

LABORATORIUM METROLOGII  
Wydział Elektrotechniki i Informatyki  
Katedra Automatyki i Metrologii

POLITECHNIKA LUBELSKA  
Wydział Elektrotechniki i Informatyki  
Katedra Automatyki i Metrologii  
20-618 Lublin, ul. Nadbystrzycka 38A  
tel./fax (081) 538-43-15

## Ćwiczenie Nr 32

### POMIARY MULTIMETRYCZNE PARAMETRÓW NAPIĘCIA ZMIENNEGO

#### **Cel ćwiczenia**

Celem ćwiczenia jest poznanie typowych struktur i właściwości cyfrowych multimetrów skonfigurowanych do pomiarów parametrów napięcia przemiennego, a także sposobów normalizacji ich błędów oraz metod szacowania niepewności i interpretacji uzyskiwanych z ich pomocą wyników pomiarów.

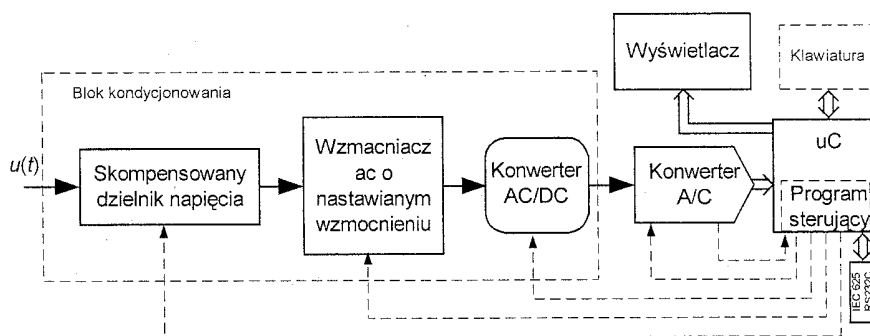
*(Opracował: prof. Jan R. Jasik)*

Lublin 2007 r

## 1. WPROWADZENIE

Multimetr cyfrowy jest jednym z najszerzej stosowanych przyrządów pomiarowych. Pozwala on na pozyskiwanie informacji w wielu zastosowaniach laboratoryjnych i przemysłowych przy pomiarach różnych wielkości elektrycznych i nieelektrycznych. W modelach multimetrów przeznaczonych do użytku laboratoryjnego z reguły instalowany jest interfejs systemowy, pozwalający na stosowanie bogatych narzędzi programowych umożliwiających wirtualizację pomiarów i tworzenie systemów pomiarowych.

Najpopularniejsza metoda pomiaru napięć zmiennych polega na przetworzeniu tych napięć w napięcie stałe – AC/DC (ang. *alternating current to direct current*) i pomiar tego napięcia woltomierzem napięcia stałego. Schemat blokowy przedstawiający strukturę współczesnego cyfrowego multimetru, skonfigurowanego do pomiarów parametrów napięcia zmiennego, jest pokazany na rys.1.1.



Rys. 1.1 Uogólniony schemat blokowy większości współczesnych multimetrów cyfrowych

Mierzone napięcie  $u(t)$  jest dołączane do bloku kondycjonowania zawierającego w sobie dzielnik napięcia, zespół przełączników, wzmacniacz oraz konwerter AC/DC o poziomie napięcia wyjściowego dopasowanym do zakresu wejścia przetwornika analogowo-cyfrowego A/C (ang. *analog to digital converter*).

### 1.1 Parametry charakteryzujące napięcie zmienne

Napięcie zmienne  $u(t)$  jest charakteryzowane przez cztery podstawowe parametry:

Wartość szczytowa dodatnia  $U_m^+ = \max\{u(t)\}$  i ujemna  $U_m^- = \min\{u(t)\}$ ; dla napięcia sinusoidalnego  $u(t) = U_m \sin \omega t$  wartość szczytowa jest równa amplitudzie  $U_m$  tego napięcia.

Wartość średnia  $U_{sr}$  za czas pomiaru  $T_p$

$$U_{sr} = \frac{1}{T_p} \int_t^{t+T_p} u(t) dt, \quad (1.1)$$

reprezentuje składową stałą napięcia. Wartość średnia napięcia sinusoidalnego obliczona za okres  $T$  jest równa zero.

Wartość średnia wyprostowana  $U_{srw}$  (ang. *average absolute value*) jest to wartość średnia modułu napięcia

$$U_{srw} = \frac{1}{T} \int_0^T |u(t)| dt \quad (1.2)$$

otrzymanego praktycznie poprzez dwupołówkowe wyprostowanie napięcia zmiennego. Jeśli  $T = 1$  to  $U_{srw}$  jest równe powierzchni pod krzywą wyprostowanego napięcia  $|u(t)|$ .

W przypadku napięć jednopólnych wartość średnia (składowa stała) jest równa wartości średniej wyprostowanej. W przypadku napięć dwupólnych te dwie wielkości różnią się między sobą; np. dla napięcia sinusoidalnego  $U_{sr} = 0$ , zaś  $U_{srw} = 0,637U_m$ .

Wartość skuteczna (średniokwadratowa)  $U_{sk}$  (ang. *root mean square value RMS*) jest pierwiastkiem z kwadratu wartości chwilowej

$$U_{sk} = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T u^2(t) dt} \quad (1.3)$$

Wartość skuteczną napięcia niesinusoidalnego (odkształconego), zawierającego nie równą zero składową stałą  $U_{sr}$ , określa się z wzoru:

$$U_{sk} = \sqrt{U_{sr}^2 + \sum_{i=1}^{\infty} U_{ski}^2} \quad (1.4)$$

gdzie:  $U_{ski}$  – wartość skuteczna  $i$ -tej harmonicznej.

Warto zaznaczyć, że wartość skuteczna napięcia odkształconego nie zależy od przesunięć fazowych między poszczególnymi harmonicznymi.

Związki między poszczególnymi parametrami charakteryzującymi napięcie zmienne określają następujące współczynniki:

$$k = \frac{U_{sk}}{U_{srw}} \text{ - współczynnik kształtu,} \quad (1.5)$$

$$k_a = \frac{U_m}{U_{sk}} \text{ - współczynnik amplitudy (ang. } \textit{crest factor}), \quad (1.6)$$

$$k_u = \frac{U_m}{U_{srw}} \text{ - współczynnik uśredniania.} \quad (1.7)$$

Stopień odkształcenia napięcia zmiennego od napięcia harmonicznego (sinusoidalnego) wyznaczają dwa współczynniki:

$$h = \sqrt{\sum_{i=2}^{\infty} \left(\frac{U_i}{U_1}\right)^2} \text{ - współczynnik zawartości harmonicznnych,} \quad (1.8)$$

$$k_n = \sqrt{\sum_{i=2}^{\infty} \left(\frac{U_i}{U_{sk}}\right)^2} \text{ - współczynnik zniekształceń nieliniowych.} \quad (1.9)$$

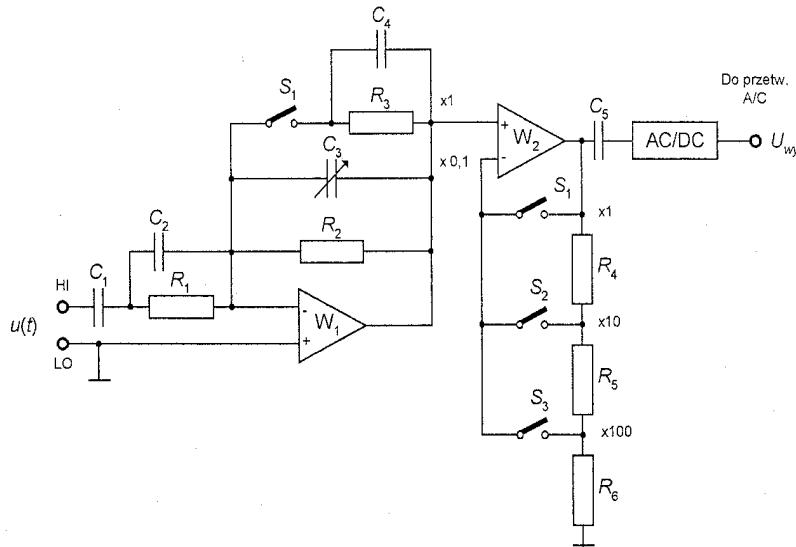
Tabela 1

L.p	Przebieg napięcia		$U_{xsr}$ V	$U_{srw}$ V	$U_{sk}$ V	$k$ -	$k_a$ -	$k_u$ -
	Nazwa funkcji	Zapis analit.						
	sinus	$u(t) = U_m \sin \omega t$	0	$0,637U_m$	$0,707U_m$	1,11	1,41	1,57

## 1.2 Układy kondycjonowania napięcia mierzonego

Schemat typowego bloku kondycjonowania cyfrowego woltomierza napięcia zmiennego jest przedstawiony na rys.1.2. Kondensator  $C_1$  odcina składową stałą napięcia w sytuacji gdy woltomierz pracuje w trybie pomiaru składowej przemiennej. Zakres pomiarowy woltomierza jest ustalany przez kombinację nastawy dzielnika napięcia w pierwszym stopniu, zrealizowanym na wzmacniaczu  $W_1$  i nastawy wzmocnienia stopnia drugiego, zrealizowanego na wzmacniaczu  $W_2$ .

Pierwszy stopień zawiera skompensowany dzielnik napięcia o przełączanym współczynniku podziału. Oznacza to, że stałe czasowe  $R_2C_3$  i  $R_1C_2$  są tak dostrojone, że zagwarantowana jest stałość współczynnika podziału w całym zakresie częstotliwościowym woltomierza.



Rys.1.2 Uproszczony schemat bloku kondycjonowania cyfrowego woltomierza napięcia zmiennego

Wyłącznikiem  $S_1$  ustala się większe tłumienie dzielnika dla większych wartości napięcia mierzonego  $u(t)$ . Drugi stopień, zrealizowany na szerokopasmowym wzmacniaczu  $W_2$  o przełączanym wzmocnieniu, odpowiada za wypracowanie na swoim wyjściu napięcia o poziomie zbliżonym do wartości zakresowej konwertera AC/DC. Pojawiająca się na wyjściu konwertera AC/DC składowa stała jest blokowana przez kondensator  $C_5$ .

Przystosowanie woltomierza napięcia zmiennego do pomiarów prądu wymaga zastosowania bocznika, którego zadaniem jest przetworzenie prądu w napięcie. Zmianę zakresu prądowego uzyskuje się stosując bocznik wielozakresowy i zespół dodatkowych wyłączników o odpowiedniej obciążalności zestyków.

### 1.3 Konwertery napięcia zmiennego na napięcie stałe

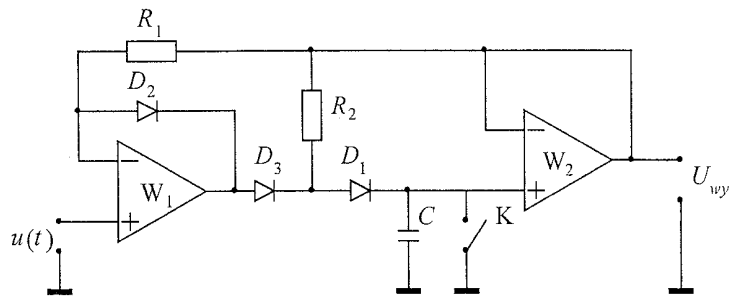
W popularnych multimetrach w charakterze przetworników AC/DC stosuje się stosunkowo tanie i proste przetworniki wartości średniej (wyprostowanej) lub rzadziej wartości maksymalnej (amplitudowej). W multimetrach wyższych klas standardem jest tzw. przetwornik prawdziwej wartości skutecznej (*ang. true RMS*).

#### 1.3.1 Konwertery wartości maksymalnej

Konwerter wartości maksymalnej (amplitudowej, szczytowej) najprościej można zrealizować w układzie biernym [3, 4], ładując kondensator przez diodę. Należy przy tym przestrzegać zasady, by stała czasowa ładowania kondensatora była dużo mniejsza od stałej czasowej jego rozładowania. Pożądane jest również, by wartość stałej czasowej ładowania kondensatora była mniejsza od wartości okresu  $T$  napięcia przetwarzanego, zaś wartość stałej czasowej rozładowania była większa od okresu przetwarzanego napięcia o najmniejszej częstotliwości.

Konwertery bierne mają liczne wady, z których najważniejsze to: nieliniowość charakterystyki przetwarzania, spowodowana nieliniowością charakterystyki diody, oraz duży wpływ rezystancji wewnętrznej źródła napięcia przetwarzanego i rezystancji obciążenia na

sprawność przetwarzania. Poprawę niektórych parametrów konwerterów wartości szczytowej można uzyskać poprzez wprowadzenie elementów aktywnych. Jedno z możliwych rozwiązań takiego układu jest przedstawione na rys.1.3.



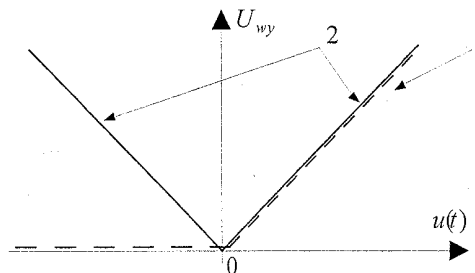
Rys.1.3 Schemat aktywnego konwertera wartości maksymalnej (amplitudowej, szczytowej)

Wzmacniacz  $W_2$  jest wtórnikiem napięciowym o wzmacnieniu równym jedności. Stanowi on bufor między kondensatorem  $C$  i wyjściem konwertera, zapewniając niską wartość jego rezystancji wyjściowej. Wzmacniacz  $W_1$  to wtórnik napięciowy o wzmacnieniu równym jedności, który poprzez diody  $D_3$  i  $D_1$  ładuje kondensator  $C$  do wartości szczytowej napięcia wejściowego  $u(t)$ . Dioda  $D_2$  tworzy obwód sprzężenia zwrotnego dla wzmacniacza  $W_1$  gdy jego napięcie wyjściowe jest mniejsze od wartości szczytowej  $U_m$  napięcia wejściowego  $u(t)$ , zapobiegając nasyceniu. Rezystor  $R_1$  zapewnia połączenie między napięciem wyjściowym  $U_{wy}$  i napięciem w sumacyjnym punkcie wzmacniacza  $W_1$ , w tych przypadkach, gdy  $u(t)$  jest mniejsze niż napięcie  $U_c$  na kondensatorze  $C$ . Obwód  $D_2, R_1$  zapobiega przeciążeniu wzmacniacza  $W_1$ , gdy napięcie wejściowe  $u(t)$  jest ujemne. Obwód  $D_3, R_2$  zapobiega rozładowaniu kondensatora  $C$  zwrotnym prądem diody  $D_1$ . Rezystor  $R_2$  zapewnia równość potencjałów na zaciskach diody  $D_1$  w przypadku ujemnego napięcia wejściowego. Klucz  $K$  umożliwia okresowe rozładowanie kondensatora, niezbędne dla ponownego zapamiętania wartości szczytowej.

Przedstawiony na rys.1.3 układ jest konwerterem wartości szczytowej dodatniej  $U_m^+$ . Jeżeli zmienić kierunek włączenia diod  $D_1$ ,  $D_2$  i  $D_3$  to układ staje się detektorem wartości szczytowej ujemnej  $U_m^-$ .

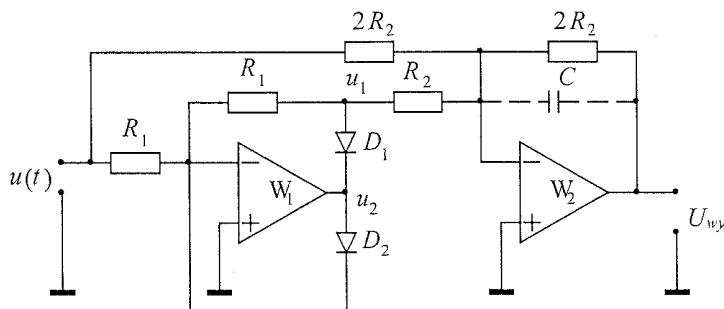
### 1.3.2 Konwertery wartości średniej wyprostowanej

Konwertery wartości średniej zapewniają na swoim wyjściu napięcie, którego składowa stała jest proporcjonalna do wartości średniej  $U_{srw}$  (1.2) napięcia wejściowego  $u(t)$ . Typowe charakterystyki konwertera wartości średniej (jedno- i dwupołówkowego) są przedstawione na rys.1.4.



Rys.1.4 Charakterystyki konwertera jedno-1 i dwupołówkowego-2

Konwertery te są budowane z wykorzystaniem diodowych układów prostowniczych, przy czym zwykle prostowniki diodowe [2, 4] nie zapewniają - zwłaszcza w zakresie małych napięć wejściowych - wymaganej liniowości przetwarzania, ze względu na nieliniową charakterystykę diody, jej prąd wsteczny (ok. 10 nA dla diod Si) i napięcie progowe (ok. 0,5V). Układami pozbawionymi wymienionych wad są tzw. prostowniki aktywne [2, 3, 4], realizowane z wykorzystaniem wzmacniaczy operacyjnych. Jedno z możliwych rozwiązań takiego układu jest przedstawione na rys.1.5. Układ składa się z prostownika jednopółkowego zrealizowanego z wykorzystaniem wzmacniacza  $W_1$  oraz sumatora (na wzmacniaczu  $W_2$ ) sumującego, z odpowiednimi wagami, napięcie wejściowe oraz napięcie wyprostowane jednopółkowo.



Rys.1.5 Schemat aktywnego dwupółkowego konwertera wartości średniej z uziemionym wyjściem

Wzmacniacz  $W_1$ , przy dodatnich napięciach wejściowych, pracuje jako wzmacniacz odwracający; napięcie  $u_2$  jest ujemne, czyli dioda  $D_1$  przewodzi, a dioda  $D_2$  nie przewodzi, wskutek czego  $u_1 = -u(t)$ . Przy ujemnych napięciach wejściowych  $u_2$  jest dodatnie, czyli nie przewodzi dioda  $D_1$  a dioda  $D_2$  przewodzi i obejmuje wzmacniacz ujemnym sprzężeniem zwrotnym dlatego napięcie na jego wejściu odwracającym jest równe zero. Ponieważ dioda  $D_1$  nie przewodzi, to  $u_1$  jest również równe zero. Mamy więc:

$$u_1 = -u(t) \text{ dla } u(t) \geq 0 \quad (1.10a)$$

i

$$u_1 = 0 \text{ dla } u(t) < 0. \quad (1.10b)$$

Zgodnie z powyższym, wzmacniacz  $W_1$  pracuje jako odwracający prostownik jednopółkowy, a wzmacniacz  $W_2$  uzupełnia układ do prostownika dwupółkowego. Na jego wyjściu otrzymujemy:

$$U_{wy} = -[u(t) + 2u_1] \quad (1.11)$$

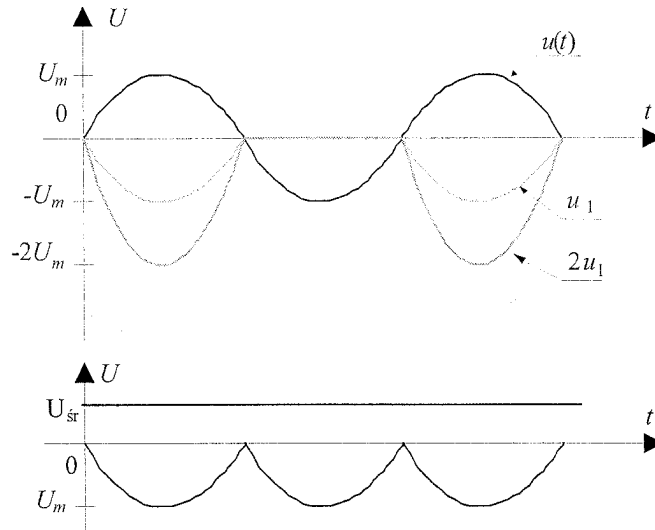
a po uwzględnieniu powyższych założeń

$$U_{wy} = u(t) \text{ dla } u(t) \geq 0 \quad (1.12a)$$

oraz

$$U_{wy} = -u(t) \text{ dla } u(t) < 0. \quad (1.12b)$$

Przebiegi napięć w układzie przedstawiono na rys. 1.6.



Rys.1.6 Przebiegi napięć w charakterystycznych punktach konwertera wartości średniej przy sinusoidalnym napięciu wejściowym

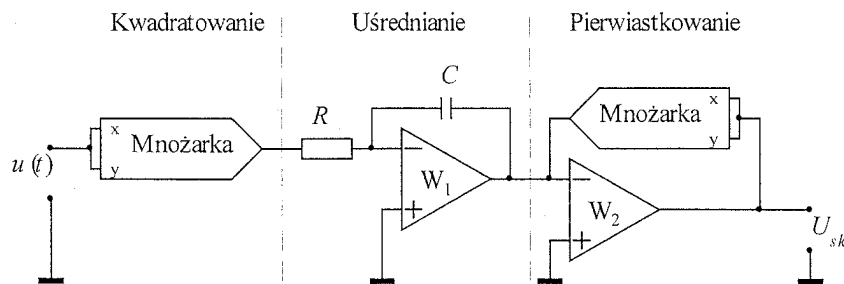
Za pomocą kondensatora  $C$  można przekształcić wzmacniacz  $W_2$  w filtr dolnoprzepustowy pierwszego rzędu. Jeżeli jego częstotliwość graniczna będzie mała w porównaniu z najniższą częstotliwością sygnału, to na wyjściu otrzymamy napięcie stałe o wartości:

$$U_{wy} = |u(t)|_{sr} = U_{srw} \quad (1.13)$$

Wzmacniacz  $W_1$  musi mieć dużą szybkość zmian sygnału na wejściu, by czas martwy przy przełączaniu jednej diody na drugą był jak najmniejszy.

### 1.3.3 Konwertery prawdziwej wartości skutecznej

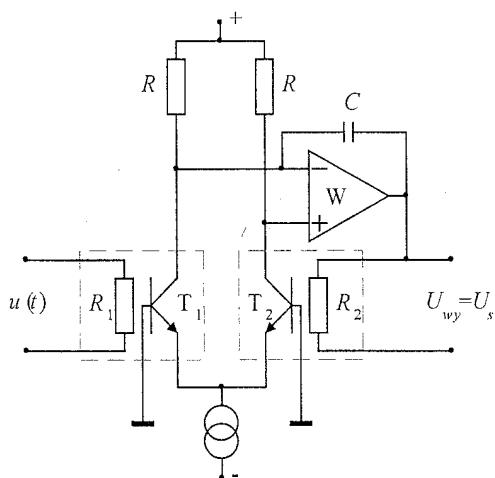
Konwertery wartości skutecznej mogą być budowane z wykorzystaniem analogowych układów funkcyjnych [2] realizujących bezpośrednio równanie definicyjne (1.3). Wadą tego rozwiązania jest mały zakres dynamiczny, co czyni go praktycznie nieprzydatnym przy małych poziomach przetwarzanych napięć.



Rys.1.7 Struktura konwertera wartości skutecznej na funktorach analogowych

Inne znane rozwiązanie takiego konwertera bazuje na komparacji efektów cieplnych [1, 2, 5] wywołanych przez napięcie zmienne i napięcie stałe. Napięcie mierzone  $u(t)$  rozgrzewa rezystor  $R_1$  a stałe napięcie  $U_{wy}$  rezystor  $R_2$ . W obwodzie sterowania włączone są dwa tranzystory  $T_1$  i  $T_2$  reagujące na temperaturę rezystorów  $R_1$  i  $R_2$  oraz wzmacniacz różnicowy, który reguluje temperaturę rezystora  $R_2$  tak by osiągnęła temperaturę rezystora  $R_1$ , co ma miejsce w stanie równowagi mostka złożonego z tranzystorów  $T_1$  i  $T_2$  oraz dwóch

rezystorów  $R$ . W stanie równowagi napięcie stałe na rezystorze  $R_2$  jest równe wartości skutecznej napięcia  $u(t)$  na wejściu układu. Warunkiem poprawnego działania układu jest identyczność dwóch struktur „ tranzystor – rezystor”, ich wzajemna izolacja termiczna oraz izolacja termiczna od otoczenia.



Rys.1.8 Schemat ideowy cieplnego przetwornika prawdziwej wartości skutecznej

We współczesnych multimetrach jako przetwornik *true RMS to DC* stosowane są układy typu „logarytm – alogarytm” [2, 5]. Jeśli we wzorze (1.3) oznaczyć, że

$$\overline{u^2(t)} = \frac{1}{T} \int_0^T u^2(t) dt \quad (1.14)$$

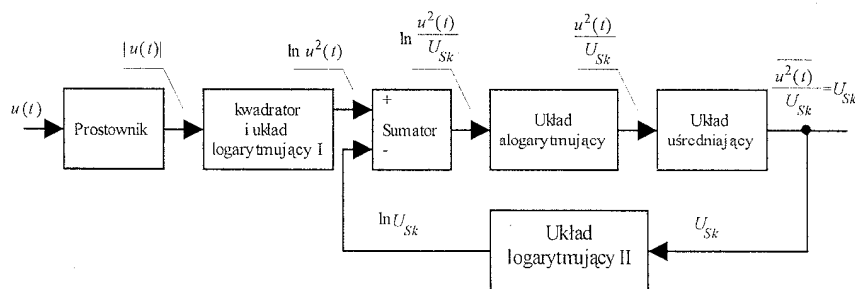
i podnieść obie strony otrzymanego wzoru (1.14) do kwadratu to otrzymamy, że

$$U_{sk} = \frac{\overline{u^2(t)}}{U_{sk}} \quad (1.15)$$

Z wzoru (1.15) wynika, że możliwy jest algorytm zawierający następujący ciąg przetworzeń:

$$u(t) \rightarrow |u(t)| \rightarrow 2 \ln |u(t)| = \ln u^2(t) \rightarrow \left\{ \ln u^2(t) - U_{sk} \right\} = \ln \frac{u^2(t)}{U_{sk}} \rightarrow \frac{u^2(t)}{U_{sk}} \rightarrow \frac{\overline{u^2(t)}}{U_{sk}} = U_{sk} \quad (1.16)$$

Blokowy schemat układu realizującego ciąg przetworzeń (1.16) przedstawiono na rys.1.9. Techniczną realizacją układu jest opisana w [5].



Rys.1.9 Schemat ideowy układu wyznaczającego prawdziwą wartość skuteczną (konwersja *true RMS to DC*) w oparciu o układy wzmacniaczy logarytmujących i delogarytmujących



## 1.4 Konwertery analogowo-cyfrowe

Najczęściej stosowanym w multimetrach cyfrowych małej i średniej dokładności konwerterem analogowo-cyfrowym jest konwerter A/C z dwukrotnym całkowaniem [1, 2], w którym realizowane jest przetwarzanie typu „napięcie-czas”. Atrakcyjność metrologiczna tego typu przetwarzania potwierdza się w bardziej złożonych rozwiązaniach konwerterów o wielokrotnym całkowaniu [1], spośród których do najdokładniejszych należą konwertery typu „delta-sigma” ( $\Delta$ - $\Sigma$ ). Przetwornik A/C budowany jest na napięcie zakresowe możliwie największe, stosowane w elektronice. Typowa wartość napięcia wynosi  $\pm 10$  V. Do wyjątków należą monolityczne, tanie konwertery z dwukrotnym całkowaniem [2] realizowane na napięcie 2 V.

## 1.5 Kilka uwag praktycznych

Przed przystąpieniem do pomiarów parametrów napięcia przemiennego (a tym bardziej napięcia odkształconego) eksperymentator powinien precyzyjnie odpowiedzieć sobie na następujące pytania:

- Jaki parametr napięcia odkształconego może być zmierzony konkretnym woltomierzem?
- Czy woltomierz wskazuje bezpośrednio interesujący eksperymentatora parametr?
- Jeśli na drugie pytanie odpowiedź jest negatywna to w jaki sposób na podstawie wskazań woltomierza oblicza się wartość interesującego eksperymentatora parametru?
- W jaki sposób na podstawie wskazań woltomierza obliczyć wartości innych parametrów?
- W jaki sposób znormalizowany jest błąd woltomierza i jak na podstawie tej normalizacji oblicza się błędy pomiaru?

Większość dostępnych w handlu multimetrów posiada w swej strukturze konwerter AC/DC - wartości średniej wyprostowanej  $U_{srw}$ . Multimetry te są cechowane z uwzględnieniem współczynnika kształtu  $k = 1,11$ , właściwego sinusoidzie. W skutek takiego sposobu pomiaru, dla przebiegu sinusoidalnego wskazują wartość skuteczną (oczywiście z błędem wynikającym z właściwymi sobie błędami instrumentalnymi – addytywnym i multiplikatywnym). W przypadku innego kształtu mierzonego napięcia występują większe lub mniejsze odchyłki od wartości rzeczywistej. Przy przebiegu trójkątnym otrzymujemy  $U_{sk} = (2/\sqrt{3})U_{srw}$ , a w przypadku szumu białego  $U_{sk} = \sqrt{\pi/2}U_{srw}$ , zaś dla przebiegu prostokątnego i napięcia stałego mamy  $U_{sk} = U_{srw}$ .

Błąd dodatkowy, zwany błędem od kształtu krzywej  $\gamma_k$ , występujący w sytuacji gdy użyjemy multimetr z konwerterem wartości średniej do pomiarów wartości skutecznej napięcia o innym kształcie niż sinusoidalny szacuje się z wzoru:

$$\gamma_k = \frac{1,11U_{srw} - U_{sk}}{U_{sk}} = \frac{1,11 - k}{k} \quad (1.17)$$

Obliczona, z obciążonego błędem od kształtu krzywej wyniku wartości skutecznej, wartość średnia  $U_{srw} = U_{sk}/1,11$  jest obciążona jedynie błędem podstawowym.

Warto zauważyć, że również multimetry prawdziwej wartości skutecznej wykazują pewną wrażliwość na kształt przebiegu. Ta niedoskonałość przyrządu jest charakteryzowana za pomocą błędu dodatkowego, uzależnionego od współczynnika szczytu (*crest factor*) mierzonego napięcia. Dane o błędzie dodatkowym zależnym od współczynnika szczytu podaje wytwórca w dokumentacji multimetru.

Szacowanie błędów podstawowych występujących przy pomiarach multimetrycznych odbywa się z uwzględnienie zarówno składowej multiplikatywnej (błąd czułości) jak też składowej addytywnej (błąd zera), które w prawidłowo skonstruowanym mierniku mają

wartości współmierne. Składowa multiplikatywna „a” ma charakter błędu analogowego i wynika z niedoskonałości układów analogowych multimetru, składowa addytywna „b” ma charakter błędu cyfrowego i wynika z procesu konwersji analogowo-cyfrowej.

Dokładność multimetrów cyfrowych przez różnych producentów charakteryzowana jest dwojako: w postaci  $\pm a\%U_x \pm b\%U_{zakr}$  (ang.  $\pm a\%$  of reading  $\pm b\%$  of range) lub w postaci  $\pm a\%U_x \pm z$  (ang.  $\pm a\%$  reading  $\pm z$  digit), gdzie  $z$  – liczba najmniej znaczących cyfr odczytanych z wyświetlacza na danym zakresie pomiarowym.

W pierwszym przypadku graniczne błędy pomiaru: bezwzględny  $\Delta$  i względny  $\gamma$  multimetrów oblicza się odpowiednio z wzoru (1.18) i wzoru (1.19),

$$\Delta = \frac{a\%}{100}U_x + \frac{b\%}{100}U_{zakr} \quad (\text{w woltach}), \quad (1.18)$$

$$\gamma = \frac{\Delta}{U_x}100\% = a\% + b\%\frac{U_{zakr}}{U_x} \quad (\text{w procentach}). \quad (1.19)$$

W drugim przypadku należy korzystać z następujących wzorów:

$$\Delta = \frac{a\%}{100}U_x + z \quad (\text{w woltach}), \quad (1.20)$$

$$\gamma = \frac{\Delta}{U_x}100\% = a\% + \frac{z}{U_x}100\% \quad (\text{w procentach}). \quad (1.21)$$

## 1.6 Badanie dokładności multimetru napięcia zmiennego

Procedura badania dokładności przewiduje pełne sprawdzenie wskazań na zakresie podstawowym i wrywkowe sprawdzenie na innych zakresach. Zakresem podstawowym jest podzakres, na którym multimetr charakteryzuje się najmniejszym błędem. Sprawdzenie na podzakresie podstawowym wymaga sprawdzenia wszystkich wskazań, które tworzą ciąg liczbowy typu  $(N \times 11111..)$ , gdzie  $N$  jest liczbą naturalną o wartościach 0, 1, 2, ..., 9. Jeżeli podzakresy są takie, że górna granica wskazań jest większa niż nominalna górna granica zakresu pomiarowego, to wykonuje się dodatkowo sprawdzenie dla wskazania np.  $10 \times 11111..$ , lub jeszcze większego.

Błędy dopuszczalne multimetru są z zasady większe niż jednostka kwantyzacji na danym podzakresie. Z tego względu przy badaniu dokładności można praktycznie traktować wskazania multimetru jako zmienną ciągłą a nie skwantowaną, a więc nieciągłość wskazań wynikającą ze „skwantowania” można zignorować,

Tak więc błąd bezwzględny multimetru  $\Delta_{pk}$  dla  $k$ -tego wskazania na zakresie podstawowym obliczymy jako różnic

$$\Delta_{pk} = W_{xpk} - W_{wk}, \quad (1.22)$$

gdzie:

$W_{xpk}$  – wskazanie multimetru badanego,

$W_{wk}$  – wskazanie multimetru wzorcowego odpowiadające  $k$  – temu wskazaniu multimetru wzorcowego na zakresie podstawowym.

Wrywkowe badanie błędów na pozostałych podzakresach powinny pokrywać się cyfrowo (co do cyfr, bo wartość danego wskazania na różnych podzakresach będzie różna) ze wskazaniami na podzakresie podstawowym, dla którego wykonano już sprawdzenie. Ponieważ podzakresy są tworzone za pomocą dzielników lub wzmacniaczy, więc z tego powodu rozkład błędów powinien być tego samego kształtu co na zakresie podstawowym.

Wartości błędów na pozostałych podzakresach mogą natomiast zmieniać się w stosunku do błędów podzakresu podstawowego proporcjonalnie do błędów skali (spowodowanego błędem dzielnika lub błędem wzmocnienia) lub mogą się zmieniać o wartość błędu zera. Na takiej podstawie możemy wypowiedzieć się o dokładności przyrządu na całym podzakresie, mimo że wykonaliśmy fizycznie sprawdzenie tylko dla jednego wskazania. Tak więc jeżeli dla  $k$  – tego wskazania  $W_{xnk}$  na zakresie  $n$  stwierdziliśmy błąd wskazania  $\Delta_{nk}$  to dla wszystkich pozostałych wskazań  $W_{xni}$  podzakresu  $n$  błędy wskazań będą takie jak na zakresie podstawowym dla odpowiednich wskazań lecz skorygowane o poprawkę  $p$  równą

$$p = \frac{W_{xni}}{W_{xpk}} (\Delta_{ni} - \Delta_{pk}). \quad (1.23)$$

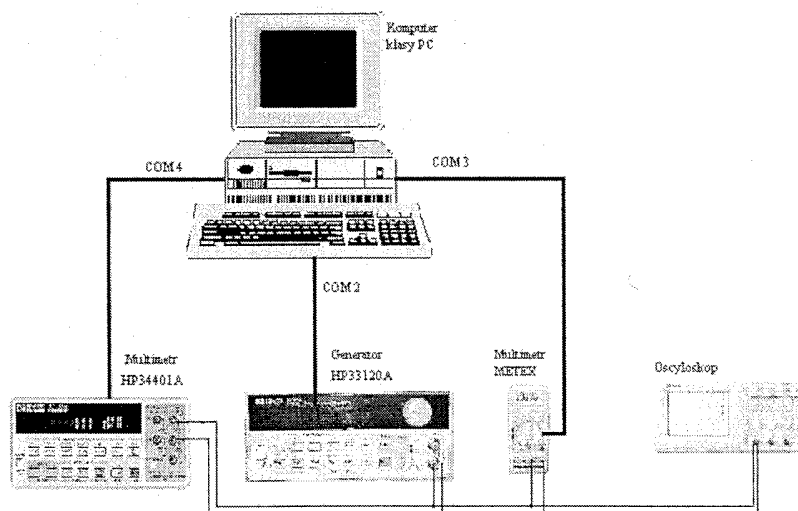
Składowa błędu wynikająca ze zmiany zakresu jest proporcjonalna do wskazania.

Wielkością wpływową dla funkcji pomiaru napięcia jest częstotliwość, której wartość znormalizowana wynosi 100 Hz lub 1000 Hz. Ze względów praktycznych nie można konstruować multimetrów do pomiarów napięcia tylko jednej częstotliwości. Z tego względu przypisuje się danemu multimetrowi błąd dopuszczalny taki, żeby poprawnie charakteryzował on dokładność wskazań multimetru w określonym paśmie częstotliwości mierzonego napięcia. Takich pasm częstotliwości i odpowiednich dla nich wartości błędów dopuszczalnych wytwórca może podać kilka wartości błędu dopuszczalnego.

## 2. OPIS STANOWISKA LABORATORYJNEGO

Konfiguracja stanowiska laboratoryjnego jest przedstawiona na rys.2.1. Zastosowano standardową aparaturę w postaci multimetru HP 3401A - mierzącego prawdziwą wartość skuteczną (ang. *true RMS*) napięcia przemiennego – pełniącego na stanowisku funkcję przyrządu wzorcowego oraz multimetru METEX 3850 reagującego na wartość średnią ale wyskalowanego w wartościach skutecznych. Multimetr METEX jest przyrządem badanym.

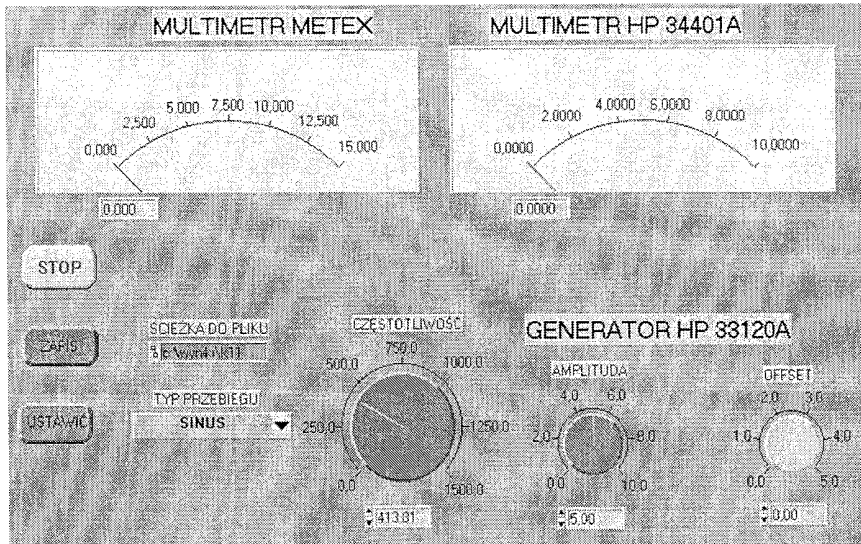
Źródłem napięcia mierzonego jest programowany generator HP 33120A, którego przebiegi (sinusoidalny, prostokątny, trójkątny, piłokształtny) obserwuje się na cyfrowym oscyloskopie próbującym. Na stanowisku pomiarowym znajdują się instrukcje firmowe przyrządów wchodzących w jego skład.



Rys. 2.1 Schemat połączeń przyrządów na stanowisku laboratoryjnym

Jednoczesne podłączenie do komputera osobistego trzech przyrządów pomiarowych, myszy i klawiatury umożliwiła, odpowiednio skonfigurowana karta rozszerzająca I/O zawierająca dwa dodatkowe porty COM 3 i COM 4.

Sterowanie stanowiskiem odbywa się dzięki zainstalowaniu w komputerze programu eksperymentu napisanego w środowisku *LabVIEW for Windows*. Generator został zaprogramowany do pełnienia funkcji odbiorcy informacji z komputera, zaś multimetry zaprogramowano do pełnienia funkcji nadawcy wyników pomiarów do komputera.



2.2 Panel sterujący pracą stanowiska laboratoryjnego

Widok panelu sterującego pracą stanowiska jest przedstawiony na rys.2.2. Panel, stanowiący przyjazny interfejs użytkownika, zawiera w swej górnej części analogowe i cyfrowe urządzenia odczytowe multimetrów. W dolnej części panelu znajdują się urządzenia nastawcze, umożliwiające zaprogramowanie generatora do generowania na swoim wyjściu sinusoidalnego, prostokątnego, trójkątnego lub piłokształtnego napięcia (TYP PRZEBIEGU) o zadanej amplitudzie (AMPLITUDA), częstotliwości (CZĘSTOTLIWOŚĆ) i składowej stałej (OFFSET). Przyciski STOP, ZAPIS, USTAWIĆ sterują pracą stanowiska.

### 3. ZADANIA POMIAROWE

#### 3.1 Czynności wstępne

- Sprawdzić poprawność połączeń układu pomiarowego z rys.2.1. Zwrócić uwagę czy komputer i wszystkie przyrządy na stanowisku zasilane są z tej samej listwy zasilającej oraz czy zacisk LO Multimetru HP jest połączony z zaciskiem COM Multimetru METEX oraz, odpowiednio, zacisk HI jest połączony z zaciskiem V/ $\Omega$ .
- Zapoznać się z firmowymi instrukcjami obsługi multimetrów w zakresie niezbędnym do wykonania ćwiczenia. Z danych technicznych multimetrów wynotować informacje charakteryzujące ich błędy na stosowanych w ćwiczeniu zakresach pomiarowych. Zwrócić uwagę na zapisy dotyczące wpływu częstotliwości napięcia, jego kształtu oraz ewentualnej obecności składowej stałej.
- Włączyć komputer i zaczekać na uruchomienie się programu Windows.
- Włączyć zasilanie multimetrów i ustawić je do pomiarów napięć przemiennych (AC V). Multimetr METEX ustawić na zakres 20 V i uaktywnić port RS 232C przyciskiem COM. Multimetr HP 34401A ustawić w trybie ręcznego wyboru zakresu na 10 V.

- e) Włączyć generator HP 33120A  
 f) Uruchomić program sterujący pracą stanowiska za pomocą ikony skrótu CW\_32 i odczekać na pojawienie się na ekranie monitora panelu sterującego z rys.2.2.  
 g) Klikając symbol strzałki w pasku narzędzi przełączyć program sterujący z trybu „edycji”



w tryb „działania”



- h) Sprawdzić poprawność działania generatora klikając przycisk USTAWIĆ (na wyświetlaczu powinien pojawić się napis „Rmt” oznaczający, że generator przełączył się w tryb pracy zdalnej) i transmisji wyników pomiarów z multimetrów do komputera.  
 i) Wprowadzić własną nazwę pliku do zapisywania danych (8 znaków) z rozszerzeniem TXT. Otrzymywane wyniki pomiarów zapisywać do pliku dyskowego (przycisk ZAPIS). Sprawdzić poprawność zapisanych danych otwierając plik z danymi programem NOTATNIK z systemu Windows. Wyniki pomiarów zapisywane są w postaci tekstowej. Każdorazowe naciśnięcie przycisku ZAPIS powoduje jednorazowe zapisanie wyniku pomiarów do pliku.

### 3.2 Pomiary parametrów napięcia sinusoidalnego

- a) Zaprogramować generator do generowania napięcia sinusoidalnego  $u(t) = U_m \sin 2\pi ft$  o częstotliwości  $f = 50$  Hz, zerowej składowej stałej i amplitudzie wskazanej przez prowadzącego ćwiczenie. Obliczyć na podstawie definicji i zanotować wartość skuteczną  $U_{sk} = \dots$  i wartość średnią wyprostowaną  $U_{srw} = \dots$  zaprogramowanego przebiegu.  
 b) Dobierając najkorzystniejsze zakresy multimetrów dokonać pomiaru wartości skutecznej zaprogramowanego przebiegu i zanotować wskazania obydwu mierników  $U_{Metex} = \dots$  V. i  $U_{HP} = \dots$  V. Na podstawie wskazania multimetru METEX obliczyć wartość średnią wyprostowaną zaprogramowanego przebiegu  $U_{srw}^* = \dots$  i porównać ją z wartością obliczoną w p.3.2a).  
 c) Korzystając z danych zawartych w dokumentacji technicznej multimetrów obliczyć bezwzględne i względne błędy pomiarów i zapisać wyniki pomiarów stosując reguły zaokrąglania wyniku i błędu pomiaru.  
 d) Uzyskane wyniki obliczeń i pomiarów zamieść w tabeli. Tabelę uzupełnić, obliczonymi w oparciu o wyniki pomiarów, wartościami, współczynnika kształtu  $k^*$ , amplitudy  $k_a^*$  i uśredniania  $k_u^*$ . W obliczeniach amplitudę  $U_m$  przyjmować na podstawie wartości zaprogramowanej.

Przebieg mierzony	$U_m$	$f$	Wartości obliczone			Wsk. multimetr.		Eksp. wartość $U_{srw}^*$	Wyzn. eksperyment. współczynniki		
			$U_{sk}$	$U_{sr}$	$U_{srw}$	Metex	HP		$k^*$	$k_a^*$	$k_u^*$
	V	Hz	V	V	V	V	V	V	-	-	-
sinus				0							

- e) Uzyskane wartości współczynników  $k^*$ ,  $k_a^*$ , i  $k_u^*$  porównać z wartościami odpowiadających im z tabeli 1.

### 3.3 Pomiary parametrów napięcia odkształconego

- Sporządzić tabelę, analogiczną do tabeli 1, dla trzech przebiegów napięcia odkształconego (prostokątnego, trójkątnego i piłokształtnego) nie zawierającego składowej stałej. (*Punkt ten należy wykonać w ramach przygotowania się do zajęć i przed ćwiczeniem przedstawić prowadzącemu zajęcia.*)
- Programując kolejno generator do generowania napięcia odkształconego (prostokątnego, trójkątnego i piłokształtnego) o amplitudach i częstotliwościach identycznych jak w p. 3.2a) wykonać pomiary analogiczne do opisanych w pp. 3.2b) ÷ 3.2e).
- Obliczyć błędy od kształtu krzywej, którym obciążone są wskazania multimetru METEX.

### 3.4 Wyznaczanie współczynnika skali bloku kondycjonowania multimetru METEX

- Zaprogramować generator do generowania napięcia sinusoidalnego o wartości (np. około 5 V) kwalifikującej się do pomiarów Multimetrem METEX na zakresie 20 V i częstotliwości (np. około 100 Hz) leżącej w paśmie znamionowym tego multimetru.
- Odczytać i zanotować wskazania obydwu multimetrów  $U_{1HP} = \dots$  i  $U_{1Metex} = \dots$
- Przeprogramować generator tak by na jego wyjściu było napięcie o wartości około dziesięciokrotnie mniejszej niż wartość napięcia ustawionego w p.3.4a).
- Przełączyć multimetr METEX na zakres 2 V i doregulować napięcie generatora tak by wskazanie badanego multimetru wyrażało się tymi samymi cyframi jak w p. 3.4b) to znaczy aby  $U_{2Metex} = \frac{1}{10} U_{1Metex}$ .
- Odczytać wskazanie Multimetru HP  $U_{2HP} = \dots$  i obliczyć współczynnik skali K bloku kondycjonowania multimetru badanego  $K = \frac{U_{1HP}}{U_{2HP}}$ .
- Procedurę wyznaczania współczynnika skali (pp. 3.4a ÷ 3.4e) powtórzyć dla napięcia prostokątnego.

### 3.5 Wyznaczanie błędu częstotliwościowego multimetru METEX

Błąd częstotliwościowy Multimetru METEX wyznaczyć dla warunków opisanych w p.3.4a).

- Korzystając z danych zanotowanych w p. 3.4b) obliczyć eksperymentalny błąd podstawowy  $\Delta^*$  multimetru METEX  $\Delta^* = U_{1Metex} - U_{1HP}$ . Uzyskaną wartość błędu  $\Delta^*$  porównać z wartością teoretyczną  $\Delta$  obliczoną na podstawie wzoru (1.20).
- Zmieniając stopniowo częstotliwość napięcia probierczego tak, żeby „obłożyć” całe pasmo częstotliwości wyróżnione w dokumentacji badanego multimetru, utrzymywać stałe (takie samo) jego wskazanie  $U_{1Metex}$  i odczytywać wskazania  $U_{HP}(f)$  Multimetru HP w funkcji częstotliwości. Stałość wskazania multimetru badanego osiągać poprzez stopniowe, nieznaczne doregulowywanie wartości napięcia probierczego.
- Narysować charakterystykę bezwzględnego sumarycznego  $\Delta_{\Sigma}^*$  błędu eksperymentalnego  $\Delta_{\Sigma}^* = U_{1Metex} - U_{HP}(f)$  i określić jego wartość maksymalną  $\Delta_{\Sigma \max}^*$
- Obliczyć błąd dodatkowy od częstotliwości  $\Delta_{df} = \Delta_{\Sigma \max}^* - \Delta^*$  i porównać obliczoną wartość z wartością dopuszczalną, określoną w dokumentacji.

#### 4. WYKONANIE SPRAWOZDANIA

W sprawozdaniu należy zamieścić:

- dokładne schematy połączeń układów pomiarowych z zaznaczeniem zacisków LO (COM) i HI,
- charakterystykę metrologiczną użytej w ćwiczeniu aparatury uwzględniającą zakresy pomiarowe, pasma częstotliwości oraz znormalizowaną dokładność,
- wzory niezbędne do przeprowadzenia obliczeń,
- krótki opis postępowania przy wykonywaniu poszczególnych pomiarów,
- tabele z cząstkowymi wynikami pomiarów oraz wynikami obliczeń uzupełnione przykładami ilustrującymi sposób dokonywania tych obliczeń,
- wyniki pomiarów wraz z oszacowaniem ich błędów lub niepewności z uwzględnieniem przyjętych zasad zaokrąglania,
- uzyskane w wyniku pomiarów wykresy i charakterystyki wraz ze zwięzłą ich interpretacją,
- uwagi i wnioski dotyczące wykonanych pomiarów.

#### Literatura

- [1] Stabrowski M., Cyfrowe przyrządy pomiarowe, Wydawnictwo Naukowe PWN, Warszawa 2002 r.  
 [2] Tumański S., Technika pomiarowa, Wydawnictwa Naukowo-Techniczne, Warszawa 2007 r.  
 [3] Marcyniuk A., Podstawy miernictwa elektrycznego dla kierunku elektronika, Wyd. Pol.Śl., Gliwice 2002r.  
 [4] Dusza J., Gortat G., Leśniewski A., Podstawy miernictwa, Oficyna Wydawnicza P.W., Warszawa 2003 r.  
 [5] RMS to DC Conversion Application Guide, Dnalog Devices

#### Pytania i inne problemy

1. Przedstawić procedurę obliczania wszystkich zdefiniowanych w p. 1.1 parametrów napięcia sinusoidalnego  $u(t) = U_m \sin \omega t$ .
2. Przygotować tabelę, analogiczną do tabeli 1, dla trzech przebiegów napięcia odkształconego (prostokątnego, trójkątnego i piłokształtnego) nie zawierającego składowej stałej.
3. Jaka jest różnica w budowie multimetrów przystosowanych do pomiarów wartości skutecznej napięcia zmiennego ze składową stałą i multimetrów przeznaczonych do pomiarów napięcia zmiennego nie zawierającego składowej stałej?
4. Jaka jest różnica w budowie multimetrów przeznaczonych do pomiaru wartości skutecznej napięcia sinusoidalnego i multimetrów przeznaczonych do pomiarów wartości skutecznej napięcia odkształconego?
5. Podać schematy i zasadę działania biernych konwerterów wartości maksymalnej: szeregowego (z otwartym wejściem) i równoległego (z zamkniętym wejściem)
6. Podać schemat i zasadę działania aktywnego konwertera wartości maksymalnej.
7. Podać schemat omówić właściwości biernego, dwupołkowego konwertera wartości średniej wyprostowanej.
8. Podać schemat i omówić właściwości aktywnego konwertera wartości średniej wyprostowanej z nie uziemionym wyjściem.
9. Podać schemat i omówić właściwości aktywnego konwertera wartości średniej wyprostowanej z uziemionym wyjściem.
10. Podać zasadę realizacji funkcyj analogowych wchodzących w skład konwerterów *true RMS to DC* z rys. 1.7 oraz z rys. 1.9.
11. Objąć zachowanie się multimetru z konwerterem wartości średniej wyprostowanej w przypadku włączenia na jego wejście napięcia stałego.
12. Jakie są przyczyny ograniczenia zastosowań multimetrów przeznaczonych do pomiarów wartości skutecznej napięcia zmiennego