



LABORATORIUM
MIERNICTWA ELEKTRYCZNEGO

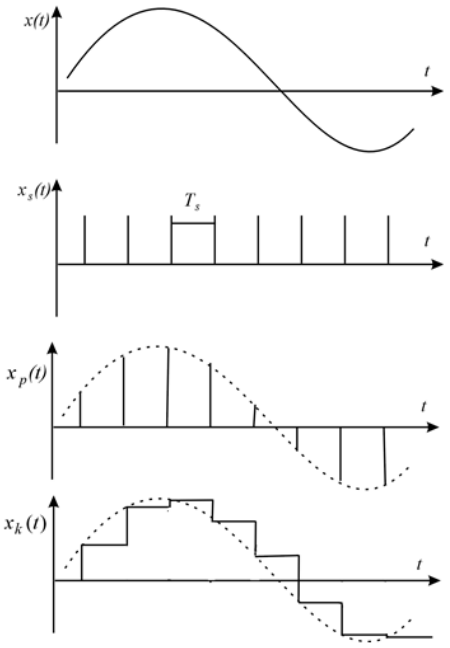
BADANIE PRZETWORNIKÓW ANALOGOWO-CYFROWYCH

BADANIE PRZETWORNIKÓW ANALOGOWO-CYFROWYCH

1. Wprowadzenie

Większość urządzeń pomiarowych lub rejestratorów sygnałów w systemach pomiarowych kontaktujących się bezpośrednio z obiektami badań reaguje na oddziaływania fizyczne (np. temperatura, napięcie elektryczne itp.) zmieniające się w sposób ciągły (nazywane sygnałami analogowymi). Aby te informacje mogły być przetworzone przez system komputerowy muszą być przetworzone w kodowane sygnały cyfrowe. Rolę tę spełniają przetworniki analogowo-cyfrowe (A/C) umieszczone na styku części analogowej i cyfrowej systemu. Wiele urządzeń pomiarowych wyposażonych jest obecnie w przetworniki A/C.

Przetwarzanie ciągłego sygnału analogowego na sygnał cyfrowy polega na dyskretyzacji sygnału w czasie czyli jego próbkowaniu, dyskretyzacji wartości sygnału czyli kwantowaniu oraz na kodowaniu uzyskanego sygnału dyskretnego (Rys. 1.).



Rys. 1. Próbkowanie i kwantowanie sygnału analogowego.

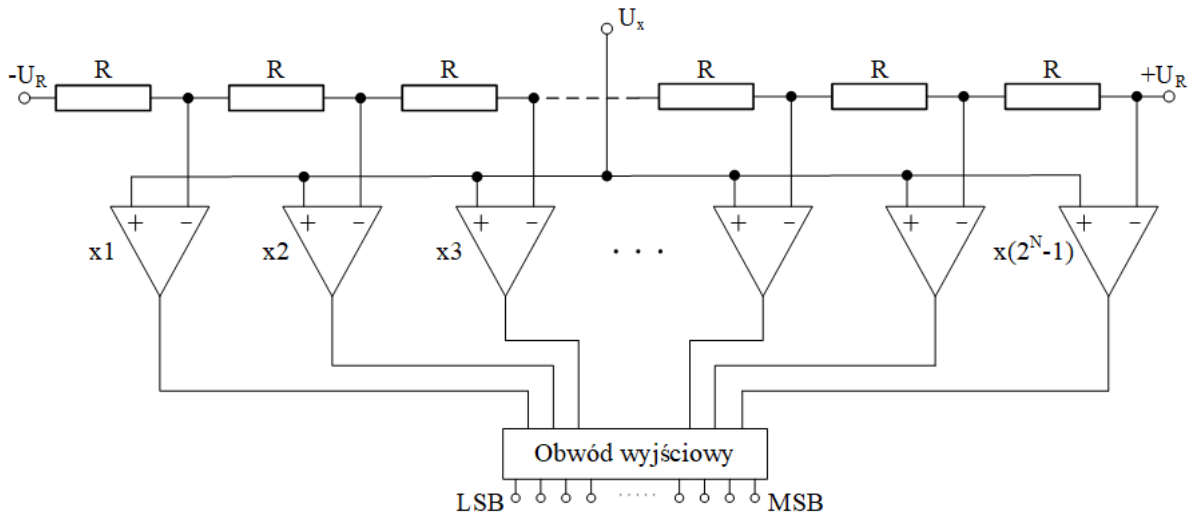
Próbkowanie następuje przez kolejne pobieranie próbek wartości sygnału w pewnych odstępach czasu, w taki sposób, aby ciąg próbek umożliwiał jak najwierniejsze odtworzenie całego przebiegu funkcji. Kwantowanie przebiegu analogowego polega na przyporządkowaniu każdej próbce skończonej liczby poziomów amplitudy, odpowiadającym dyskretnym wartościom od zera do pełnego zakresu.

Istnieje wiele metod przetwarzania analogowo-cyfrowego, jak również wiele sposobów klasyfikacji tych metod. Metody przetwarzania możemy podzielić na metody bezpośrednie

i pośrednie. W układach opartych na metodach bezpośrednich następuje od razu porównanie wielkości przetwarzanej z wielkością odniesienia. Do tej grupy zaliczają się przetworniki z bezpośrednim porównaniem oraz przetworniki kompensacyjne. Przy metodach pośrednich najpierw odbywa się zamiana wielkości przetwarzanej na pewną wielkość pomocniczą (np. czas lub częstotliwość), porównywaną następnie z wielkością odniesienia. W zależności od rodzaju wielkości pomocniczej wyróżnia się metodę częstotliwościową i metodę czasową (prostą lub z podwójnym całkowaniem). Powyższy podział metod jest oparty na kryterium zasady przetwarzania. Drugim ważnym kryterium jest kryterium czasu, w którym odbywa się przetwarzanie. Pod tym względem metody przetwarzania można podzielić na metody chwilowe oraz metody integracyjne. W metodach chwilowych wynik przetwarzania odpowiada wartości sygnału w pewnej chwili znacznie krótszej od okresu, w którym zachodzi przetwarzanie. Do metod chwilowych należy np. metoda bezpośredniego porównania, metoda kompensacyjna oraz metoda czasowo prosta. W metodach integracyjnych natomiast wynik przetwarzania odpowiada średniej wartości sygnału w okresie integracji, zajmującym na ogół znaczną część okresu przetwarzania. Do metod integracyjnych zalicza się między innymi metodę czasową z podwójnym całkowaniem oraz metodę częstotliwościową.

1.1. Przetwornik bezpośredniego równoległego porównania typu FLASH

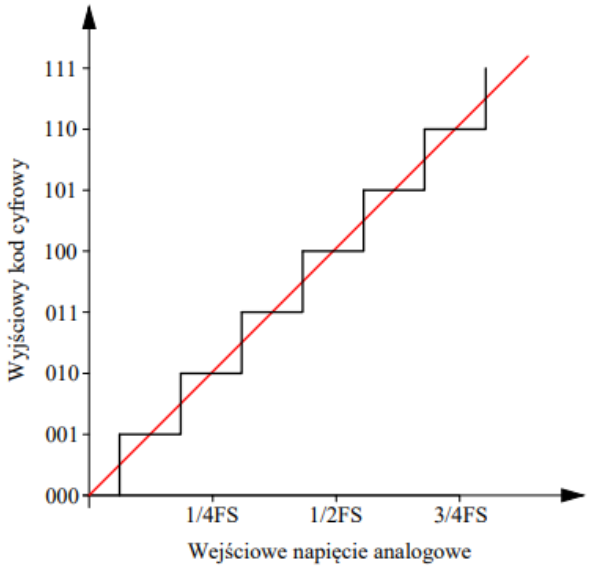
Przetwornikiem analogowo-cyfrowym, który operację kwantowania wykonuje w najbardziej naturalny sposób, jest przetwornik bezpośredniego równoległego porównania. Stabilne napięcie referencyjne podawane jest na dzielnik napięcia, składający się z rezystorów o takiej samej wartości rezystancji R. Amplituda sygnału wejściowego U_x porównywana jest z kolejnymi poziomami napięcia odniesienia za pomocą komparatorów napięcia. Jeżeli wyższa jest wartość napięcia mierzonego U_x, to wyjście k-tego komparatora ustawiane jest w stan wysoki, natomiast, gdy jego wartość jest mniejsza, to rezultatem operacji porównania jest logiczne „zero”. Liniowy wskaźnik, otrzymany na wyjściu układu komparatorów, stanowi sekwencję jedynek, po której następuje ciąg zer logicznych (*kod termometrowy*). Zawarty w układzie konwerter cyfrowy przekształca ten kod na dwójkowy, naturalny lub z uzupełnieniem do dwóch



Rys..1. Schemat N-bitowego przetwornika A/C typu FLASH.

Przetwornik bezpośredniego równoległego porównania o długości słowa wyjściowego n-bitowego obejmuje $2^n - 1$ komparatorów. W przypadku przetwornika 8-bitowego konieczne jest jednoczesne podłączenie 255 komparatorów. Zwiększenie rozdzielczości do 10 bitów prowadzi do

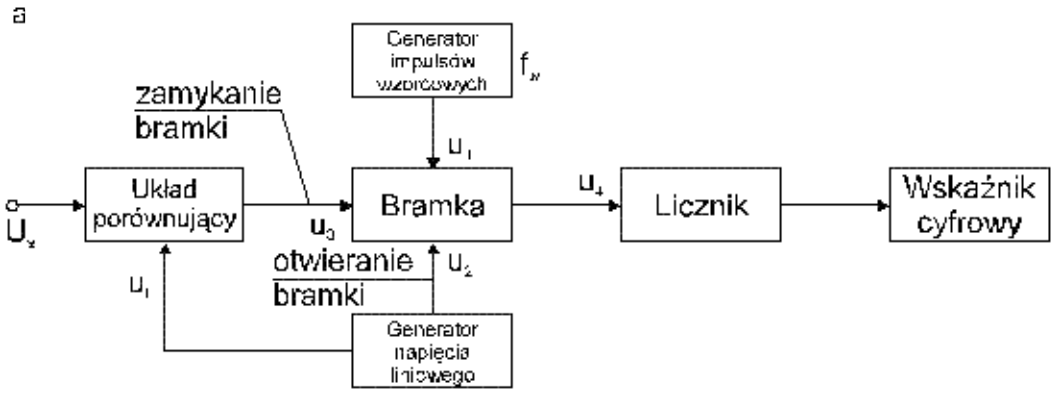
około czterokrotnego wzrostu wielkości struktury i rozproszenia mocy. W związku z tym rzadko spotyka się przetworniki o rozdzielczości powyżej ośmiu bitów.



Rys.2. Przetwarzanie analogowo-cyfrowe w 3-bitowym przetworniku A/C typu FLASH.

1.2. Metoda czasowa prosta przetwarzania analogowo-cyfrowego

Jest jedną z najprostszych i najdawniej używanych metod. Napięcie mierzone U_x jest porównywane w układzie porównującym z napięciem narastającym liniowo U_L, wytwarzanym w specjalnym generatorze. W chwili zrównania się napięć U_x oraz U_L na wyjściu układu porównującego pojawia się impuls U_3 zamykający bramkę elektroniczną (rys. 4.).



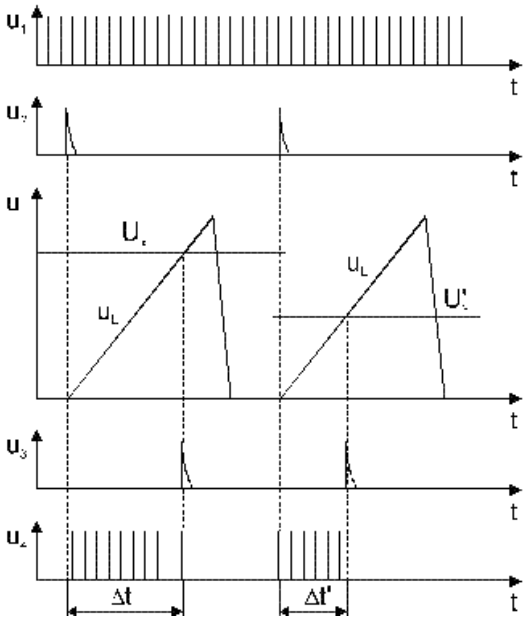
Rys. 3. Schemat funkcjonalny woltomierza cyfrowego z przetwarzaniem napięcie-czas.

Otwarcie bramki (rys. 5.) następuje jednocześnie ze startem generatora napięcia liniowego (impuls u_2). Przez otwartą bramkę w czasie Δt przechodzą impulsy wytwarzane prze generator impulsów wzorcowych, które są zliczane przez licznik. Przy odpowiednim doborze szybkości narastania napięcia liniowego, częstotliwości impulsów wzorcowych wartość mierzonego napięcia

może być bezpośrednio odczytana ze stanu licznika na wskaźniku cyfrowym. Jeżeli przez n oznaczy się liczbę impulsów zliczonych przez licznik w czasie Δt, zaś przez f_w częstotliwość impulsów wzorcowych to spełnione jest równanie:

$$n = f_w \cdot \Delta t = f_w \cdot \frac{U_x}{v} \tag{1}$$

gdzie: v – szybkość narastania napięcia liniowego [V/s]



Rys..4. Przebiegi czasowe wyjaśniające zasadę pomiaru

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

W opisanym powyżej woltomierzu cyfrowym, mierzona jest wartość napięcia w chwili jego skompensowania napięciem wzorcowym zmieniającym się liniowo. Wobec tego, w przypadku, gdy chwilowa wartość napięcia zmienia się w czasie trwania pomiaru, np. wskutek przypadkowych zakłóceń, powstaje dodatkowy błąd pomiaru. Wady tej nie posiadają woltomierze całkujące, które mierzą średnią wartość napięcia w określonym przedziale czasowym.

1.3. Przetwornik oparty na metodzie czasowej z podwójnym całkowaniem

Osobną grupę woltomierzy całkujących stanowią woltomierze o podwójnym całkowaniu. Zasadę działania woltomierza tego typu ilustruje Rys. 5. Pomiar składa się z dwóch cykli. Pierwszy, zwany pierwszym całkowaniem, rozpoczyna się z chwilą doprowadzenia do wejścia integratora napięcia mierzonego U_x. Napięcie na wyjściu integratora narasta wtedy liniowo z szybkością proporcjonalną do wartości U_x , a jednocześnie startuje generator częstotliwości wzorcowej, który odmierza czas całkowania t_0. Czas jest stały (t_0=const) niezależnie od wartości mierzonego napięcia. Po upływie czasu t_0 rozpoczyna się drugi cykl pomiaru (drugie całkowanie). Układ sterujący wysyła impuls przełączający wejście integratora na źródło napięcia wzorcowego o stałej wartości U_r=const lecz o przeciwnej do napięcia U_x biegunowości. Jednocześnie otwiera się bramka, przez którą impulsy z generatora częstotliwości wzorcowej f_w doprowadzane są do licznika, gdzie rozpoczyna się ich

zliczanie. Napięcie na wyjściu integratora maleje z szybkością proporcjonalną do wartości napięcia U_r wskutek rozładowywania się kondensatora C. W chwili, w której napięcie wyjściowe osiąga wartość zerową, kończy się drugi cykl pomiarowy. Chwila ta jest wykrywana w układzie porównującym, który wysyła impuls zamykający bramkę. Pomiar napięcia omawianą metodą sprowadza się więc do porównania dwu całek:

$$\frac{1}{RC}\int_{t_1}^{t_2} U_x dt = \frac{1}{RC}\int_{t_2}^{t_3} U_r dt \tag{2}$$

czyli dwu wyrażeń :

$$\begin{gathered} U_x(t_2 - t_1) = U_r(t_3 - t_2) \\ U_x \cdot t_0 = U_r \cdot \Delta t \end{gathered} \tag{3}$$

Ze wzoru (3) wynika, że:

$$\Delta t = \frac{t_0}{U_r} U_x \tag{4}$$

Tak więc czas zliczania impulsów Δt, a więc i liczba zliczonych impulsów $N = f_w \cdot \Delta t$ są wprost proporcjonalne do wartości mierzonego napięcia U_x.

$$N = n \cdot \frac{U_x}{U_r} \tag{5}$$

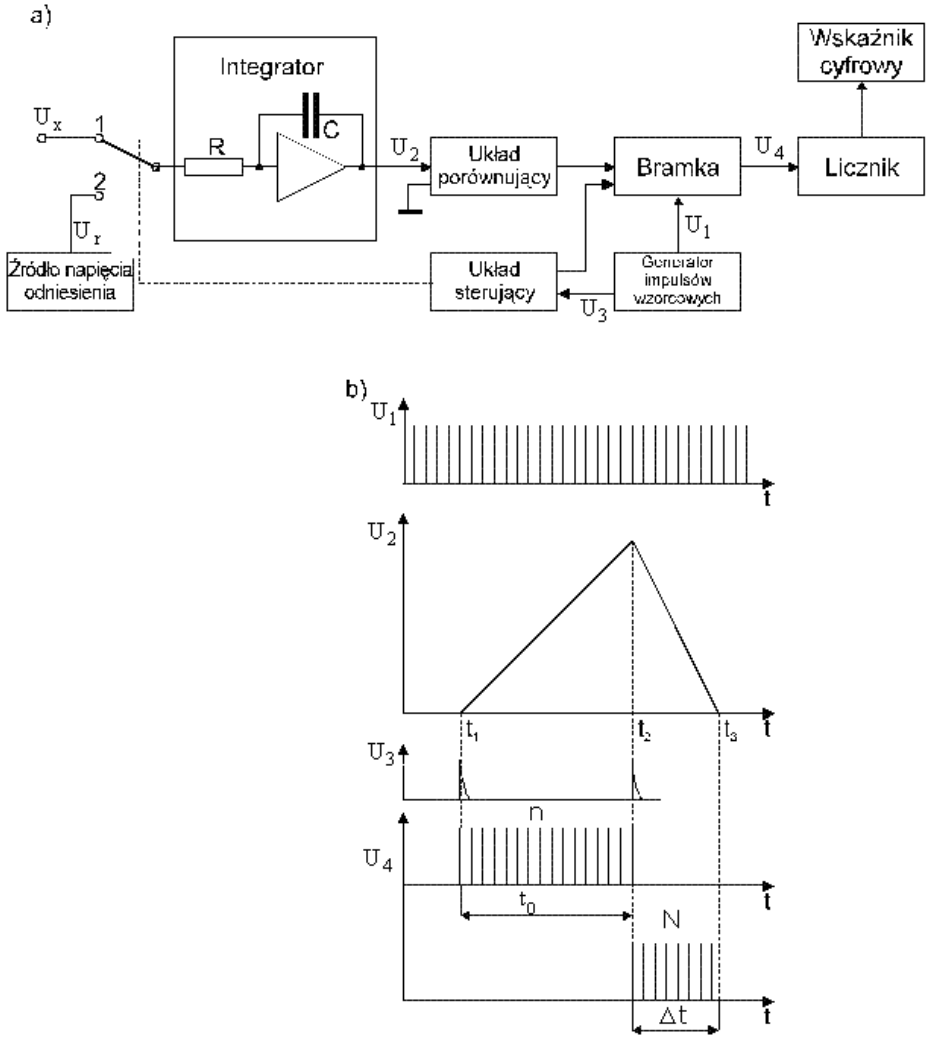
Wynik pomiaru jest wyświetlany na wskaźniku cyfrowym. Metoda podwójnego całkowania ma w porównaniu z innymi metodami jedną poważną zaletę: otóż oba napięcia U_x i U_r porównywane są za pomocą tego samego układu. Stąd dokładność wykonania tego układu oraz stałość jego parametrów w czasie nie grają już tak ważnej roli jak w układzie o całkowaniu pojedynczym.

Uśrednianie napięcia mierzonego w woltomierzu całkującym powoduje wydatne zmniejszenie wpływu zakłóceń na dokładność pomiaru. Dla przypadku zakłócenia napięcia mierzonego napięciem przemiennym np. sinusoidalnym, wartość średnia napięcia mierzonego będzie wynosiła:

$$U_{x\acute{s}} = \frac{1}{t_0}\int_0^{t_0} (U_x + U_m \sin\frac{2\pi}{T_z} t) dt \tag{6}$$

Jeżeli czas pomiaru t_0 będzie równy okresowi przebiegu zakłócającego $T_z = \frac{1}{f_z}$ lub jego wielokrotności, to $U_{x\acute{s}} = U_x$, co oznacza, że chwilowa wartość napięcia stałego mierzonego może ulec zmianie, lecz zmiany te nie wpływają na wynik pomiaru. Wpływ zakłóceń o częstotliwości różniącej się od wielokrotności $1/t_0$ określa się zgodnie z zależnością

$$\beta = 20lg\frac{\pi f_z t_0}{|sin\pi f_z t_0|} \tag{7}$$



Rys. 5. Woltomierz cyfrowy o podwójnym całkowaniu: a) schemat blokowy; b) przebiegi czasowe wyjaśniające zasadę pomiaru.

2. Cel ćwiczenia

Celem ćwiczenia jest zrozumienie zagadnienia przetwarzania analogowo-cyfrowego oraz zapoznanie się z funkcjonowaniem przetworników A/C wykorzystujących bezpośrednie i pośrednie metody przetwarzania.

3. Stanowisko laboratoryjne

Do analizy pośredniej metody przetwarzania wykorzystany zostanie przetwornik analogowo-cyfrowy z podwójnym całkowaniem zastosowany w woltomierzu cyfrowym V-541. Jest on przeznaczony do pomiarów napięć stałych i zmiennych w zakresie małych częstotliwości. Przy pomiarach napięć stałych przyrząd jest mało wrażliwy na zawartość składowej zmiennej dzięki zastosowaniu zasady podwójnego całkowania. Zastosowany przetwornik napięcia zmiennego na stałe (przetwornik AC/DC) posiada skorygowaną charakterystykę przetwarzania tak, że jego napięcie jest proporcjonalne do wartości skutecznej napięcia mierzonego o zmienności sinusoidalnej.

Obiektem badań przetwornika AC korzystającego z bezpośredniej metody przetwarzania jest dedykowane stanowisko laboratoryjne z 3-bitowym przetwornikiem typu FLASH opartym na

komparatorach *LM339* i koderze priorytetowym *SN74LS148*. Stanowisko posiada wyprowadzone zaciski, dzięki czemu możliwy jest pomiar napięcia w poszczególnych punktach układu. Stan wyjść komparatorów i kodera priorytetowego sygnalizowany jest za pomocą diod LED.

4. Zakres ćwiczenia

- Określenie błędu pomiaru poprzez porównanie wskazań woltomierza przy pomiarze wzorca napięcia o znanej wartości E_N;
- Obserwacje przebiegów napięcia wyjściowego integratora dla wejściowych napięć stałych oraz pomiar wartości czasów t_0 i Δt występujących w cyklu przetwarzania przetwornika A/C dla wejściowych napięć stałych i wejściowych napięć stałych ze składową zmienną;
- Ocenę wpływu zniekształceń mierzonego napięcia na wskazanie wartości skutecznej;
- Pomiar charakterystyki częstotliwościowej $U_{wy} = f(f_{Uwe})$, $U_{mwe} = const$;
- Ustalenie napięć progowych U_x na wejściach nieodwracających komparatorów, przy których następuje zmiana stanu wyjścia danego komparatora dla $U_{Ref} = const$.

5. Technika pomiarów

- **Do określenia błędu** pomiaru woltomierza zastosowano metodę porównawczą. Polega ona na porównaniu wskazań (U_w) woltomierza przy pomiarze siły elektromotorycznej (E_N) wzorca napięcia z wartością E_N uzyskaną inną metodą wskazaną przez prowadzącego zajęcia. Wartość błędu bezwzględnego należy określić na podstawie wzoru:

$$\delta U = E_N - U_w \tag{8}$$

i błędu względnego:

$$\delta U = \frac{E_N - U_w}{U_w} \cdot 100\% \tag{9}$$

- **W celu obserwacji napięcia** na wyjściu integratora należy wyjście to podłączyć do wejścia Y oscyloskopu. Następnie dokonuje się obserwacji przebiegu mierzonego napięcia integratora $U_c = f(t)$ na ekranie oscyloskopu dla kilku różnych wartości napięcia wejściowego stałego oraz napięcia wejściowego stałego ze składową sinusoidalną. Zaobserwowane przebiegi należy zamieścić w sprawozdaniu. Za pomocą oscyloskopu wyznacza się również okres przetwarzania (T_p) poprzez pomiar czasów t_0 i Δt.

$$T_p = t_0 + \Delta t \tag{10}$$

gdzie:
t_0 – czas pierwszej fazy całkowania,
Δt – czas drugiej fazy całkowania.

Znajomość czasów t_0 i Δt oraz napięć wejściowych U_x pozwala na wyznaczenie charakterystyk

$$t_0 = f(U_x), \qquad \Delta t = f(U_x) \tag{11}$$

dla wejściowych napięć stałych bez oraz ze składową sinusoidalną o częstotliwości 50 Hz.
Dalej wyznacza się przebieg współczynnika tłumienia zakłóceń β w funkcji iloczynu $f_z t_0$, który definiowany jest jako logarytm ze stosunku wejściowego napięcia zakłócającego U_z do napięcia wyjściowego U_{wy}.

$$\beta = 20lg\frac{U_z}{U_{wy}}[dB] \quad (12)$$

Przebieg współczynnika tłumienia zakłóceń otrzymuje się dokonując pomiarów napięcia wyjściowego dla zadanych częstotliwości sygnału sinusoidalnego o amplitudzie bliskiej wybranemu zakresowi pomiarowemu woltomierza.

- **Ocenę wpływu kształtu krzywej** mierzonego napięcia na wskazania woltomierza przeprowadza się dokonując pomiaru napięcia najpierw sinusoidalnego o amplitudzie U_m i częstotliwości f, a następnie napięcia prostokątnego i trójkątnego o takiej samej amplitudzie i częstotliwości jak przy napięciu sinusoidalnym. Wskazanie woltomierza dla przebiegu sinusoidalnego uznaje się za wartość odniesienia. Wpływ ten ilościowo określa się na podstawie wzoru:

$$\delta°_k = \frac{U_k - U_\sim}{U_\sim} \cdot 100\% \quad (13)$$

gdzie: U_k – wskazanie woltomierza dla przebiegu prostokątnego lub trójkątnego,
$U_\sim$ - wskazanie woltomierza dla przebiegu sinusoidalnego.

- **Pomiar charakterystyki częstotliwościowej** $U_{wy} = f(fU_{we})$ wykonuje się dla napięcia o prze-biegu sinusoidalnym o stałej amplitudzie i nastawianej częstotliwości na generatorze w granicach od 0 do 100 kHz

- **Pomiary napięć progowych** na wejściach komparatorów napięcia $(x_1 - x_7)$ w przetworniku analogowo-cyfrowym typu *FLASH* przeprowadza się dla stałego, podanego przez prowadzącego zajęcia, napięcia odniesienia $U_{Ref} = const$. Stanowisko powinno być zasilone poprzez podanie stałego napięcia z zasilacza laboratoryjnego na zaciski U_z. Następnie do układu należy wpiąć woltomierze o dużej dokładności, dzięki którym możliwy będzie pomiar napięć w kolejnych punktach drabinki rezystorowej oraz napięcia mierzonego U_x. Za pomocą potencjometru należy regulować napięcie U_x, aż do momentu zaświecenia się diody LED (zmiany stanu wyjścia). Wówczas należy odczytać wartości napięć wejściowych komparatora, którego stan wyjściowy uległ zmianie.

  Badanie przeprowadza się poprzez stopniowe zwiększanie napięcia U_x, aż do momentu ustawienia wyjść wszystkich komparatorów w stan wysoki (włączenie się wszystkich diod LED), a następnie zmniejszając to napięcie do chwili osiągnięcia logicznego „zera” przez wszystkie wyjścia (zgaśnięcie wszystkich diod LED).

  Na podstawie pomiarów należy sporządzić wykres schodkowy obrazujący momenty zmian 3-bitowego słowa wyjściowego.

Literatura

1. Stabrowski M.: Cyfrowe przyrządy pomiarowe, Wydaw. Naukowe PWN, Warszawa 2002.
2. Tumański S.: Technika pomiarowa , Wydawnictwa Naukowo-Techniczne, Warszawa 2007.
3. Piotrowski J.; Podstawy miernictwa, Wydawnictwa Naukowo-Techniczne, Warszawa, 2002.
4. Rydzewski J. : Pomiary oscyloskopowe. WNT 1994.
5. Kulka Z., Nadachowski M., Scalone przetworniki analogowo-cyfrowe i cyfrowoanalogowe, Warszawa 1997.