

Laboratorium Podstaw Pomiarów

# Podstawy Elektroniki i Pomiarów 2 – laboratorium

## Ćwiczenie T5

### Prostownik jedno- i dwupołówkowy

#### Instrukcja

Opracował:

dr hab. inż. Tomasz Osuch, prof. uczelni



Instytut Systemów Elektronicznych  
Wydział Elektroniki i Technik Informatycznych

Warszawa 2024

v. 2.1  
(08.04.2024)



Fundusze Europejskie  
Wiedza Edukacja Rozwój

Politechnika  
Warszawska

Unia Europejska  
Europejski Fundusz Społeczny





## Ćwiczenie T5

### Prostownik jedno- i dwupołówkowy

#### 1. Cel ćwiczenia

Celem ćwiczenia jest zapoznanie studentów z metodami pomiaru napięć przemiennych, w szczególności z wykorzystaniem przetworników wartości średniej wyprostowanej.

#### 2. Tematyka ćwiczenia

- badanie właściwości przetworników wartości średniej wyprostowanej, w szczególności układów prostowniczych: jednopółkowego i dwupołówkowego,
- projekt i realizacja woltomierza z przetwornikiem wartości średniej wyprostowanej wywzorcowanego w wartościach skutecznych napięcia sinusoidalnego,
- badanie właściwości zrealizowanego woltomierza.

#### 3. Umiejętności zdobywane przez studentów

- umiejętność wykorzystania podstawowej aparatury pomiarowej do obserwacji działania prostowników jedno- i dwupołówkowych,
- umiejętność prawidłowej interpretacji otrzymanych wyników i porównania ich z wartościami teoretycznymi,
- umiejętność zaprojektowania i wzorcowania woltomierza z przetwornikiem wartości średniej wyprostowanej wywzorcowanego w wartościach skutecznych napięcia sinusoidalnego.

#### 4. Teoria

Tematyka ćwiczenia jest związana z metodami pomiaru parametrów pewnej klasy sygnałów przemiennych – sygnałów okresowych, w szczególności harmonicznym (sinusoidalnym). W ogólnym przypadku tego typu sygnały składają się ze **składowej przemiennnej** oraz **składowej stałej**. Składowa stała sygnału jest to jego wartość średnia za okres, którą najprościej można zmierzyć stosując analogowy woltomierz napięcia stałego (np. magnetoelektryczny, który reaguje na wartość średnią sygnału) lub cyfrowy w trybie DC.

Do pełnego opisu właściwości energetycznych sygnału niezbędne jest zapoznanie się z kilkoma ważnymi pojęciami, do których należy zaliczyć: **wartość średnią**, **wartość średnią wyprostowaną**, **wartość skuteczną** oraz **wartość szczytową i międzyszczytową**.



**Wartość średnia**  $U_0$  sygnału okresowego  $u(t)$  określona jest następującą zależnością:

$$U_0 = \frac{1}{T} \int_{t_0}^{t_0+T} u(t) dt \quad (5-1)$$

gdzie  $T$  jest okresem sygnału. Zatem  $U_0$  jest wartością średnią za okres sygnału  $u(t)$ . Może przyjmować wartości dodatnie oraz ujemne.

**Wartość średnia wyprostowana**  $U_{0w}$  sygnału o okresie  $T$  wyraża się wzorem

$$U_{0w} = \frac{1}{T} \int_{t_0}^{t_0+T} |u(t)| dt \quad (5-2)$$

Z kolei **wartość skuteczną**  $U$  przedbiegu okresowego określa zależność

$$U = \sqrt{\frac{1}{T} \int_{t_0}^{t_0+T} [u(t)]^2 dt} \quad (5-3)$$

Wartość skuteczna napięcia zmiennego jest równa wartości napięcia stałego, przy której wydzielili się (w postaci ciepła) tyle samo energii, co dla danego napięcia zmiennego  $u(t)$  w tym samym czasie i na takiej samej rezystancji.

**Wartość szczytowa**  $U_m$  sygnału okresowego to największa wartość chwilowa sygnału dla jednego okresu.

$$U_m = \max_{\langle t_0, t_0+T \rangle} u(t) \quad (5-4)$$

**Wartość międzyszczytowa**  $U_{pp}$  to różnica pomiędzy maksymalną i minimalną wartością sygnału zdefiniowana jako

$$U_{pp} = \max_{\langle t_0, t_0+T \rangle} u(t) - \min_{\langle t_0, t_0+T \rangle} u(t) \quad (5-5)$$

Na podstawie powyższych parametrów sygnałów okresowych definiowane są następujące współczynniki:

– **współczynnik kształtu**

$$k = \frac{U}{U_{0w}} \quad (5-6)$$

– **współczynnik amplitudy**

$$k_a = \frac{U_m}{U} \quad (5-7)$$

– **współczynnik uśrednienia**

$$k_u = \frac{U_m}{U_{0w}} \quad (5-8)$$



Znajomość tych współczynników pozwala na wzorcowanie przyrządów pomiarowych, czyli przypisanie wskazaniami wartości odpowiednich parametrów, np. zdefiniowanych wzorami (5-1) ÷ (5-5). Wartości współczynników zależą od kształtu sygnału. Dla sygnału sinusoidalnego są one odpowiednio równe

$$k = \frac{\pi}{2\sqrt{2}} \approx 1,11 \quad k_a = \sqrt{2} \approx 1,41 \quad k_u = \frac{\pi}{2} \approx 1,57 \quad (5-9)$$

W przypadku, gdy sygnał poza składowymi sinusoidalnymi ( $U_n$ ) posiada składową stałą ( $U_0$ ), tj.  $u(t) = U_0 + \sum_{n=1}^N U_n \cdot \sin(n\omega t)$ , wówczas wartość skuteczna całego sygnału wyrażona jest wzorem

$$U = \sqrt{U_0^2 + \frac{1}{2} \sum_{n=1}^N U_n^2} \quad (5-10)$$

gdzie  $U_0$  jest składową stałą, a  $U_n$  amplitudą  $n$ -tej składowej sinusoidalnej.

Dla przykładu, gdy sygnał składa się ze składowej stałej  $U_0$  i jednej składowej sinusoidalnej o amplitudzie  $U_1$ , to wartość skuteczna wyrażona jest wzorem

$$U = \sqrt{U_0^2 + \frac{1}{2} U_1^2} \quad (5-11)$$

Pomiar parametrów napięć przemiennych polega w istocie na zastosowaniu odpowiedniego przetwornika, na wyjściu którego otrzymujemy sygnał o wartości średniej proporcjonalnej do jednego z trzech parametrów: wartości szczytowej, skutecznej lub średniej wyprostowanej. Zatem w konstrukcji woltomierza napięcia zmiennego można wyróżnić trzy podstawowe bloki funkcjonalne:

- **układ wejściowy** – służący zapewnieniu odpowiednio dużej impedancji wejściowej woltomierza (aby zminimalizować błąd metody) oraz umożliwiający zmianę zakresu pomiarowego,
- **przetwornik** – zamieniający wejściowe napięcie zmienne na sygnał o niezerowej wartości średniej, proporcjonalnej do wartości średniej wyprostowanej, skutecznej lub szczytowej napięcia wejściowego, zależnie od konstrukcji przetwornika,
- **wskaźnik** – odpowiedzialny za pomiar napięcia lub prądu wyjściowego oraz wizualizację wyniku. Jest to zwykle miliamperomierz lub woltomierz napięcia stałego (reagujące na wartość średnią sygnału).

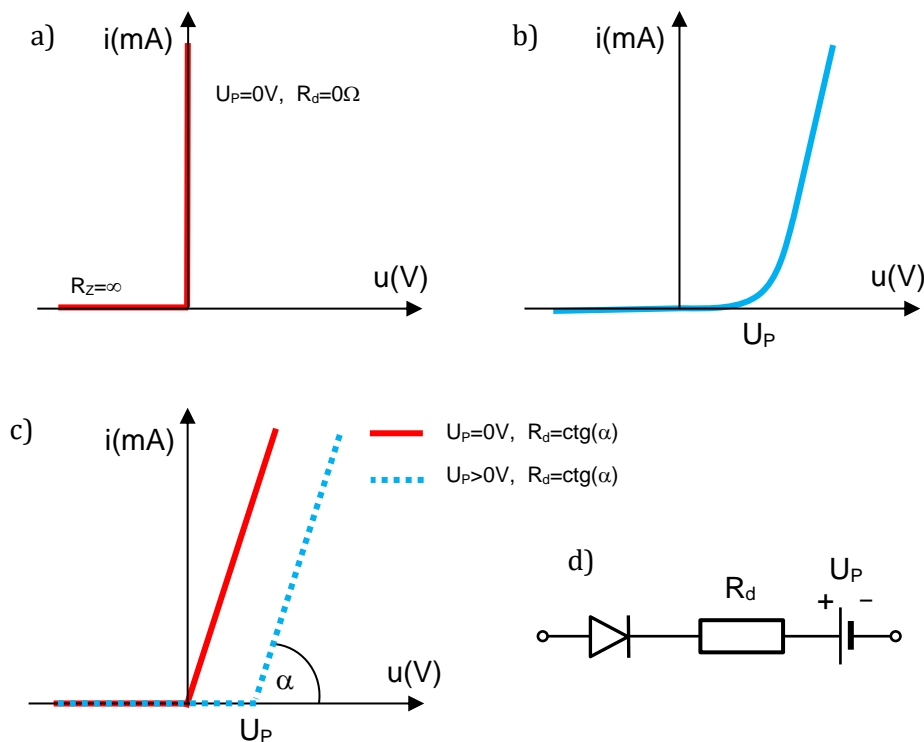
Bez względu na rodzaj zastosowanego przetwornika (np. szczytowy, wartości średniej wyprostowanej) istnieje możliwość wywzorcowania woltomierza tak, aby wielkością wskazywaną była wartość średnia wyprostowana, szczytowa lub skuteczna napięcia

wejściowego. W tym celu wykorzystuje się współczynniki: kształtu, amplitudy oraz uśrednienia.

Przeważająca większość woltomierzy jest wywzorcowana w wartościach skutecznych dla przebiegu sinusoidalnego. Jeśli woltomierz jest tak skonstruowany, że reaguje na wartość skuteczną, czyli wynik pomiaru wartości skutecznej jest niezależny od kształtu przebiegu, to w opisie przyrządu jest zawarte określenie *TRUE RMS*.

#### 4.1. Przetwornik wartości średniej wyprostowanej

Przetwornik wartości średniej wyprostowanej jest jednym z najprostszych rodzajów przetworników, w którym wykorzystuje się właściwości prostownicze diody półprzewodnikowej. Podstawowe właściwości diody idealnej, to zerowa rezystancja dynamiczna w kierunku przewodzenia  $R_d$  oraz nieskończenie duża w kierunku zaporowym  $R_z$ . Przykładowa charakterystyka prądowo-napięciowa takiej diody została przedstawiona na Rys. 5.1a.



Rys. 5.1. Charakterystyki prądowo-napięciowe diody:

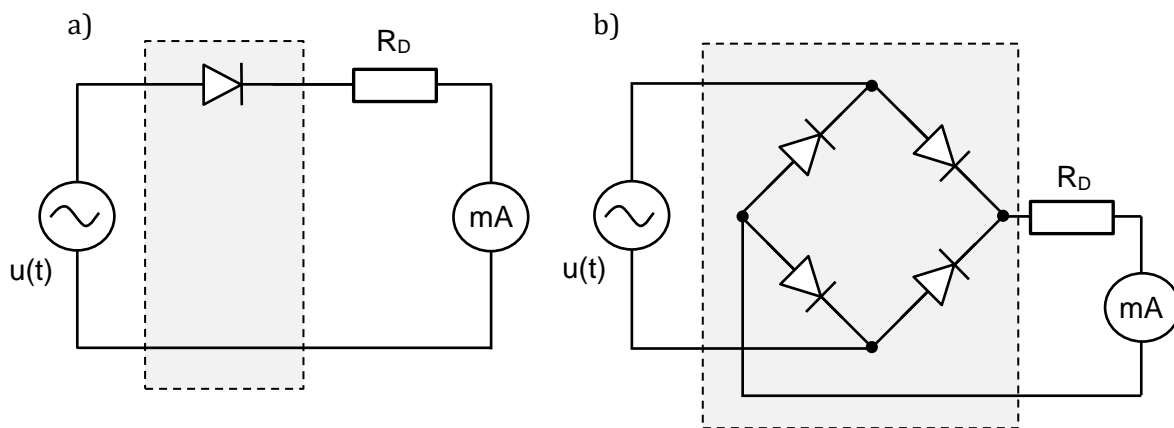
a) idealnej, b) rzeczywistej, c) rzeczywistej z aproksymacją odcinkowo-liniową, d) schemat zastępczy diody o charakterystyce odcinkowo-liniowej.

Dioda idealna przewodzi jedynie część sygnału o wartości chwilowej napięcia większej od zera. W rzeczywistości jednak dioda posiada pewną niewielką rezystancję dynamiczną w kierunku przewodzenia  $R_d$  oraz bardzo dużą (ale skończoną) w kierunku zaporowym  $R_z$ . Ponadto dioda rzeczywista charakteryzuje się tzw. **napięciem progowym**  $U_P$ , które wynosi ok.  $0,6\text{ V} \div 0,7\text{ V}$  w przypadku popularnych diod krzemowych oraz ok.  $0,2\text{ V} \div 0,3\text{ V}$  w przypadku diod germanowych. Zatem dioda



rzeczywista przewodzi jedynie część sygnału o wartości chwilowej napięcia większej od jej napięcia progowego  $U_P$ . Ponadto w zakresie niewielkich wartości napięć charakterystyka prądowo-napięciowa diody jest nieliniowa, co zilustrowano na Rys. 5.1b. Często wygodne jest przybliżenie rzeczywistej charakterystyki prądowo-napięciowej diody charakterystyką odcinkowo-liniową (Rys. 5.1c). W tym przypadku wartość rezystancji w kierunku przewodzenia  $R_d$  określa nachylenie charakterystyki prądowo-napięciowej dla napięć większych niż  $U_P$ . Dla diod elektroluminescencyjnych LED (ang. *light-emitting diode*) wartość napięcia progowego  $U_P$  jest kilkukrotnie większa niż w diodach krzemowych i zależy od długości fali emitowanego promieniowania (koloru świecenia).

Dwa podstawowe i badane w niniejszym ćwiczeniu układy przetworników wartości średniej wyprostowanej, to **układ jednopełwkowy** oraz **dwupełwkowy** (tzw. układ Graetza), które przedstawiono na Rys. 5.2.



Rys. 5.2. Przetworniki diodowe wartości średniej wyprostowanej:  
a) jednopełwkowy, b) dwupełwkowy (układ Graetza).

Rezystor  $R_D$  służy do linearyzacji charakterystyki diody, a jednocześnie do ograniczenia prądu. Miliamperomierz magnetoelektryczny (lub cyfrowy miliamperomierz prądu stałego) reaguje na wartość średnią (składową stałą) przepływającego przez niego prądu, a więc na wartość średnią wyprostowaną sygnału wejściowego.

W przypadku przetwornika dwupełwkowego zależność pomiędzy prądem wyjściowym a wejściowym napięciem przemiennym  $u(t)$  przy założeniu idealnych diod ( $U_P = 0$  V oraz  $R_d = 0$   $\Omega$ ) można zapisać w postaci wzoru

$$i(t) = \frac{|u(t)|}{R_D} \quad (5-12)$$

Zatem w zapisie matematycznym przetwornik ten realizuje funkcję „moduł”. Dołączony do wyjścia miliamperomierz mierzy wartość średnią prądu  $i(t)$ . Dla wejściowego napięcia sinusoidalnego  $u(t) = U_m \sin(\omega t)$  o amplitudzie  $U_m$  w układzie płynie prąd zmienny



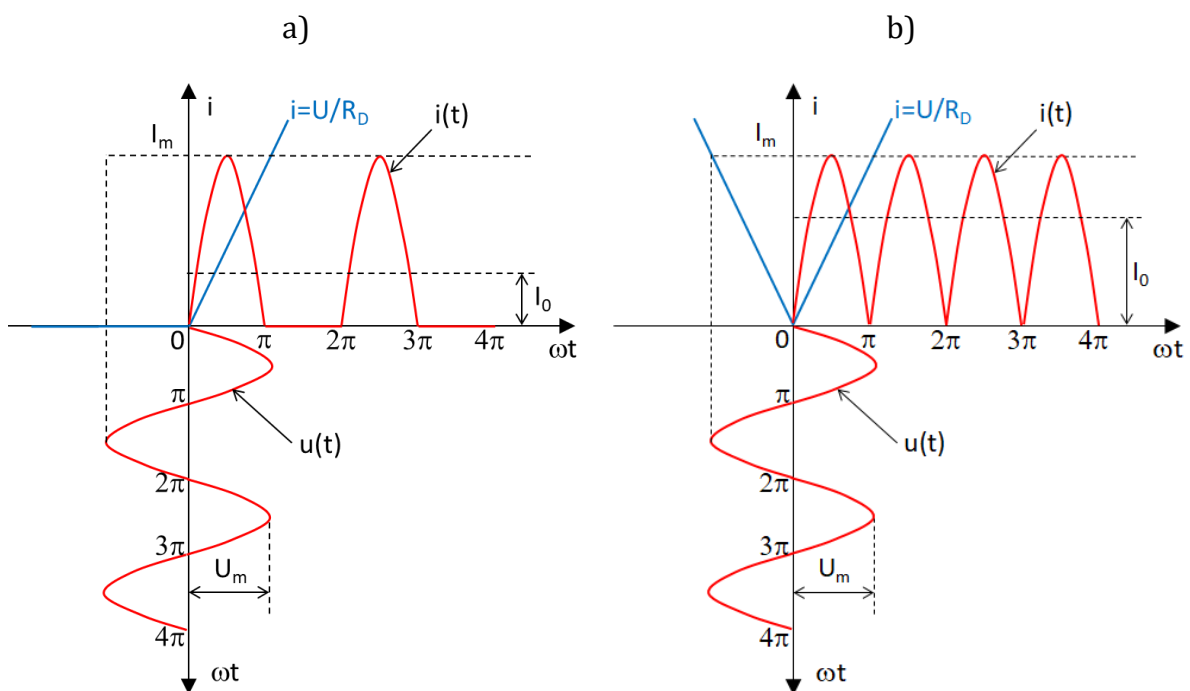
jednokierunkowy  $i(t)$ , którego wartość średnią wyznacza się, korzystając z definicji wartości średniej

$$I_0 = \frac{1}{T} \int_{t_0}^{t_0+T} i(t) dt \quad (5-13)$$

Wstawiając zależność (5.12) do równania (5.13) otrzymamy

$$\begin{aligned} I_0 &= \frac{1}{T} \int_{t_0}^{t_0+T} \frac{|u(t)|}{R_D} dt = \frac{1}{T} \int_0^T \frac{|U_m \sin(\omega t)|}{R_D} dt = \frac{1}{2\pi} \frac{U_m}{R_D} \int_0^{2\pi} |\sin(x)| dx = \\ &= \frac{1}{\pi} \frac{U_m}{R_D} \int_0^{\pi} \sin(x) dx = \frac{1}{\pi} \frac{U_m}{R_D} [\cos(x)]_0^{\pi} = \frac{2}{\pi} \frac{U_m}{R_D} = \frac{2}{\pi} I_m \approx 0,64 \cdot I_m \end{aligned} \quad (5-14)$$

Analizę pracy przetwornika dwupołówkowego zilustrowano na Rys. 5.3b. Założono, że diody zastosowane są idealne (zerowa wartość napięcia progowego  $U_P$  oraz rezystancji w kierunku przewodzenia  $R_d$ ).



Rys. 5.3. Przebiegi czasowe prądu i napięcia w obwodzie a) jednapołówkowego i b) dwupołówkowego (układ Graetza) przetwornika wartości średniej wyprostowanej z diodami idealnymi ( $U_P=0$  V i  $R_d=0\Omega$ )



W przypadku przetwornika jednopółwkowego z idealną diodą (tj.  $U_P = 0 \text{ V}$  i  $R_d = 0 \Omega$ ) odpowiednikiem równania (5-12) jest zależność

$$i(t) = \begin{cases} \frac{u(t)}{R_D} & \text{dla } u(t) \geq 0 \\ 0 & \text{dla } u(t) < 0 \end{cases} \quad (5-15)$$

A zatem stosując definicję wartości średniej i podobne obliczenia, jak w (5-14), uzyskujemy zależność

$$I_0 = \frac{1}{\pi} \frac{U_m}{R_D} = \frac{1}{\pi} I_m \approx 0,32 \cdot I_m \quad (5-16)$$

z której wynika, że miliamperomierz wskaże (dla sygnałów przemiennych) wartość średnią prądu wyjściowego dwukrotnie mniejszą niż w przypadku przetwornika dwupółwkowego. Analizę pracy przetwornika jednopółwkowego zilustrowano na Rys. 5.3a.

W przedstawionych rozważaniach przyjęto założenie, że wartość rezystancji miliamperomierza  $R_A$  jest pomijalnie mała. Natomiast w warunkach rzeczywistych, np. przy projektowaniu woltomierza, należy ją również uwzględnić (jako szeregowe połączenie rezystora  $R_D$  i miliamperomierza).

Ponadto przyjęto, że rezystancja dynamiczna w kierunku przewodzenia  $R_d$  jest pomijalnie mała, oraz że napięcie progowe  $U_P$  jest zerowe. W rzeczywistości napięcie  $U_P$  może mieć zasadniczy wpływ na działanie przetwornika w zakresie prostowania napięć o niewielkich wartościach (rzędu  $U_P$ ) i należy je także uwzględnić.

Biorąc pod uwagę model diody rzeczywistej przedstawiony na Rys. 5.1d o charakterystyce przedstawionej na Rys. 5.1c (dla przypadku  $U_P > 0 \text{ V}$ ,  $R_d > 0 \Omega$ ), zależność pomiędzy prądem wyjściowym a wejściowym napięciem przemiennym  $u(t)$  dla przetwornika jednopółwkowego można zapisać w postaci wzoru

$$i(t) = \begin{cases} \frac{u(t) - U_P}{\Sigma R} = \frac{U_m \sin(\omega t) - U_P}{\Sigma R} & \text{dla } u(t) \geq U_P \\ 0 & \text{dla } u(t) < U_P \end{cases} \quad (5-17)$$

a dla przetwornika dwupółwkowego – w postaci wzoru

$$i(t) = \begin{cases} \frac{|u(t)| - 2U_P}{\Sigma R} = \frac{|U_m \sin(\omega t)| - 2U_P}{\Sigma R} & \text{dla } |u(t)| \geq 2U_P \\ 0 & \text{dla } |u(t)| < 2U_P \end{cases} \quad (5-18)$$

gdzie  $\Sigma R$  oznacza sumaryczną wartość rezystancji występujących w obwodzie (wynikającą z konstrukcji obwodu oraz rzeczywistego modelu diody).

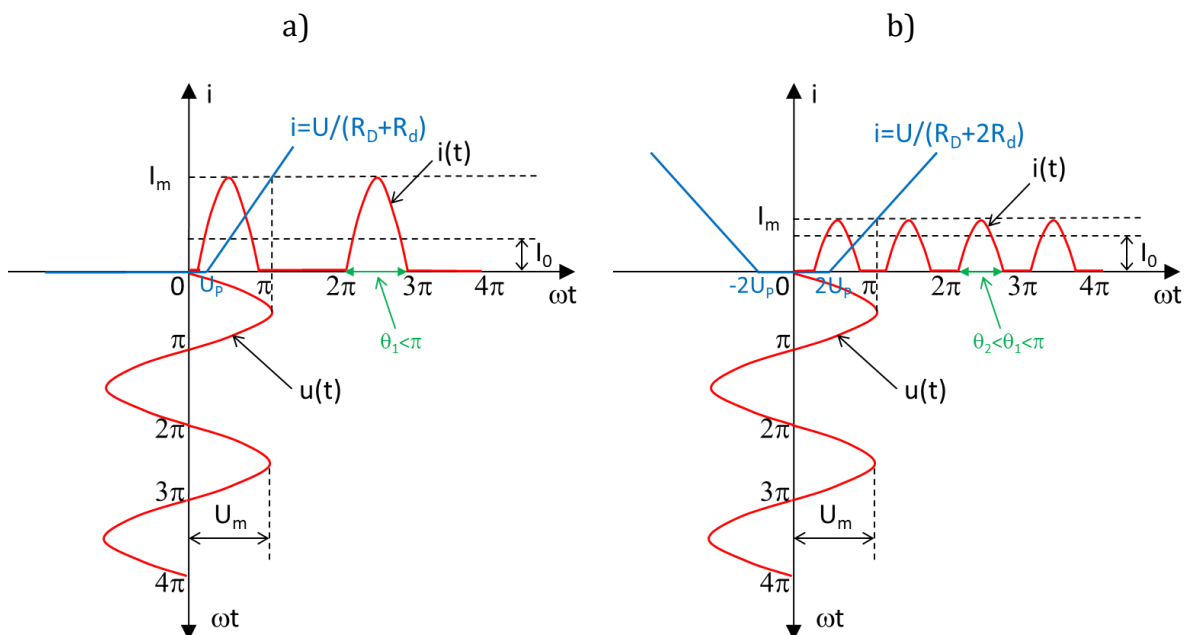
Analizę pracy przetworników jednopółwkowego i dwupółwkowego z diodami rzeczywistymi zilustrowano na Rys. 5.4. Odcinkowo-liniowe charakterystyki





przetwarzania przetworników  $i = f(u)$  różnią się od przedstawionych na Rys. 5.3 w dwóch aspektach:

- posiadają mniejsze nachylenie, z uwagi na uwzględnienie rezystancji dynamicznej diod w kierunku przewodzenia  $R_d$ , co przekłada się na wartość chwilową prądu wyjściowego,
- uwzględniają istnienie niezerowego napięcia progowego  $U_P$ , co determinuje kształt przebiegu prądowego na wyjściu przetwornika.



Rys. 5.4. Przebiegi czasowe prądu i napięcia w obwodzie a) jednopółkowego i b) dwupółkowego (układ Graetza) przetwornika wartości średniej wyprostowanej z diodami rzeczywistymi ( $U_P > 0V$  i  $R_d > 0\Omega$ )

Wartość średnią prądu  $I_0$  wskazywaną przez miliamperomierz w układzie przetwornika rzeczywistego (jednopółkowego lub dwupółkowego – Rys. 5.2) obliczyć można wstawiając zależności (5-17) lub (5-18) do (5-13). Jednakże w celu uproszczenia obliczeń zależności (5-17) oraz (5-18) można zapisać w uproszczonej formie (przy założeniu, że  $U_m > U_P$ ):

- dla przetwornika jednopółkowego

$$i(t) = \begin{cases} \frac{(U_m - U_P) \sin(\omega t)}{\sum R} & \text{dla } u(t) \geq 0 \\ 0 & \text{dla } u(t) < 0 \end{cases} \quad (5-19)$$

- dla przetwornika dwupółkowego

$$i(t) = \frac{(U_m - 2U_P) |\sin(\omega t)|}{\sum R} \quad (5-20)$$

Wstawiając równania (5-19) oraz (5-20) do równania (5-13) i wykonując nieskomplikowane przekształcenia uzyskujemy zależności na wartość średnią prądu na wyjściu przetwornika  $I_0$  (wartość wskazywaną przez miliamperomierz):

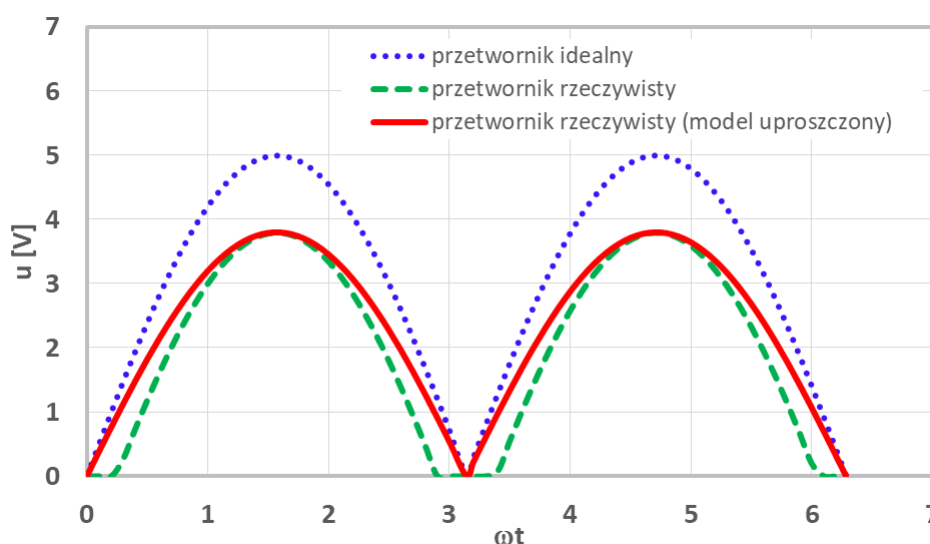
– dla przetwornika jednopółkowego

$$I_0 = \frac{1}{\pi} \cdot \frac{(U_m - U_P)}{\sum R} \quad (5-21)$$

– dla przetwornika dwupółkowego (układ Graetza)

$$I_0 = \frac{2}{\pi} \cdot \frac{(U_m - 2U_P)}{\sum R} \quad (5-22)$$

Kształt sygnału (napięciowego) na wyjściu przetwornika dwupółkowego dla modelu diody idealnej, modelu diody rzeczywistej (wzór 5-18) oraz modelu uproszczonego diody rzeczywistej (wzór 5-20) przedstawiono na Rys. 5.5. Założono, że napięcie progowe diody rzeczywistej wynosi 0,6 V, a amplituda napięcia wejściowego równa jest 5,0 V.



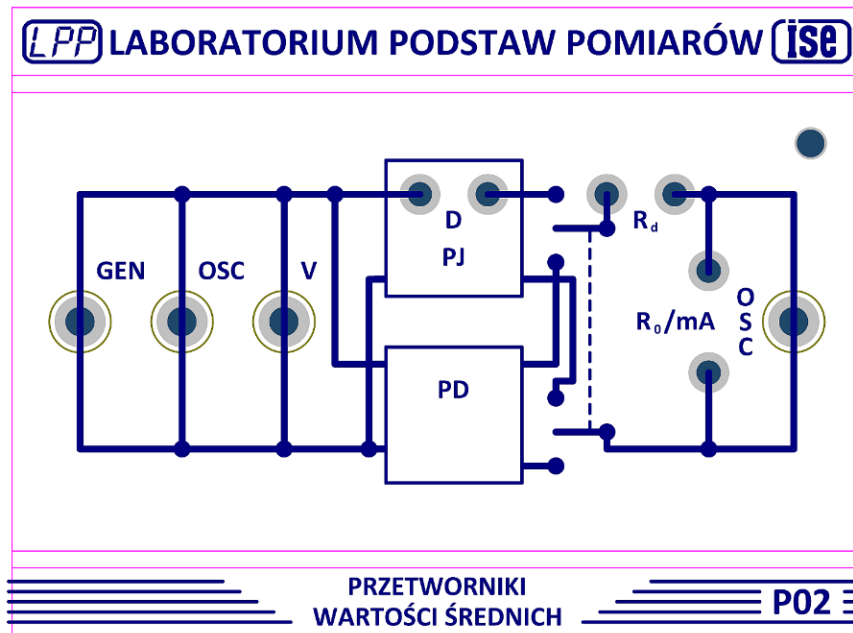
Rys. 5.5. Przebiegi czasowe napięciowe na wyjściu przetwornika dwupółkowego przy założeniu modelu diody idealnej, modelu diody rzeczywistej oraz modelu uproszczonego diody rzeczywistej

## 5. Opis modułu pomiarowego P02

W skład modułu laboratoryjnego **P02** (Rys. 5.6) wchodzi dwa pasywne przetworniki wartości średniej wyprostowanej: jednopółkowy **PJ** i dwupółkowy **PD**, wybierane za pomocą zamontowanego na płycie czołowej przełącznika. Studenci będą dysponowali diodami półprzewodnikowymi umieszczonymi na podstawkach. Będą one wykorzystywane w przetworniku jednopółkowym. W ćwiczeniu przewidziane jest badanie przetwornika jednopółkowego (**PJ**) dla dwóch kierunków polaryzacji diody. Z kolei przetwornik dwupółkowy, to klasyczny układ Graetza umieszczony wewnątrz modułu laboratoryjnego.

W układzie przewidziano miejsce na dołączenie rezystora dekadowego, redukującego prąd w obwodzie (zaciski  $R_d$ ). Zaciski  $R_0/mA$  służą do dołączenia opornika stanowiącego obciążenie przetwornika (jego dołączenie jest wymagane w przypadku obserwacji oscyloskopowej przebiegów), bądź miliamperomierza **LM3** w przypadku budowy woltomierza wartości średniej wyprostowanej.

Przetwornik dwupołówkowy wyposażony jest w transformatorowy układ separujący. Dzięki temu możliwa jest jednoczesna obserwacja przebiegów czasowych na wejściu i wyjściu przetwornika mimo wspólnej masy obu kanałów oscyloskopu.



Rys. 5.6. Moduł P02

W części ćwiczenia dotyczącej realizacji woltomierza wartości średniej wyprostowanej zaciski  $R_d$  należy wykorzystać do dołączenia rezystora dekadowego. Do zacisków  $R_0/mA$  należy dołączyć miliamperomierz **LM-3**, stanowiący element projektowanego woltomierza. Gniazdo BNC oznaczone symbolem **V** umożliwia dołączenie woltomierza napięcia zmiennego **34450A**, wykorzystywanego do pomiaru wzorcowego wartości skutecznej napięcia z generatora.

## 6. Przykładowy projekt woltomierza z przetwornikiem wartości średniej wyprostowanej wywzorcowanego w wartościach skutecznych napięcia sinusoidalnego

*Zadanie:*

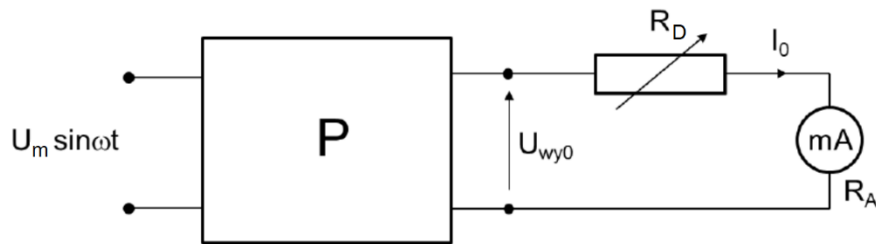
Zaprojektować woltomierz z przetwornikiem wartości średniej wyprostowanej wywzorcowany w wartościach skutecznych napięcia sinusoidalnego o napięciu zakresowym  $U_z$ . Użyć prostownika dwupołówkowego i miliamperomierza **LM-3** o prądzie zakresowym  $I_z$  i rezystancji  $R_A$ . Założyć model diody idealnej ( $R_d = 0 \Omega$  i  $U_P = 0 V$ ).



Dane projektowe:

- $U_Z = 3,5 \text{ V}$  (wartość skuteczna)
- $I_Z = 3 \text{ mA}$
- $R_A = 20 \Omega$

Schemat woltomierza:



Rys. 5.7. Schemat projektowanego woltomierza (P – przetwornik)

Wzory i obliczenia:

Dla przetwornika dwupołówkowego wartość średnią prądu wyjściowego – zgodnie z zależnością (5-14) – można zapisać jako

$$I_0 = \frac{U_{wy0}}{R_V} = \frac{2}{\pi} \cdot \frac{U_m}{R_V} = \frac{2}{\pi} \cdot \frac{U_m}{R_D + R_A}$$

gdzie  $U_{wy0}$  jest wartością średnią napięcia na wyjściu przetwornika,  $U_m$  – amplitudą sygnału wejściowego, a  $R_V$  rezystancją obciążenia przetwornika. Korzystając z zależności (5-7) dla sygnału sinusoidalnego oraz biorąc pod uwagę, że współczynnik kształtu sinusoidy  $k = \frac{\pi}{2\sqrt{2}}$ , powyższe równanie można zapisać w postaci

$$I_0 = \frac{2\sqrt{2}}{\pi} \cdot \frac{U}{R_D + R_A} = \frac{U}{k \cdot (R_D + R_A)}$$

gdzie  $U$  jest wartością skuteczną napięcia wejściowego.

Wartość skuteczna napięcia wejściowego  $U = U_Z$  powinna spowodować przepływ przez miliamperomierz LM-3 prądu, powodującego wychylenie wskazówki do końca podziałki, a więc równego prądowi zakresowemu  $I_0 = I_Z$ . Zatem powyższe równanie przyjmuje postać

$$I_Z = \frac{U_Z}{k \cdot (R_D + R_A)}$$



skąd

$$R_D = \frac{U_Z}{k \cdot I_Z} - R_A$$

Podstawiając wartości liczbowe otrzymujemy

$$R_D = \frac{3,5 \text{ V}}{1,11 \cdot 3 \cdot 10^{-3} \text{ A}} - 20 \Omega = 1031,1 \Omega$$

(liczba cyfr odpowiada rozdzielczości opornika dekadowego).

Wartość  $R_D$  została obliczona przy założeniu, że diody użyte w przetworniku mają charakterystykę idealną. W przypadku charakterystyki rzeczywistej wartość średnia napięcia na wyjściu przetwornika będzie mniejsza niż wartość średnia wyprostowane napięcia wejściowego, a tym samym wychylenie wskazówki miernika nie osiągnie wartości zakresowej. Aby spełnić warunki projektu trzeba dobrać doświadczalnie wartość rezystancji  $R_D$ . Będzie ona mniejsza od wartości obliczonej.

W przypadku, gdy zależność  $U_m \gg U_P$  (lub  $U_Z \gg U_P$ ) nie jest spełniona, należy przyjąć model diody rzeczywistej i uwzględnić niezerową wartość napięcia progowego  $U_P$  diod w układzie przetwornika. W obliczeniach wygodnie jest skorzystać z modelu uproszczonego, opisanego wzorem (5-22). W takim przypadku napięcie wyprostowane na wyjściu przetwornika  $u_{wy}(t)$ , podobnie jak w przypadku przetwornika idealnego, ma kształt „modułu z sinusa” (Rys. 5.5), a zatem w obliczeniach można przyjąć zależności takie, jak dla funkcji sinus. Podstawiając do wzoru (5-22) zależność

$$U_m = U\sqrt{2}$$

i wykonując podobne przekształcenia jak powyżej, otrzymamy bardziej dokładny wzór na rezystancję  $R_D$ .

W ogólnym przypadku można dodatkowo uwzględnić rezystancję dynamiczną w kierunku przewodzenia  $R_d$  diod i wtedy

$$R_V = R_D + R_A + 2R_d$$

## 7. Badania i pomiary



Przed przystąpieniem do pracy należy ustawić parametr **Output Load** generatora:


→ **Channel** → **Output Load** → **Set To High Z**

oraz przywrócić ustawienia fabryczne oscyloskopu:


→ **Default** → **Ok**




### Zadanie 1. Obserwacja charakterystyk prądowo-napięciowych diod


-  Na ekranie oscyloskopu pracującego w trybie **XY** zaobserwować charakterystykę prądowo-napięciową diody elektroluminescencyjnej LED umieszczonej na podstawie **D2** oraz diody krzemowej na podstawie **D1**.


W tym celu należy połączyć wyjście generatora **33500B** z wejściem **GEN** na płycie czołowej modułu **P02**, kanał **X** (CH1) oscyloskopu – z gniazdem wejściowym **OSC** umieszczonym po lewej stronie, a kanał **Y** (CH2) – z gniazdem wyjściowym **OSC** umieszczonym po prawej stronie modułu. Jako element **R<sub>0</sub>** wykorzystać rezystor wzorcowy **R<sub>wz4</sub>** o wartości 10 kΩ. Zewrzeć zaciski **R<sub>a</sub>** modułu. W generatorze ustawić sygnał sinusoidalny o częstotliwości  $f = 1$  kHz i wartości międzyszczytowej  $U_{pp} = 10$  V. Badane diody należy połączyć z zaciskami **D** modułu. Za pomocą zamontowanego na płycie czołowej przełącznika wybrać prostownik jednopółkowy **PJ**. W obu kanałach oscyloskopu ustawić sprzężenie **DC**: → **Coupling: DC**. Po uzyskaniu stabilnych przebiegów czasowych w obu kanałach (można skorzystać z przycisku → **AUTO**) zmienić tryb pracy oscyloskopu na **XY**: (**Menu**) → **Acquire** → **TimeBase: XY**. Wyregulować poziomy odniesienia (0 V) oraz wartości stałych  $C_x$  i  $C_y$  oscyloskopu tak, aby optymalnie wykorzystać powierzchnię ekranu.


-  Zmierzyć wartości napięcia progowego  $U_P$  diod: LED i krzemowej (w tym celu można wykorzystać kursory) i opisać sposób pomiaru. Określić kolor świecenia diody LED.

 **Która z diod lepiej nadaje się do budowy prostownika? Odpowiedź uzasadnić.**

### Zadanie 2. Obserwacja charakterystyki prądowo-napięciowej prostownika dwupółkowego.

-  Ustawić przełącznik na module **P02** w pozycji **PD**. Na ekranie oscyloskopu pracującego w trybie **XY** zaobserwować charakterystykę prądowo-napięciową prostownika dwupółkowego (mostka Graetza).

-  Zmierzyć wartość napięcia progowego  $U_P$  diod użytych w mostku Graetza w prostowniku dwupółkowym (w tym celu można wykorzystać kursory) i opisać sposób pomiaru.


 **Porównać wartość napięcia progowego  $U_P$  diod użytych w mostku Graetza z wartościami uzyskanymi w Zadaniu 1.**




### Zadanie 3. Obserwacja przebiegów czasowych na wejściu i wyjściu prostownika jednopółkowego.

Obiektem badań są: dioda LED na podstawie **D2** oraz dioda krzemowa na podstawie **D1**, użyte do budowy prostownika jednopółkowego. Do obserwacji przebiegów czasowych na wejściu i wyjściu prostownika należy wykorzystać układ pomiarowy z **Zadania 1**. Przełącznik na module **P02** ustawić w pozycji **PJ**. Istnieje możliwość zmiany konfiguracji prostownika poprzez wybór kierunku polaryzacji diody (katodą lub anodą od strony wejścia), realizowany przez zamianę końcówek przewodów dołączanych do podstawki.




Podczas obserwacji przebiegów należy ustawić sprzężenie **DC** oraz jednakową wartość stałej  $C_y$  oscyloskopu i jednakowy poziom odniesienia (0 V) w obu kanałach oscyloskopu.

 W generatorze **33500B** ustawić częstotliwość  $f = 1$  kHz. Zmienić tryb pracy oscyloskopu na **YT**: (*Menu*) → *Acquire* → *TimeBase: YT*. Zbadać wpływ amplitudy sygnału wejściowego na kształt przebiegów czasowych na wyjściu prostownika jednopółkowego dla obu diod przy jednej polaryzacji (anoda od strony wejścia). W tym celu zaobserwować przebiegi na wejściu i wyjściu prostownika dla wartości międzyszczytowej  $U_{pp}$  sygnału równej kolejno: 10 V, 5 V oraz 1 V.

 Zmierzyć za pomocą kursorów ręcznych typu **Y-Y**:

(*Menu*) → *Cursor* → *Mode: Manual* → *Select: Y-Y*

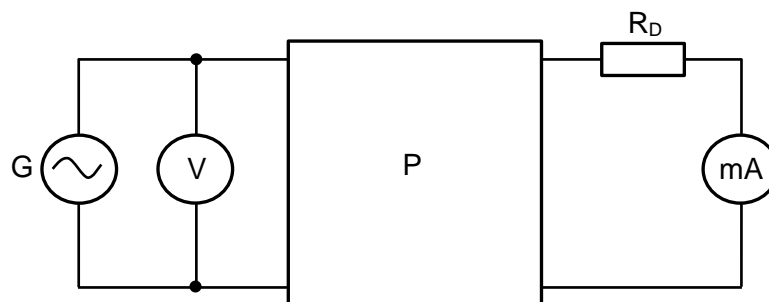
różnicę  $\Delta U$  między wartością maksymalną sygnału wejściowego i wyjściowego dla każdego przypadku. Oscylogramy zamieścić w protokole. Wartości  $\Delta U$  zestawić w tabeli.

-  **Skomentować wpływ napięcia progowego  $U_P$  diody na kształt sygnału wyjściowego dla różnych wartości międzyszczytowych sygnału wejściowego.**
-  **Z czego wynikają różnice  $\Delta U$  między wartością maksymalną sygnału wejściowego i wyjściowego? Porównać je z wartościami napięcia progowego  $U_P$  wyznaczonymi w Zadaniu 1. Dlaczego wartości  $\Delta U$  są różne dla różnych wartości międzyszczytowych sygnału wejściowego?**
-  **Porównać działanie prostownika jednopółkowego z diodą krzemową i z diodą LED.**



**Zadanie 4. Budowa woltomierza z przetwornikiem wartości średniej wyprostowanej wywzorcowanego w wartościach skutecznych napięcia sinusoidalnego.**

- Zad. 4.1.** Wykorzystując rozwiązanie zadania domowego, zamieścić w protokole:
- schemat zaprojektowanego woltomierza,
  - dane do projektu,
  - wyprowadzony wzór na wartość rezystancji  $R_D$  rezystora dekadowego.
- Obliczyć wartość rezystancji  $R_D$ , uwzględniając wartość napięcia progowego diod zmierzoną w **Zadaniu 2**.
- Zad. 4.2.** Zbudować zaprojektowany woltomierz. Na oporniku dekadowym ustawić obliczoną wartość  $R_D$ .
- Zad. 4.3.** Badanie zaprojektowanego woltomierza należy przeprowadzić w układzie przedstawionym na Rys. 5.8. Woltomierz **V** (multimetr **34450A**) służy do wzorcowego pomiaru wartości skutecznej napięcia z generatora.



Rys. 5.8. Schemat układu pomiarowego do badania właściwości zaprojektowanego woltomierza (P – przetwornik)

- Ustawić wstępnie duży zakres miliamperomierza **LM-3** (np. 750 mA). W generatorze ustawić napięcie sinusoidalne o wartości takiej, aby uzyskać wskazanie multimetru **34450A** równe  $U_Z$ . Stopniowo zmniejszać zakres miliamperomierza **LM-3** do wartości  $I_Z$  podanej w projekcie. W protokole podać wskazanie multimetru **34450A**, wartość rezystancji  $R_D$  oraz wychylenie  $\alpha$  (w działkach) wskazówki miernika **LM-3**. Wykorzystać górną skalę miernika.

**!** *Dlaczego wskazówka miernika LM-3 nie osiąga wychylenia zakresowego?*

- Zad. 4.4.** Skorygować wartość rezystancji opornika dekadowego w celu uzyskania maksymalnego wychylenia wskazówki miernika **LM-3**. Sprawdzić, czy wskazanie multimetru **34450A** nie uległo zmianie i w razie potrzeby skorygować ustawienie napięcia z generatora. W protokole podać wskazanie multimetru **34450A**, skorygowaną wartość rezystancji  $R_D$  oraz wychylenie  $\alpha$  (w działkach) wskazówki miernika **LM-3**.





### Zadanie 5. Wyznaczenie charakterystyki przetwarzania zbudowanego woltomierza.

- ☞ Korzystając z układu pomiarowego takiego, jak w **Zadaniu 4** i zmieniając napięcie z generatora, wyznaczyć charakterystykę przetwarzania zbudowanego woltomierza  $\alpha = f(U)$ , gdzie  $\alpha$  jest wskazaniem miliamperomierza **LM-3** (w działkach), a  $U$  jest wartością skuteczną napięcia wejściowego zmierzoną za pomocą multimetru **34450A**.
- ☞ Wyniki zamieścić w tabeli. Narysować otrzymaną charakterystykę na tle charakterystyki idealnej i porównać ją z charakterystyką uzyskaną za pomocą aplikacji **Demo\_06** (zakładka **Budowa woltomierza**), dostępnej na pulpicie komputera.
- ! **Wyjaśnić przyczyny nieliniowości charakterystyki przetwarzania  $\alpha = f(U)$  zrealizowanego woltomierza.**
- ! **Jakie byłyby konsekwencje zastosowania w woltomierzu mostka Graetza zbudowanego z diod LED badanych w Zadaniach: 1 i 3?**

U [V]	$\alpha$ [dz]
	75,0 ( $\alpha = \alpha_{\max}$ )
	70,0
	...
	10,0
	5,0
	2,0
	1,0
	0,0
0	0,0

Przykładowa tabela wyników

\* \* \*

Zmiana trybu pracy oscyloskopu:

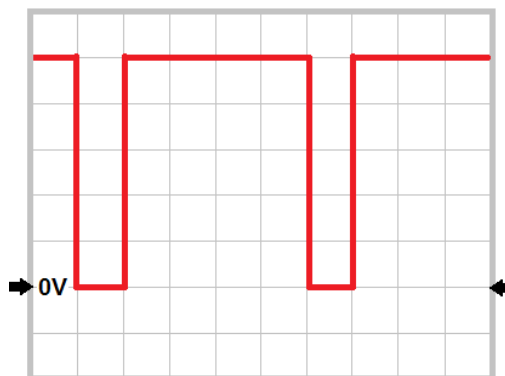
(Menu) → **Acquire** → **TimeBase: YT**

(Menu) → **Acquire** → **TimeBase: XY**

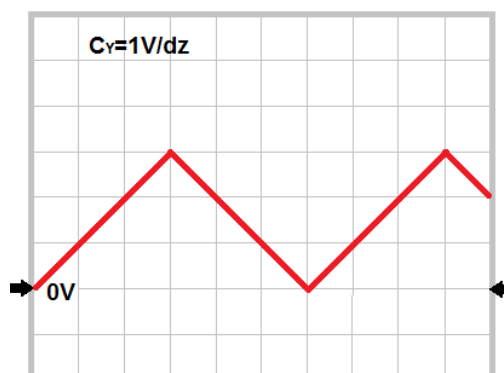


## Pytania kontrolne

1. Narysuj schemat blokowy i opisz funkcje poszczególnych bloków woltomierza napięcia przemiennego.
2. Podaj definicję wartości średniej sygnału przemiennego.
3. Podaj definicję wartości skutecznej sygnału przemiennego.
4. Jaka jest wartość średnia sygnału opisanego równaniem:  $u(t) = -2 - 4 \sin(200\pi t)$ ?
5. Jaka jest wartość skuteczna sygnału opisanego równaniem:  $u(t) = -2 + \sin(10\pi t)$ ?
6. Przy ustawionym współczynniku odchylenia toru Y oscyloskopu równym 1 V/dz na ekranie obserwowany jest sygnał jak na rysunku. Wyznacz wartość średnią sygnału.



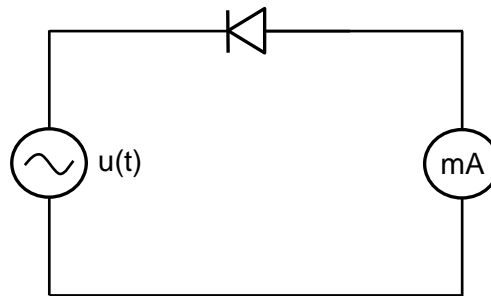
7. Jaka wartość wskaże woltomierz napięcia stałego, jeśli na jego wejście podano sygnał o przebiegu czasowym pokazanym na rysunku?



8. Podaj definicję współczynnika kształtu oraz jego wartość dla sygnału sinusoidalnego.
9. Narysuj charakterystykę prądowo-napięciową idealnej oraz rzeczywistej diody krzemowej. Zaznacz charakterystyczne punkty na charakterystyce.



10. Narysuj przebieg napięcia na wejściu i wyjściu jednopółkowego przetwornika diodowego zakładając, że dioda ma charakterystykę idealną, a sygnał wejściowy określony jest zależnością  $u(t) = -2 + 3\sin(\omega t)$ .
11. Zilustruj działanie układu jednopółkowego przetwornika wartości średniej wyprostowanej poprzez naszkicowanie przebiegów czasowych prądu i napięcia w obwodzie. Przyjmij napięcie progowe diody  $U_P = 0 \text{ V}$ , oraz rezystancję diody w kierunku przewodzenia  $R_d > 0 \Omega$ .



12. Do wyjścia prostownika dwupółkowego dołączono miliamperomierz do pomiaru prądu stałego o niewielkiej rezystancji  $R_A$ . Do wejścia prostownika doprowadzono sygnał sinusoidalny o zerowej składowej stałej i amplitudzie  $U = 5 \text{ V}$ . Jaka będzie zależność między wskazaniem amperomierza, gdy zostaną zastosowane w przetworniku diody: a) idealna, b) rzeczywista krzemowa, c) rzeczywista germanowa? Załóż, że w przypadku diod rzeczywistych ich rezystancja dynamiczna w kierunku przewodzenia  $R_d$  jest identyczna.
13. Jakie będzie wskazanie miliamperomierza dołączonego do wyjścia prostownika jednopółkowego diodowego w przypadku, gdy do wejścia przetwornika doprowadzono sygnał sinusoidalny o zerowej składowej stałej i amplitudzie  $10 \text{ V}$ ? Załóż, że wartość rezystancji miliamperomierza jest pomijalnie mała, dioda jest idealna, a rezystor dekadowy o wartości  $200 \Omega$  jest połączony szeregowo z diodą.
14. Czy zmiana polaryzacji diod w układach przetwornika: a) jednopółkowego, b) dwupółkowego, będzie miała wpływ na kształt sygnału na wyjściu danego przetwornika w przypadku sygnału sinusoidalnego o zerowej składowej stałej? Odpowiedź uzasadnij.
15. Narysuj przebiegi czasowe prądów na wyjściu prostownika jednopółkowego diodowego dla parametrów diody: a)  $U_P = 0 \text{ V}$ ,  $R_d > 0 \Omega$ , b)  $U_P > 0 \text{ V}$ ,  $R_d > 0 \Omega$ , gdy do jego wejścia doprowadzono sygnał sinusoidalny o amplitudzie  $U_m$  większej od napięcia progowego diody. W obu przypadkach przyjąć identyczne  $R_d$ . Jaka jest podstawowa różnica w kształcie przebiegów wyjściowych względem wejściowego sygnału sinusoidalnego oraz przebiegów wyjściowych względem siebie?  $U_P$  jest napięciem progowym diody, a  $R_d$  – rezystancją dynamiczną diody w kierunku przewodzenia.



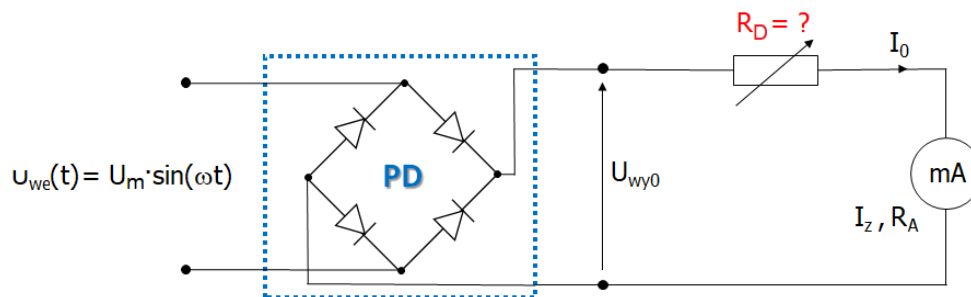
16. Wyprowadź wzór na wartość średnią prądu wyjściowego przetwornika jednopółkowego (z diodą idealną) o charakterystyce prądowo-napięciowej opisanej zależnością (5-15).
17. Wyprowadź wzór na wartość średnią prądu wyjściowego przetwornika jednopółkowego (uwzględniając model rzeczywisty uproszczony diody) o charakterystyce prądowo-napięciowej opisanej zależnością (5-19).
18. Wyprowadź wzór na wartość średnią prądu wyjściowego przetwornika dwupółkowego (uwzględniając model rzeczywisty uproszczony diody) o charakterystyce prądowo-napięciowej opisanej zależnością (5-20).



## Zadania domowe

### Zadanie 1

Korzystając z przykładu opisanego w rozdziale 6 instrukcji zaprojektuj woltomierz z przetwornikiem wartości średniej wyprostowanej wywzorcowany w wartościach skutecznych napięcia sinusoidalnego o napięciu zakresowym  $U_Z$  (wartość skuteczna) zgodnie ze schematem przedstawionym na Rys. 1. W tym celu użyj prostownika dwupołówkowego w układzie mostka Graetza i miliamperomierza **mA** jako wskaźnika. Załóż model diody półprzewodnikowej o zerowej rezystancji dynamicznej w kierunku przewodzenia  $R_d = 0 \Omega$  oraz o niezerowej wartości napięcia progowego  $U_P$ . Wyprowadź zależność na rezystancję  $R_D$  rezystora dekadowego  $R_D$  tak, aby dla wartości skutecznej napięcia sinusoidalnego  $U_Z$  uzyskać zakresowe wychylenie wskaźnika **mA** o rezystancji  $R_A$  ustawionego na zakresie  $I_Z$ .



Rys. 1. Schemat ideowy woltomierza wartości średniej wyprostowanej z wykorzystaniem prostownika dwupołówkowego (układ Graetza)

### Zadanie 2

Przyjmując, że wartość napięcia progowego pojedynczej diody przetwornika dwupołówkowego wynosi  $U_P = 0,6 \text{ V}$ , oblicz wartość rezystora dekadowego dla wartości  $U_Z$  oraz  $I_Z$  podanych w tabeli:

Nr	parametry	Nr	parametry	Nr	parametry
0	$U_Z = 5 \text{ V}$ , $I_Z = 3 \text{ mA}$ , $R_A = 20 \Omega$	4	$U_Z = 4,5 \text{ V}$ , $I_Z = 3 \text{ mA}$ , $R_A = 20 \Omega$	8	$U_Z = 3 \text{ V}$ , $I_Z = 3 \text{ mA}$ , $R_A = 20 \Omega$
1	$U_Z = 5 \text{ V}$ , $I_Z = 7,5 \text{ mA}$ , $R_A = 3 \Omega$	5	$U_Z = 4,5 \text{ V}$ , $I_Z = 7,5 \text{ mA}$ , $R_A = 3 \Omega$	9	$U_Z = 3 \text{ V}$ , $I_Z = 7,5 \text{ mA}$ , $R_A = 3 \Omega$
2	$U_Z = 4 \text{ V}$ , $I_Z = 3 \text{ mA}$ , $R_A = 20 \Omega$	6	$U_Z = 3,5 \text{ V}$ , $I_Z = 3 \text{ mA}$ , $R_A = 20 \Omega$		
3	$U_Z = 4 \text{ V}$ , $I_Z = 7,5 \text{ mA}$ , $R_A = 3 \Omega$	7	$U_Z = 3,5 \text{ V}$ , $I_Z = 7,5 \text{ mA}$ , $R_A = 3 \Omega$		

gdzie **Nr** oznacza ostatnią cyfrę numeru albumu studenta.