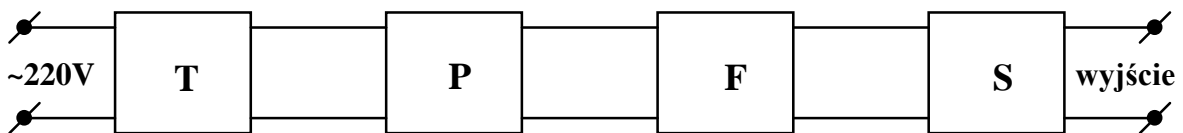


UKŁADY PROSTUJĄCE

- I. Cel ćwiczenia:** pomiar podstawowych parametrów prostownika jedno- i dwupołówkowego oraz najprostszych filtrów.
- II. Przyrządy:** płytki montażowa, woltomierz magnetoelektryczny, woltomierz elektrodynamiczny lub elektromagnetyczny, oscyloskop
- III. Literatura:** 1. E. Norman Lurch, Podstawy techniki elektronicznej, Warszawa 1965.
2. R. Śledziwski, Elektronika dla fizyków, Warszawa 1978

IV. Wprowadzenie.

Źródłami napięć stałych w urządzeniach stacjonarnych są tzw. zasilacze stabilizowane. Uproszczonego schematu blokowego takiego zasilacza przedstawia rys.1



Rys.1. Schemat blokowy zasilacza stabilizowanego: T - transformator, P - prostownik, F - filtr, S - układ stabilizacji regulacji napięcia wyjściowego.

Transformator T obniża (najczęściej) napięcie sieci 220V, a prostownik P zamienia prąd przemienny w prąd zmienny płynący wyłącznie w jednym kierunku (prąd pulsujący). Filtr F "wygładza" prąd zmienny i na jego wyjściu, o ile jest to filtr o dużej efektywności, otrzymujemy napięcie praktycznie stałe w czasie. Niewielkie zmiany okresowe tego napięcia nazywamy tętnieniami. Zadaniem układu stabilizacji jest automatyczne utrzymanie stałej wartości napięcia wyjściowego niezależnie od zmian (w pewnych granicach) napięcia sieci.

IV.1. Składowa stała, składowa zmienna i współczynnik tętnień.

Oznaczmy przez $U(t)$ wartość napięcia w chwili t na wyjściu prostownika lub filtra. Wartością średnią lub składową stałą napięcia wyjściowego $U(t)$ nazywamy wartość wyrażenia

$$\bar{U} = \frac{1}{T} \int_0^T U(t) dt \quad (1)$$

gdzie T jest okresem funkcji $U(t)$.

Napięcie $U_i(t)$, którego wartość w danej chwili t równa jest różnicy wartości chwilowej napięcia wyjściowego $U(t)$ i wartości średniej napięcia wyjściowego \bar{U}

$$U_i(t) = U(t) - \bar{U} \quad (2)$$

nazywamy składową zmienną napięcia wyjściowego.

Współczynnikiem tętnień nazywamy stosunek wartości skutecznej składowej zmiennej do wartości składowej stałej

$$k = \frac{U_{t, sk}}{\bar{U}} \quad (3)$$

gdzie

$$U_{t, sk} = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T U_t(t) dt} \quad (4)$$

Współczynnik tętnień k jest miarą efektywności filtru.

Wartości skuteczne napięcia wyjściowego i składowej zmiennej spełniają zależność

$$U_{sk}^2 = \bar{U}^2 + U_{t, sk}^2 \quad (5)$$

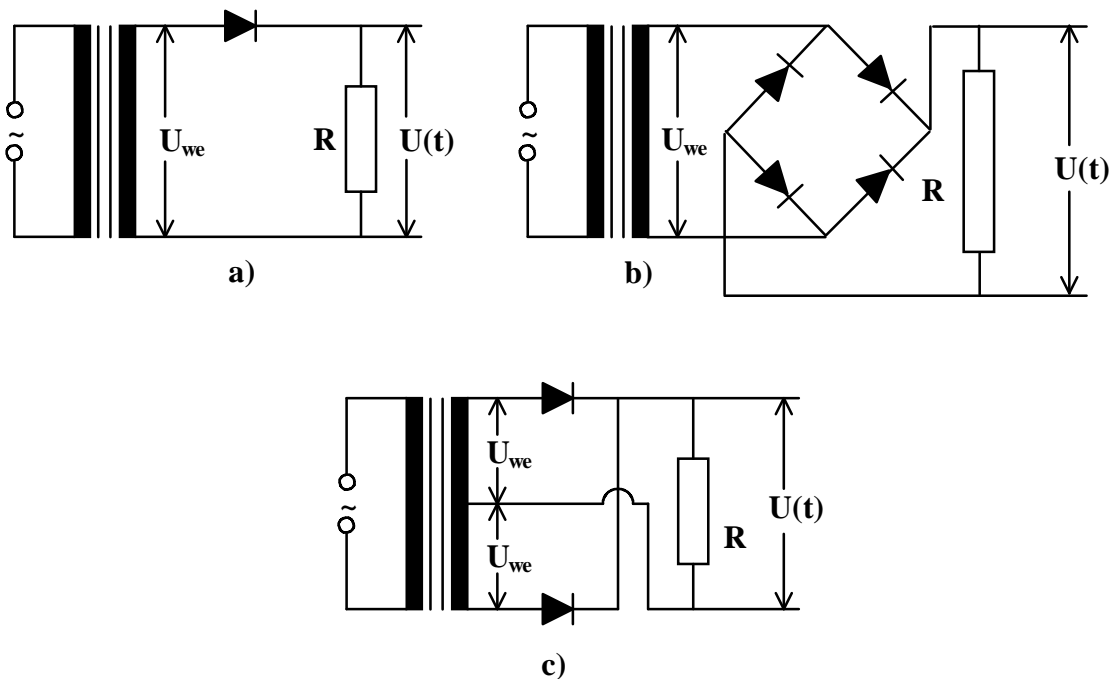
Zależność (5) wynika z definicji wartości skutecznej i średniej. [W literaturze można spotkać oznaczenie wartości skutecznej indeksem RMS (U_{RMS}). Jest to skrót angielskiego terminu "średni pierwiastek kwadratowy".]

IV.2. Prostownik jednopółkowy (półfalowy) i dwupółkowy.

Prostownik jednopółkowy.

Najprostszym prostownikiem jest pojedyncza dioda półprzewodnikowa, przez którą zaczyna płynąć prąd w kierunku przewodzenia, gdy różnica potencjałów między wyprowadzeniami elektrycznymi obszarów "p" i "n" półprzewodnika staje się większa od napięcia dyfuzyjnego U_d niespolaryzowanego zewnętrznym napięciem złącza p-n.

W momencie, gdy różnica potencjałów ponownie osiąga wartość napięcia dyfuzyjnego U_d , w obwodzie przestaje płynąć prąd w kierunku przewodzenia. Po obniżeniu się napięcia poniżej wartości U_d przez złącze płynie prąd w kierunku zaporowym, ale natężenie tego prądu jest mniejsze od natężenia prądu przewodzenia o kilka rzędów wielkości. Amplituda napięcia przemiennego w takim obwodzie musi być mniejsza od wartości bezwzględnej napięcia przebicia lawinowego diody. Schemat prostownika jednopółkowego przedstawia rys.2a.

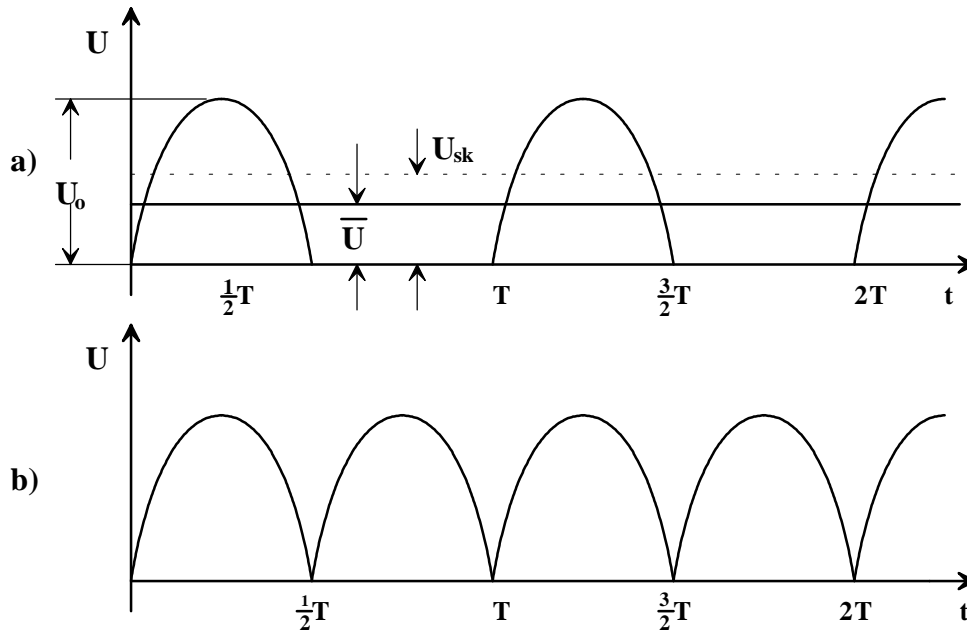


Rys.2. a) Prostownik jednopółkowy, b) dwupółkowy w układzie mostkowym (Graetza), c) dwupółkowy z dzielonym uzwojeniem transformatora.

Dla idealnego prostownika o zerowym oporze elektrycznym w stanie przewodzenia i nieskończonym oporze w stanie spolaryzowania zaporowego oraz przy założeniu, że U_d jest bardzo małe ($U_d = 0$) napięcie wyjściowe $U(t)$ będzie równe

$$i \quad \begin{aligned} U(t) &= U_o \sin(\omega t) && \text{dla } U_{we}(t) > 0 \\ U(t) &= 0 && \text{dla } U_{we}(t) < 0. \end{aligned} \quad (6)$$

Przebieg napięcia na wyjściu prostownika jednopółkowego przedstawia rys.3a.



Rys.3. Napięcie wyjściowe z prostownika jednopółkowego a) i dwupółkowego b).

Wartość średnia przedstawionego napięcia wynosi

$$\bar{U} = \frac{U_o}{T} \int_0^T \sin \omega t dt = \frac{U_o}{\pi}, \quad (7)$$

zaś wartość skuteczna

$$U_{sk} = \sqrt{\frac{U_o^2}{T} \int_0^T \sin^2 \omega t dt} = \frac{U_o}{2}, \quad (8)$$

gdzie T jest okresem napięcia przemiennego a U_o amplitudą.

[Dla napięcia przemiennego sinusoidalnego wartość skuteczna jest równa $U_o/\sqrt{2}$, natomiast wartość średnia wynosi zero].

Prostownik dwupółkowy.

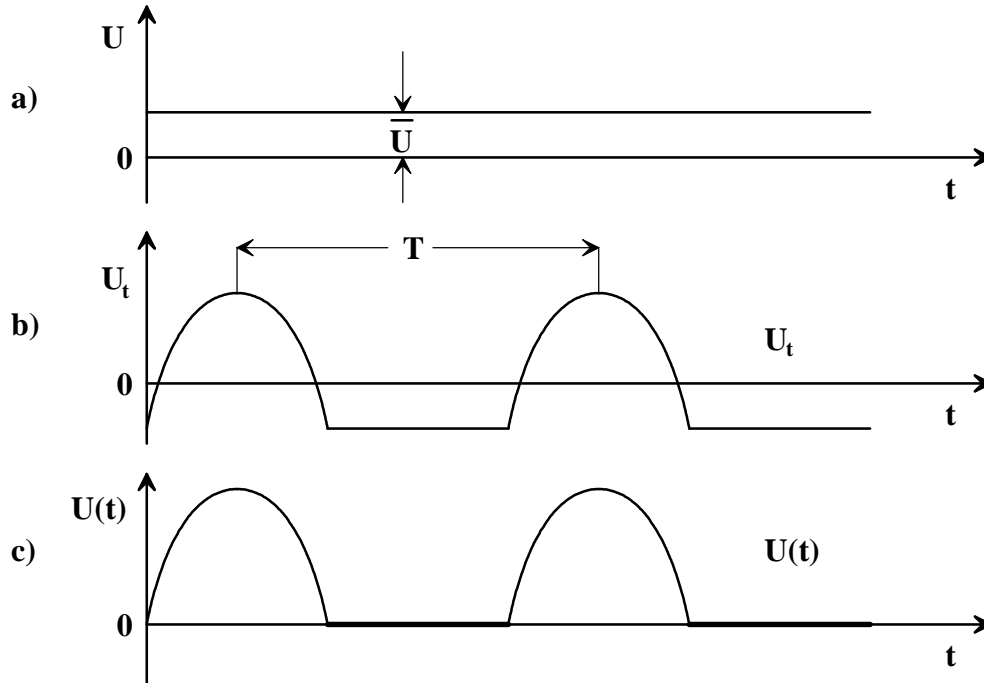
Zasadniczą wadą prostownika jednopółkowego jest to, że przewodzi on co najwyżej w czasie połowy okresu napięcia przemiennego. Wady tej pozbawiony jest prostownik dwupółkowy, przedstawiony na rysunku 2b i 2c. Dla idealnych elementów prostujących wartość średnia napięcia pulsującego na wyjściu prostownika dwupółkowego jest równa

$$\bar{U} = \frac{2U_o}{\pi}, \quad (9)$$

a wartość skuteczna

$$U_{sk} = \frac{U_o}{\sqrt{2}} \quad (10)$$

Przebieg $U(t)$ pokazany na rysunku 4c reprezentuje wypadkowy przebieg napięcia na wyjściu prostownika jednopółkowego; U_t jest składową zmienną (rys. 4b), \bar{U} jest składową stałą (rys. 4a) tego napięcia zmiennego.



Rys.4. Nakładanie się napięcia zmiennego i stałego na wyjściu prostownika.

Skorzystajmy z zależności (5) i obliczmy $U_{t,sk}$ tętnień

$$U_{t,sk}^2 = U_{sk}^2 - \bar{U}^2$$

gdzie U_{sk} jest wartością skuteczną napięcia $U(t)$ na wyjściu prostownika lub filtru.

W przypadku prostownika jednopółkowego mamy

$$U_{t,sk}^2 = \left(\frac{U_o}{2}\right)^2 - \left(\frac{U_o}{\pi}\right)^2$$

$$U_{t,sk} = U_o \sqrt{\frac{1}{4} - \frac{1}{\pi^2}} = 0,386U_o$$

$$k_{pr} = \frac{U_{t,sk}}{\bar{U}} = \frac{0,386U_o}{0,318U_o} = 1,21$$

k_{pr} współczynnik tętnień prostownika

Dla prostownika dwupółkowego mamy

$$U_{t,sk} = U_o \sqrt{\frac{1}{2} - \frac{4}{\pi^2}} = 0,307U_o$$

$$k_{pr} = \frac{U_{t,sk}}{\bar{U}} = 0,482$$

Te same zależności uzyskać możemy z definicji wartości skutecznej (3). Np. przebieg składowej zmiennej na rysunku 4b dany jest funkcją

$$U_t = U_o \sin \omega t - \bar{U}_o \quad \text{dla} \quad 0 < t < \frac{T}{2}$$

$$U_t = -\bar{U} \quad \text{dla} \quad \frac{T}{2} < t < T$$

$$U_{t,sk}^2 = \frac{1}{T} \left\{ \int_0^{\frac{T}{2}} [U_o \sin \omega t - \bar{U}]^2 + \bar{U}^2 \frac{T}{2} \right\}$$

Wykonując całkowanie otrzymamy

$$U_{t,sk} = \sqrt{\frac{1}{4} - \frac{4}{\pi^2}} U_o = 0,386 U_o$$

Tabela I zawiera charakterystyczne parametry obu prostowników.

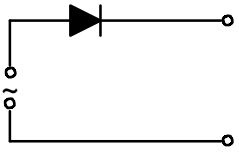
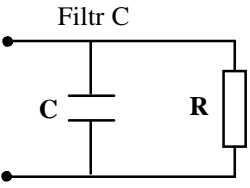
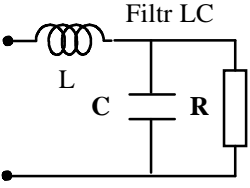
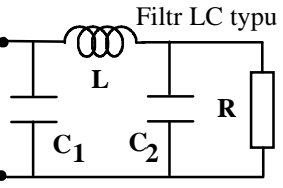
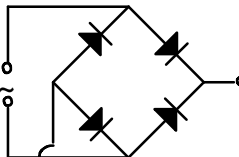
Tabela I

Rodzaj prostownika	\bar{U}	$U_{t,sk}$	$k_{pr} = \frac{U_{t,sk}}{\bar{U}}$
Prostownik jednopółkowy	$\frac{U_o}{\pi}$	$0,386 U_o$	1,21
Prostownik dwupółkowy	$\frac{2U_o}{\pi}$	$0,307 U_o$	0,482

IV.3. Filtry.

Jak wspomniano we wprowadzeniu, do zmniejszania tętnień napięcia wyjściowego służą filtry.

Tabela II

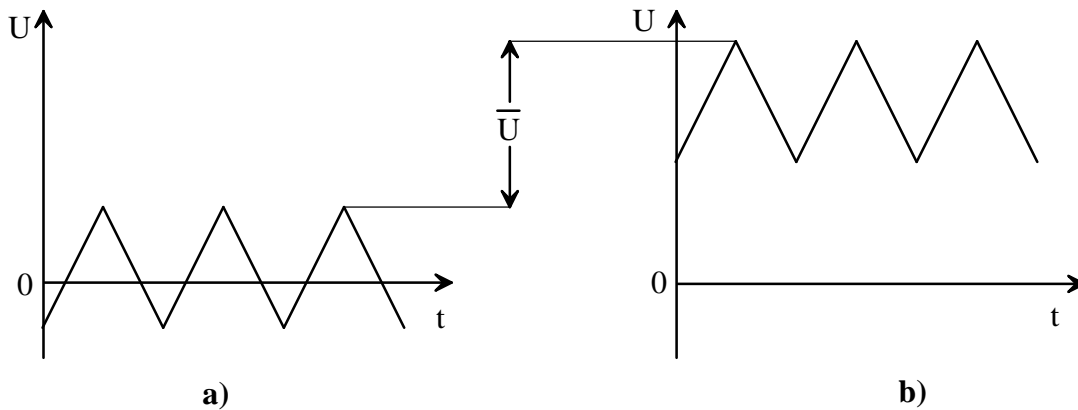
Jednostki $\Omega, \mu F, H$	współczynnik tętnień		
	Filtr C	Filtr LC	Filtr LC typu π
			
	$\frac{2,88}{RC} \cdot 10^3$	$\frac{1,19}{LC}$	$\frac{27,5}{LC_1 C_2 R} \cdot 10^3$
	$\frac{1,44}{RC} \cdot 10^3$	$\frac{0,297}{LC}$	$\frac{3,45}{LC_1 C_2 R} \cdot 10^3$

Jeżeli współczynnik tętnień prostownika wynosi k_{pr} , a współczynnik tętnień filtru ma wartość k_{fil} , wówczas, sumaryczny współczynnik tętnień k jest równy

$$k = k_{pr} \cdot k_{fil}$$

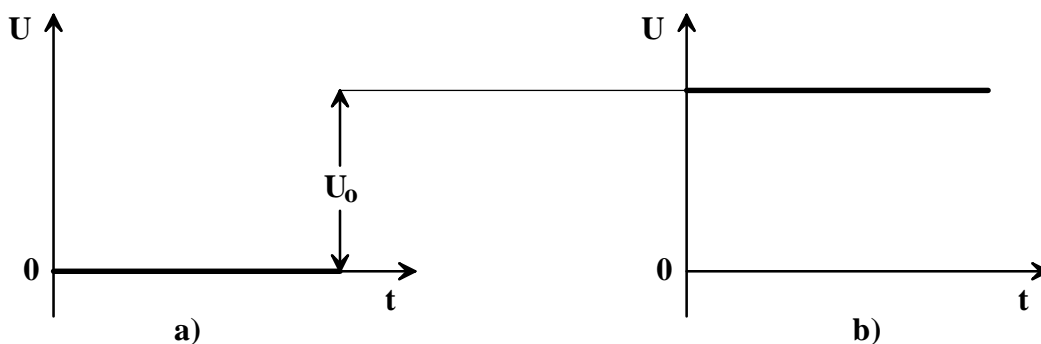
Tabela II zawiera teoretyczne współczynniki tętnień, obliczone dla współpracy prostowników jedno- i dwupołówkowych z wyszczególnionymi rodzajami filtrów.

Najpełniejszy obraz pracy prostownika wraz z filtrem uzyskamy posługując się oscyloskopem. Jeżeli wyjście układu prostującego połączymy z wejściem zmiennoprądowym (oznaczone przez "~" lub "AC") oscyloskopu, to na ekranie otrzymamy wykres wyłącznie składowej zmiennej, gdyż kondensator C, włączony między gniazdo wejściowe a wzmacniacz odchylenia pionowego Y (patrz instrukcja "Podstawowe mierniki elektryczne i elektroniczne") "odetnie" składową stałą, co ilustruje rys.5a.



Rys.5 Napięcie na wyjściu układu prostującego obserwowane na oscyloskopie z wejściem zmiennoprądowym "~" a) i z wejściem stałoprądowym "=" b).

Przełączając wejście zmiennoprądowe na stałoprądowe (oznaczone przez "=" lub "DC") obserwujemy przesunięcie wykresu składowej zmiennej o odcinek odpowiadający składowej stałej, czyli wartości średniej napięcia wyjściowego badanego układu (rys.5b). Zmiana rodzaju wejścia oscyloskopu polega na zwarcie ze sobą okładek kondensatora szeregowego w torze odchylenia pionowego oscyloskopu. Rys.6 przedstawia napięcie źródła prądu stałego U_0 obserwowane na oscyloskopie o wejściu "AC" a) i wejściu "DC" b).



Rys. 6 Napięcie źródła prądu stałego U_0 obserwowane na oscyloskopie o wejściu "AC" a) i wejściu "DC" b)

W przeciwieństwie do oscyloskopu różne typy woltomierzy analogowych będą wskazywały różne wartości napięcia na wyjściu układu prostującego. I tak woltomierz magnetoelektryczny, przeznaczony do pomiarów napięć stałych, a więc nie wyposażony w prostownik, wskaże wartość składowej stałej. Stanie się tak w przypadku, gdy okres zmian napięcia będzie znacznie krótszy od

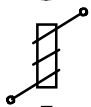
okresu drgań własnych uzwojenia ruchomego (0,4 - 2 s). Woltomierz elektrodynamiczny wskaże z kolei wartość skuteczną napięcia wyjściowego, a w przypadku napięcia stałego poprawną jego wartość. Również niektóre z woltomierzy elektromagnetycznych mierzą poprawnie zarówno napięcia stałe, jak i zmienne o niezbyt wysokich częstotliwościach

V. Pomiary.

1. Do źródła prądu stałego 10 - 12V dołączyć równolegle woltomierz magnetoelektryczny, woltomierz elektrodynamiczny lub elektromagnetyczny i oscyloskop (rys.7). Wyznaczyć wartość napięcia wskazywaną przez każdy z tych przyrządów.



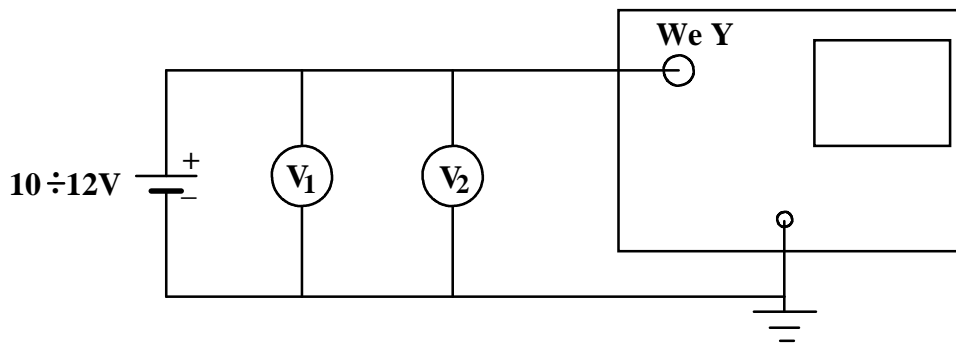
symbol przyrządu magnetoelektrycznego



symbol przyrządu elektromagnetycznego

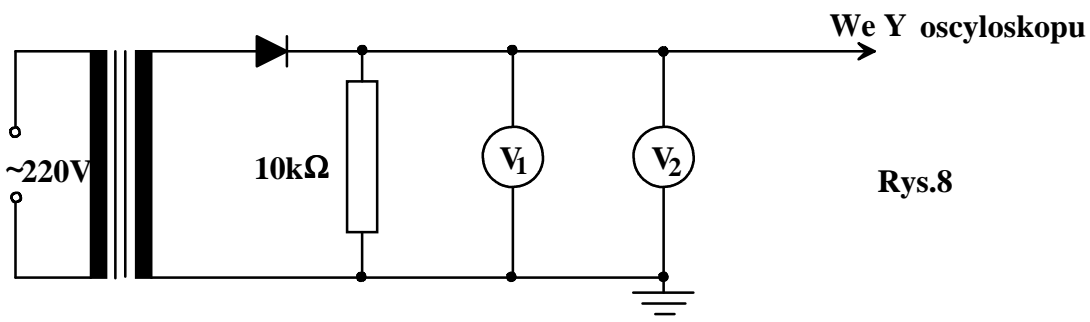


symbol przyrządu elektrodynamicznego



Rys.7

2. Do wtórnego uzwojenia transformatora sieciowego płytki montażowej dołączyć równolegle oba woltomierze i oscyloskop (źródło napięcia stałego z rys.7 zastąpić transformatorem sieciowym). Wyznaczyć: średnią wartość napięcia (woltomierzem magnetoelektrycznym i oscyloskopem), wartość skuteczną (obu woltomierzami i oscyloskopem) i amplitudę.
3. Połączyć przyrządy wg schematu przedstawionego na rys.8. Wykonać te same pomiary co poprzednio, a następnie powtórzyć je dla prostownika dwupołówkowego. Wyniki z punktów 1, 2, 3 zebrać w tabeli III.



Rys.8

Tabela III

	Oscyloskop			Miernik magnetoelektryczny		Miernik elektromag.
	Amplituda	Skład. stała	Obliczona wartość $U_{sk}[V]$	=	~	Wartość skuteczna $U_{sk}[V]$
	$U_0[V]$	$\bar{U}[V]$		[V]	[V]	
Zasilacz napięcia stałego 10 -12V	X		X			
Napięcie z uzwojenia wtórnego						
Prostownik jednopółkowy						
Prostownik dwupółkowy						

4. Za pomocą oscyloskopu zmierzyć wartość składowej stałej (zanotować w tabeli III).

Naszycić (i zaznaczyć mierzone wielkości) zależność składowej zmiennej od czasu na wyjściu kilku filtrów (tabela II) dołączonych do wyjścia prostownika jedno- i dwupółkowego.

Pomiary te stanowią będą podstawą do wyznaczenia wartości współczynników tętnień.

VI. Opracowanie wyników.

1. Porównać wyniki pomiarów tego samego napięcia stałego i przemiennego, wykonanych obu woltomierzami oraz oscyloskopem. W przypadku, gdy wyniki różnią się bardziej, niż wynikałoby to z klas przyrządów - uznać woltomierz elektrodynamiczny (elektromagnetyczny) za przyrząd wzorcowy i obliczyć współczynnik skali dla pozostałych przyrządów:

$$c = \frac{U_w}{U_m}$$

gdzie U_w napięcie zmierzone przyrządem wzorcowym,

U_m napięcie zmierzone danym miernikiem.

Następnie obliczyć poprawione wartości pozostałych pomiarów wykonanych tymi przyrządami:

$$\text{wartość poprawiona} = \text{współczynnik } c * \text{wartość zmierzona}$$

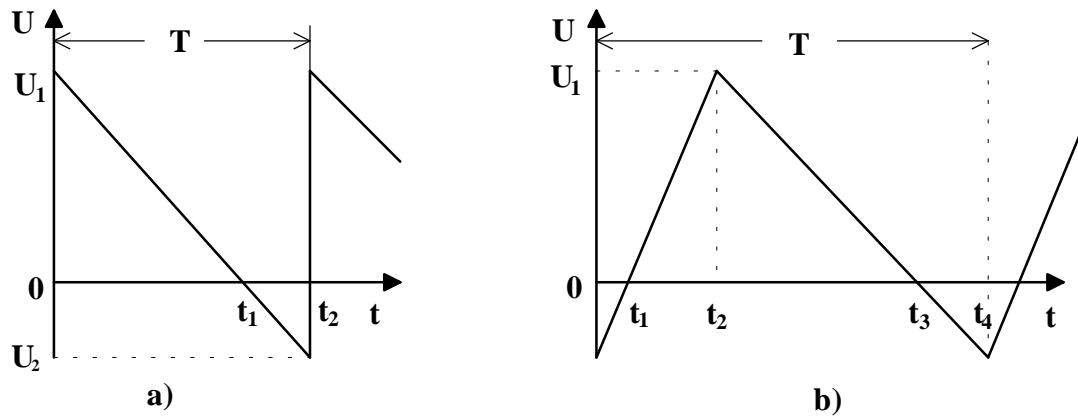
2. Porównać wyniki pomiarów składowej stałej i zmiennej napięcia na wyjściu prostownika jedno i dwupółkowego. Ocenić, przy jakich rodzajach napięcia zmiennego woltomierz magnetoelektryczny z prostownikiem mierzy poprawnie wartość skuteczną.

3. Obliczyć doświadczalne wartości współczynników tętnień $k = U_{sk} / \bar{U}$ (patrz rozdz. VII) dla obu prostowników i wszystkich zbadanych filtrów. Wyniki obliczeń porównać z przybliżonymi wartościami teoretycznymi, wynikającymi z przytoczonych w tablicy II wzorów.

4. Przeprowadzić dyskusję wyników.

VII. Uzupełnienie.

Napięcie składowej zmiennej na wyjściu układu prostującego prąd przemienny, można z wystarczającą dla celów praktycznych dokładnością, przedstawić w postaci przebiegu "trójkątnego" (rys.9).



Rys.9

Wartość skuteczna tak zmieniającego się w czasie napięcia dana jest następującym wzorem:

$$U_{sk}^2 = \frac{U_1^2 \cdot t_1}{3 \cdot t_2} + \frac{U_2^2}{3} \cdot \frac{t_2 - t_1}{t_2} \quad \text{dla przebiegu z rysunku 9a}$$

i

$$U_{sk}^2 = \frac{U_2^2 \cdot t_1}{3 \cdot t_4} + \frac{U_1^2}{3} \cdot \frac{t_2 - t_1}{t_4} + \frac{U_1^2}{3} \cdot \frac{t_3 - t_2}{t_4} + \frac{U_2^2}{3} \cdot \frac{t_4 - t_3}{t_4} \quad \text{dla przebiegu z rys.9b.}$$