pasmo przenoszenia oscyloskopu,
- współczynnik odchyłania,
- współczynnik podstawy czasu,
- liczbę kanałów wejściowych,
- wielkość pola pomiarowego ekranu lampy oscyloskopowej.

Dolna granica częstotliwości wyznaczająca pasmo przenoszenia oscyloskopu wynosi zazwyczaj 0 Hz, a za wartość górną przyjęto uważać częstotliwość, przy której wzmocnienie maleje o 3 dB w stosunku do wzmocnienia dla niskich częstotliwości (bliskich 0 Hz). Na przykład pasmo oscyloskopu GOS-620 zawiera się w przedziale 0÷20MHz, natomiast oscyloskopu GOS-630 w przedziale 0÷30MHz.

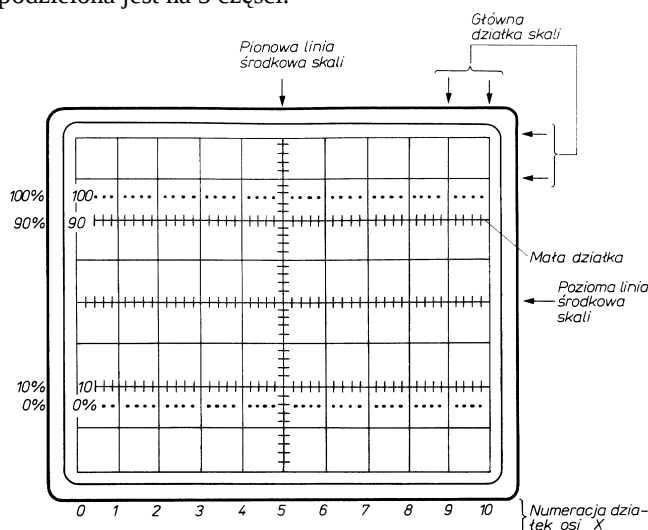
Współczynnik odchyłania (wzmocnienia) określa tzw. czułość oscyloskopu i wyrażony jest w jednostkach napięcia na działkę, np. w woltach na działkę [V/dz] lub [V/DIV] (DIV to skrót od ang. division; zazwyczaj 1 dz = 1 DIV = 1 cm). Współczynnik odchyłania mówi nam jaką wartość międzyszczytową (ang. peak-to-peak) napięcia U_{pp} należy doprowadzić do wejścia oscyloskopu, aby na ekranie uzyskać obraz o wysokości 1 cm lub 1 DIV, jeśli podziałka na ekranie oscyloskopu nie jest wyskalowana w centymetrach. Współczynnik odchyłania można zmieniać skokowo. Im mniejsza jest wartość współczynnika odchyłania, tym większa jest czułość oscyloskopu. Z kolei ze wzrostem czułości możemy mierzyć coraz słabsze sygnały.

Współczynnik podstawy czasu wyrażony jest w jednostkach czasu na działkę, np. w sekundach na działkę [s/dz] lub [s/DIV] (zazwyczaj 1 dz = 1 DIV = 1 cm). Współczynnik podstawy czasu przyjęto określać jako czas potrzebny do przesunięcia plamki na ekranie oscyloskopu w kierunku poziomym na odległość 1 cm lub 1 DIV, jeśli podziałka na ekranie oscyloskopu nie jest wyskalowana w centymetrach. Współczynnik podstawy czasu można zmieniać skokowo. Im mniejsza jest wartość współczynnika podstawy czasu, tym szybsze i krótsze przebiegi możemy obserwować.

Dostępne w pracowni oscyloskopy posiadają dwa kanały wejściowe, co umożliwia jednoczesną obserwację i wzajemne porównywanie dwu różnych przebiegów.

Ekran lampy oscyloskopowej jest płaski, co ułatwia odczyt i wyskalowanie osi w kierunku poziomym i pionowym. Skupiony przez wyrzutnię lampy oscyloskopowej strumień elektronów uderza od wewnętrznej strony w ekran pokryty specjalną substancją (luminoforem), która przetwarza kinetyczną energię elektronów w energię

światłą z zakresu widzialnego przez oko ludzkie. Aby wyeliminować błąd paralaksy, producenci lamp oscyloskopowych nanoszą trwałą skalę na wewnętrznej stronie ekranu oscyloskopu. Dzięki temu obraz mierzonego przebiegu znajduje się w tej samej płaszczyźnie co podziałka skali. Skala naniesiona na ekran oscyloskopów GOS-620 i GOS-630 składa się z 10 działek w kierunku poziomym oraz z 8 działek w kierunku pionowym. Dodatkowo każda z działek podzielona jest na 5 części.

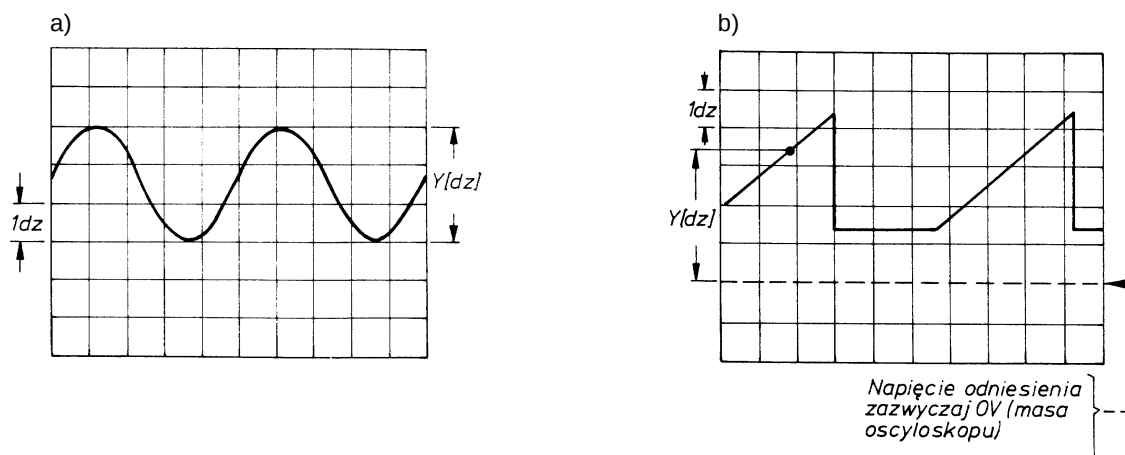


Rys. A5.1. Skala ekranu oscyloskopów GOS-620 oraz GOS-630

A6. Pomiar wartości napięcia przy użyciu oscyloskopu

Chcąc uzyskać maksymalną dokładność pomiaru, należy przestrzegać następujących zasad:

- oscyloskop powinien być wykalibrowany (pokrętła płynnej zmiany czułości i podstawy czasu należy bezwzględnie ustawić w pozycji kalibracji – CAL.)
- obraz mierzonego przebiegu powinien zająć maksymalną możliwą wysokość na ekranie
- obraz na ekranie należy dobrze zogniskować
- obraz na ekranie powinien mieć zredukowaną jasność
- z pomiaru należy eliminować grubość linii obrazu, odczytując wysokość obrazu przy tej samej krawędzi linii (zawsze górnej lub zawsze dolnej).



Rys. A6.1. Idea pomiaru napięcia (a) międzyszczytowego oraz (b) chwilowego

Współczynnik odchylenia (wzmocnienia) oscyloskopu C jest cechowany w jednostkach napięcia na jedną działkę skali ekranu, czyli np. w V/DIV, mV/DIV, μ V/DIV. Tak wycechowany oscyloskop umożliwia pomiar napięcia przez określenie wysokości obrazu na ekranie. Należy pamiętać, że przełącznikiem skokowej zmiany wartości współczynnika odchylenia ustawia się takie położenie, przy którym widoczny w całości obraz zajmie na ekranie minimum 80% jego wysokości. Następnie za pomocą skali na ekranie oscyloskopu odczytuje się w działkach [dz] lub [DIV] odległość Y między interesującymi nas punktami obrazu a następnie mnoży się

tę odległość przez wartość ustawionego współczynnika odchylenia (wzmocnienia) C , odczytaną ze skali odpowiedniego przełącznika. W przypadku pomiaru przy pomocy oscyloskopu wartości napięcia międzyszczytowego U_{pp} przebiegu pokazanego na rys. A6.1a odpowiedni wzór pozwalający wyznaczyć wartość napięcia międzyszczytowego przyjmuje postać:

$$U_{pp}[V] = C[V/DIV] \times Y[DIV]. \quad (A6.1a)$$

Natomiast w przypadku pomiaru przy pomocy oscyloskopu chwilowej wartości $u(t)$ napięcia zmiennego ze składową stałą o przebiegu pokazanym na rys. A6.1b odpowiedni wzór pozwalający wyznaczyć wartość napięcia chwilowego przyjmuje postać analogiczną do (A6.1a):

$$u(t)[V] = C[V/DIV] \times Y[DIV]. \quad (A6.1b)$$

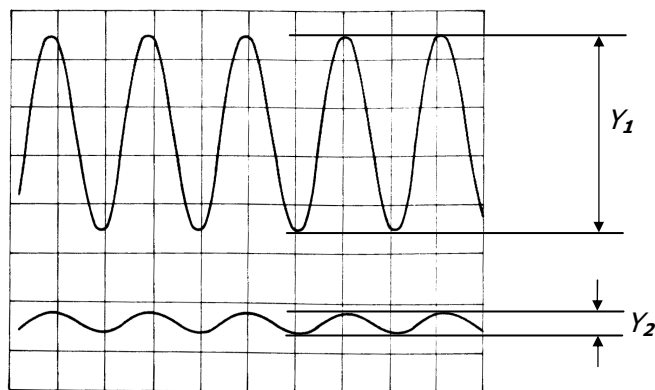
Błąd względny dokonanego przy pomocy oscyloskopu pomiaru wartości napięcia jest w uproszczeniu sumą dwu składników:

- błędu wzmacniacza kanału wejściowego oscyloskopu d_w
- błędu odczytu ze skali ekranu oscyloskopu d_s .

$$\frac{\Delta U}{U} = d_w + d_s. \quad (A6.2)$$

Błąd względny d_w podawany jest przez producenta w dokumentacji dołączonej do oscyloskopu. Można go również wyznaczyć kalibrując oscyloskop napięciem wzorcowym. Najczęściej błąd ten nie przekracza wartości $d_w = 0,04$.

Błąd względny d_s zależy od błędu bezwzględnego ΔY popełnianego przy odczycie ze skali ekranu wysokości obrazu Y . Błąd ΔY związany jest z grubością linii obrazu badanego przebiegu. Zwykle $\Delta Y = 0,1 DIV$, a przy większej wprawie osoby dokonującej odczytu $\Delta Y = 0,05 DIV$.



Rys. A6.2. Wpływ wielkości obrazu obserwowanego przebiegu na dokładność pomiaru

Zatem ostatecznie całkowity względny błąd pomiaru wartości napięcia przy pomocy oscyloskopu można wyznaczyć korzystając ze wzoru:

$$\frac{\Delta U}{U} = d_w + \frac{\Delta Y}{Y}. \quad (A6.3)$$

Jeśli przykładowo wysokość obserwowanego obrazu Y_1 jest ośmiokrotnie większa od wysokości obrazu Y_2 (rys. A6.2) to przyjmując, że błąd związany z grubością linii ΔY jest stały, składnik $\Delta Y/Y$ we wzorze (A6.3) będzie osiem razy mniejszy w przypadku obserwacji obrazu o wysokości Y_1 . Zatem, aby ograniczyć błąd odczytu ze skali ekranu oscyloskopu należy dążyć do uzyskania jak największego obrazu (minimum 80% wysokości ekranu) poprzez właściwy dobór współczynnika odchylenia (wzmocnienia) C .

W praktyce notatki z pomiarów napięcia przy użyciu oscyloskopu zawierają zazwyczaj wartość zmierzonego napięcia U [V] oraz współczynnika odchylenia (wzmocnienia) C [V/DIV] ustawionego w oscyloskopie. W takiej sytuacji użyteczne jest przekształcenie układu równań (A6.1b) oraz (A6.3) do postaci wzoru, który pozwala na bezpośrednie wyznaczenie bezwzględnego błędu pomiaru wartości napięcia:

$$\Delta U = d_w \times U + C \times \Delta Y. \quad (\text{A6.4})$$

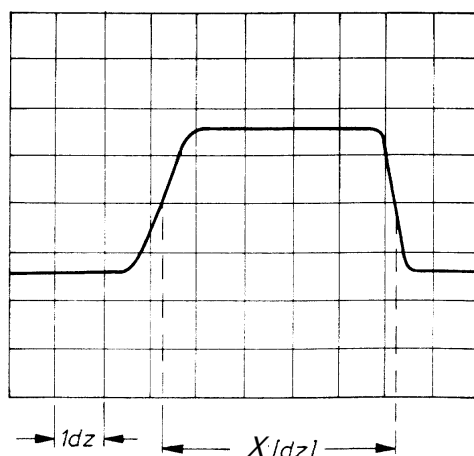
A7. Pomiar wartości czasu przy użyciu oscyloskopu

Pomiar odcinków czasu na obrazie przebiegu może być wykonany przez odczyt długości X wybranego fragmentu obrazu w działkach ([dz] lub [DIV]) i przemnożenie jej przez współczynnik podstawy czasu. Współczynnik podstawy czasu oscyloskopu G jest cechowany w jednostkach czasu na jedną działkę skali ekranu, czyli np. w s/DIV, ms/DIV, μ s/DIV. Jeżeli oscyloskop ma rozciągniętą podstawę czasu w kierunku osi x , to współczynnik podstawy czasu należy podzielić przez wartość bezwymiarowego współczynnika ekspansji E (w oscyloskopach GOS-620 oraz GOS-630 przy włączonej rozciągniętej podstawie czasu współczynnik ekspansji przyjmuje wartość $E = 10$). Zatem w przypadku przykładowego przebiegu pokazanego na rys. A6.1 określenie przy pomocy oscyloskopu czasu t sprowadza się do wykorzystania odpowiedniego wzoru pozwalającego wyznaczyć wartość czasu, który przyjmuje postać:

$$t[s] = G[s/\text{DIV}] \times X[\text{DIV}], \quad (\text{A7.1})$$

a w przypadku włączonej rozciągniętej podstawy czasu:

$$t[s] = G[s/\text{DIV}] \times \frac{X[\text{DIV}]}{E}. \quad (\text{A7.2})$$



Rys. A7.1. Idea pomiaru czasu

Dokładność pomiaru czasu zależy od:

- uchybu współczynnika czasu łącznie z błędem wprowadzanym przez wzmacniacz podstawy czasu oscyloskopu
- uchybu odczytu długości, na który składa się grubość linii obrazu na ekranie oraz kąt między linią obrazu a linią skali.

Podawany przez producenta względny błąd współczynnika czasu dla większości oscyloskopów nie przekracza wartości $d_t = 0,03$. Bezwzględny błąd ΔX odczytu długości X spowodowany grubością linii jest związany z jakością lampy oscyloskopowej i poprawną regulacją jasności i ostrości. Przy mniejszej jasności obraz jest bardziej ostry i linia jest cieńsza. Obraz przebiegu o małym kącie przecięcia linii poziomej skali na ekranie powoduje zwiększenie uchybu odczytu i dlatego, jeśli to możliwe, należy zwiększyć wysokość mierzonego

przebiegu, odczyt zaś przeprowadzać na najbardziej stromym odcinku obrazu. Zwykle $\Delta X = 0,1 \text{ DIV}$, a przy większej wprawie osoby dokonującej odczytu $\Delta X = 0,05 \text{ DIV}$. Ostatecznie całkowity względny błąd pomiaru wartości czasu przy pomocy oscyloskopu można wyznaczyć korzystając ze wzoru:

$$\frac{\Delta t}{t} = d_t + \frac{\Delta X}{X} . \quad (\text{A7.3})$$

W praktyce notatki z pomiarów czasu przy użyciu oscyloskopu zawierają zazwyczaj wartość zmierzonego czasu t [s] oraz współczynnik podstawy czasu G [s/DIV] ustawiony w oscyloskopie. W takiej sytuacji użyteczne jest przekształcenie układu równań (A7.1) oraz (A7.3) do postaci wzoru, który pozwala na bezpośrednie wyznaczenie bezwzględnego błędu pomiaru wartości czasu:

$$\Delta t = d_t \times t + G \times \Delta X , \quad (\text{A7.4})$$

a w przypadku włączonej rozciągniętej podstawy czasu

$$\Delta t = d_t \times t + \frac{G \times \Delta X}{E} . \quad (\text{A7.5})$$

A8. Rachunek błędów dla pomiarów wykonywanych z użyciem generatora funkcyjnego DF1641A

Ponieważ generator funkcyjny DF1641A zbudowany jest z oscylatora i częstotściomierza całkowity błąd bezwzględny wartości częstotliwości generatora funkcyjnego $\Delta v = \Delta v_{cz} + \Delta v_{osc}$ można określić posługując się następującymi wskazówkami:

- składowy błąd bezwzględny wskazań częstotściomierza wbudowanego w generator funkcyjny wynosi $\Delta v_{cz} = \pm(0,003\% \text{ rdg} + 1 \text{ dgts})$, przy czym rozdzielczość dgts częstotściomierza zależy od aktualnej wartości rdg (odczytanej z wyświetlacza) i nie jest jednoznacznie związana z wybranym w generatorze zakresem,

ROZDZIELCZOŚĆ CZĘSTOŚCIOMIERZA W GENERATORZE DF1641A

wartość odczytu rdg	dgts
0,00 ... 9,99 Hz	0,01 Hz
10,0 ... 999,9 Hz	0,1 Hz
1,000 ... 9,999 kHz	0,001 kHz
10,00 ... 99,99 kHz	0,01 kHz
100,0 ... 2000,0 kHz	0,1 kHz

- składowy błąd bezwzględny oscylatora wbudowanego w generator funkcyjny wynosi $\Delta v_{osc} = 2\%$ zakres – dla czasu pracy poniżej 30 minut (czyli w praktyce najczęściej, kiedy rozpoczynamy pomiary zaraz po włączeniu zasilania generatora funkcyjnego),
- składowy błąd bezwzględny oscylatora wbudowanego w generator funkcyjny wynosi $\Delta v_{osc} = 0,5\%$ zakres – dla czasu pracy powyżej 30 minut (czyli kiedy po włączeniu zasilania generatora funkcyjnego odczekamy przynajmniej pół godziny przed rozpoczęciem pomiarów).

Zatem, jak łatwo zauważyć, na całkowity błąd bezwzględny generatora funkcyjnego największy wpływ ma niestabilność czasowa oscylatora. Jeśli na bieżąco korygujemy wartość zadanej częstotliwości wówczas za całkowity błąd bezwzględny częstotliwości generatora funkcyjnego możemy przyjąć błąd wskazań częstotściomierza (należy zwrócić uwagę, że jest to bardzo mała wartość). Wówczas można przyjąć $\Delta v = \Delta v_{cz}$. Jeśli natomiast zapomnimy o korygowaniu zadanej częstotliwości wówczas błąd całkowity będzie wynikał przede wszystkim z niestabilności czasowej oscylatora (wtedy wartość całkowitego błędu bezwzględnego jest zdecydowanie większa). Wówczas należy przyjąć $\Delta v = \Delta v_{osc}$.

Przykładowo, w kilka minut po włączeniu generatora funkcyjnego, bez ręcznej korekty częstotliwości całkowity błąd bezwzględny na zakresie 2 MHz wynosi $\Delta v = \Delta v_{osc} = (2\% \cdot 2) \text{ MHz}$, czyli $\Delta v = 40 \text{ kHz}$.

A9. Rachunek błędów dla pomiarów wykonywanych multimetrami M-4650 oraz M-4660A

W celu wyznaczenia błędów bezwzględnych wielkości mierzonych multimetrami można posłużyć się poniższymi tabelami sporządzonymi na podstawie fabrycznych instrukcji dołączonych do mierników (należy zwrócić uwagę, że rdg oznacza wartość odczytaną z wyświetlacza, natomiast |rdg| oznacza moduł wartości odczytanej z wyświetlacza):

MODEL M-4650

funkcja	zakres	dgts	błąd bezwzględny
woltomierz napięcia stałego (DC V)	200 mV	0,01 mV	$\Delta U = \pm(0,05\% rdg + 3 \text{ dgts})$
	2 V	0,0001 V	
	20 V	0,001 V	
	200 V	0,01 V	
	1000 V	0,1 V	$\Delta U = \pm(0,1\% rdg + 5 \text{ dgts})$
woltomierz napięcia zmiennego (AC V)	200 mV	0,01 mV	$\Delta U = \pm(0,5\% rdg + 10 \text{ dgts})$
	2 V	0,0001 V	
	20 V	0,001 V	
	200 V	0,01 V	
	750 V	0,1 V	$\Delta U = \pm(0,8\% rdg + 10 \text{ dgts})$
amperomierz prądu stałego (DC A)	200 μA	0,01 μA	$\Delta I = \pm(0,3\% rdg + 3 \text{ dgts})$
	2 mA	0,0001 mA	$\Delta I = \pm(0,5\% rdg + 3 \text{ dgts})$
	200 mA	0,01 mA	
	20 A	0,001 A	
amperomierz prądu zmiennego (AC A)	2 mA	0,0001 mA	$\Delta I = \pm(0,8\% rdg + 10 \text{ dgts})$
	200 mA	0,01 mA	$\Delta I = \pm(1,0\% rdg + 10 \text{ dgts})$
	20 A	0,001 A	$\Delta I = \pm(1,2\% rdg + 15 \text{ dgts})$
omomierz (OHM)	200 Ω	0,01 Ω	$\Delta R = \pm(0,2\% rdg + 10 \text{ dgts})$
	2 k Ω	0,0001 k Ω	$\Delta R = \pm(0,15\% rdg + 3 \text{ dgts})$
	20 k Ω	0,001 k Ω	
	200 k Ω	0,01 k Ω	
	2 M Ω	0,0001 M Ω	
	20 M Ω	0,001 M Ω	$\Delta R = \pm(0,5\% rdg + 5 \text{ dgts})$

MODEL M-4660A

funkcja	zakres	dgts	błąd bezwzględny
woltomierz napięcia stałego (DC V)	200 mV	0,01 mV	$\Delta U = \pm(0,05\% rdg + 3 \text{ dgts})$
	2 V	0,0001 V	
	20 V	0,001 V	
	200 V	0,01 V	
	1000 V	0,1 V	$\Delta U = \pm(0,1\% rdg + 5 \text{ dgts})$
woltomierz napięcia zmiennego (AC V)	200 mV	0,01 mV	$\Delta U = \pm(0,5\% rdg + 10 \text{ dgts})$
	2 V	0,0001 V	
	20 V	0,001 V	
	200 V	0,01 V	
	750 V	0,1 V	$\Delta U = \pm(0,8\% rdg + 10 \text{ dgts})$
amperomierz prądu stałego (DC A)	2 mA	0,0001 mA	$\Delta I = \pm(0,3\% rdg + 3 \text{ dgts})$
	200 mA	0,01 mA	$\Delta I = \pm(0,5\% rdg + 3 \text{ dgts})$
	20 A	0,001 A	$\Delta I = \pm(0,8\% rdg + 5 \text{ dgts})$
amperomierz prądu zmiennego (AC A)	2 mA	0,0001 mA	$\Delta I = \pm(0,8\% rdg + 10 \text{ dgts})$
	200 mA	0,01 mA	$\Delta I = \pm(1,0\% rdg + 10 \text{ dgts})$
	20 A	0,001 A	$\Delta I = \pm(1,2\% rdg + 15 \text{ dgts})$
omomierz (OHM)	200 Ω	0,01 Ω	$\Delta R = \pm(0,2\% rdg + 5 \text{ dgts})$
	2 k Ω	0,0001 k Ω	$\Delta R = \pm(0,15\% rdg + 3 \text{ dgts})$
	20 k Ω	0,001 k Ω	
	200 k Ω	0,01 k Ω	
	2 M Ω	0,0001 M Ω	
	20 M Ω	0,001 M Ω	$\Delta R = \pm(1,0\% rdg + 2 \text{ dgts})$

Przykład 1

Przy pomocy multimetru M-4660A dokonano pomiaru napięcia stałego na zakresie 2 V i z wyświetlacza miernika odczytano wartość $U = -1,9876$ V. Korzystamy z odpowiedniego wzoru na błąd bezwzględny woltomierza napięcia stałego na zakresie 2 V

$$\Delta U = \pm(0,05\% |\text{rdg}| + 3 \text{ dgts}). \quad (\text{A9.1})$$

W tym przypadku $|\text{rdg}| = 1,9876$ V oraz $\text{dgts} = 0,0001$ V.

Wyznaczamy wartość błędu $\Delta U = \pm(0,05\% \cdot 1,9876 + 3 \cdot 0,0001)$ V, czyli $\Delta U = \pm 0,0013$ V $\approx \pm 0,002$ V (wartość niepewności pomiarowych zaokrąglamy zawsze „w górę”). Ostatecznie po dokonaniu zaokrąglenia (szczegółowy opis w [4], rozdz. II.2.) wynik pomiaru napięcia zapisujemy jako:

$$U = (-1,988 \pm 0,002) \text{ V}$$

lub najlepiej w równoważnej postaci:

$$U = (-1,988 \pm 0,002) [\text{V}].$$

Przykład 2

Przy pomocy multimetru M-4650 dokonano pomiaru rezystancji na zakresie 200 Ω i z wyświetlacza omomierza odczytano wartość $R = 100,28$ Ω . Korzystamy z odpowiedniego wzoru na błąd bezwzględny omomierza na zakresie 200 Ω

$$\Delta R = \pm(0,2\% \text{ rdg} + 10 \text{ dgts}) \quad (\text{A9.2})$$

W tym przypadku $\text{rdg} = 100,28$ Ω oraz $\text{dgts} = 0,01$ Ω .

Wyznaczamy wartość błędu $\Delta R = \pm(0,2\% \cdot 100,28 + 10 \cdot 0,01)$ Ω , czyli $\Delta R \approx \pm 0,4$ Ω (wartość niepewności pomiarowych zaokrąglamy zawsze „w górę”). Ostatecznie po dokonaniu zaokrąglenia (szczegółowy opis w [4], rozdz. II.2.) wynik pomiaru rezystancji zapisujemy jako:

$$R = (100,3 \pm 0,4) \Omega$$

lub najlepiej w równoważnej postaci:

$$R = (100,3 \pm 0,4) [\Omega].$$