

# INSTRUKCJA DO ĆWICZENIA NR. 8

## Badanie prostowników i powielaczy napięcia

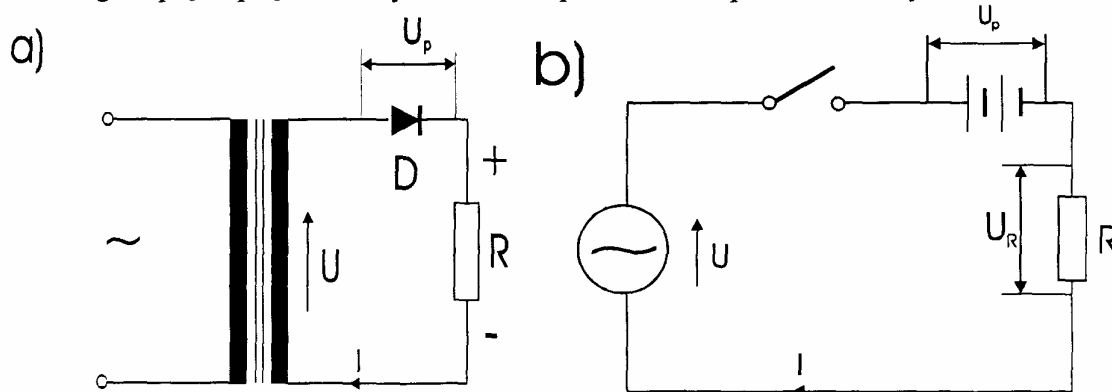
### 1. Wstęp.

Układy prostownicze służą do przetwarzania prądu zmiennego na prąd stały. Do budowy tych układów używa się elementów wykazujących właściwości jednokierunkowego przewodzenia prądu np. diod lub tyrystorów. Układy prostownicze, w których stosuje się elementy prostownicze nie mające elektrod sterujących (np. diody) są prostownikami niesterowanymi.

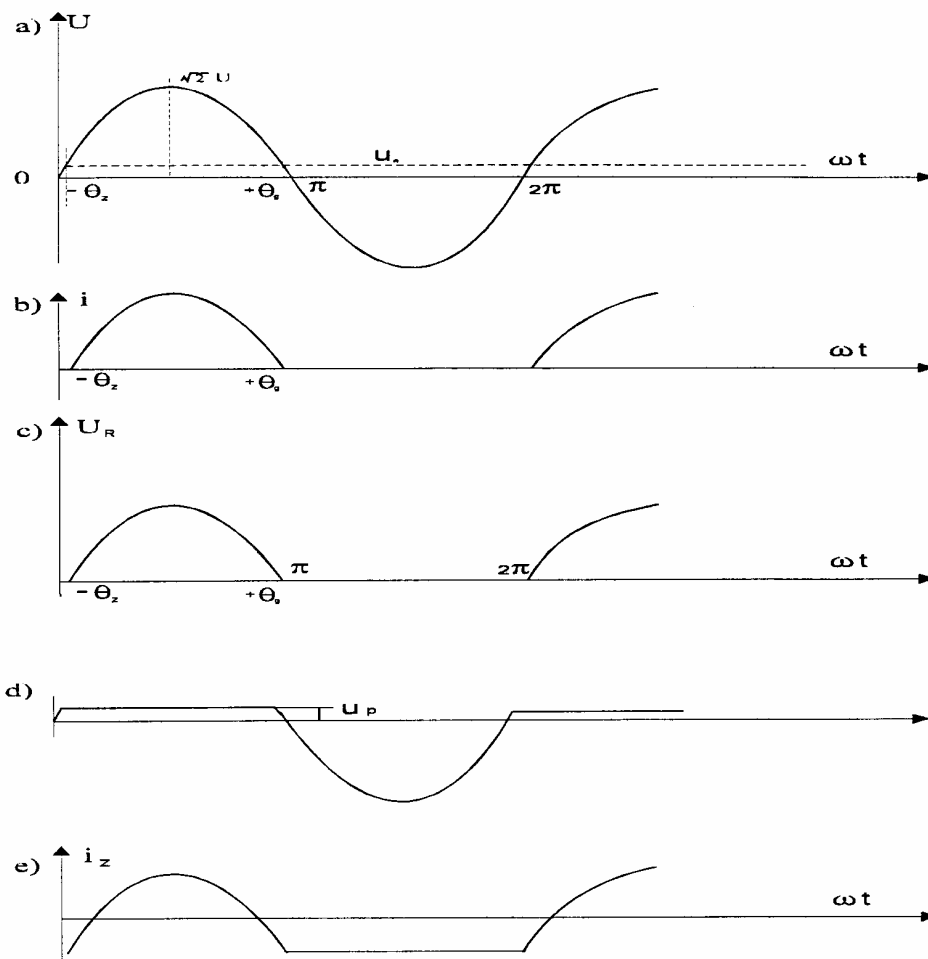
Najczęściej spotykanymi są prostowniki jednofazowe z filtrami. Układy te znajdują szerokie zastosowanie we wszelkiego rodzaju zasilaczach sieciowych. Rzadziej spotykanymi układami są powielacze napięcia. Układy te stosuje się w przypadkach, w których wymagane jest uzyskanie dużego napięcia stałego, w stosunku do napięcia otrzymywanego z sieci lub transformatora zasilającego (prostowniczego).

### 2. Układy prostowników jednofazowych.

Układ prostowniczy składa się zawsze z pewnej liczby elementów prostowniczych i jest zasilany ze źródła napięcia przemiennego najczęściej z sieci energetycznej za pośrednictwem transformatora prostowniczego. Najprostszym układem jest prostownik jednopołówkowy. Schemat tego układu obciążonego rezystancją przedstawia rys.1. Przebiegi napięć i prądów w tym układzie prostownika przedstawia rys.2.



Rys.1. Schemat układu prostowniczego jednopołówkowego.  
a) rzeczywisty, b) zastępczy.



Rys.2. Przebiegi napięć i prądów w prostowniku jednofazowym, obciążonym rezystancją: a) napięcia zasilania; b) prąd; c) napięcie wyjściowe; d) napięcie na elemencie prostowniczym; e) prąd uzwojenia pierwotnego transformatora.

Kąt przepływu prądu przez obwód jest równy:

$$\lambda = 2\theta = 2 \arccos \frac{U_p}{\sqrt{2} U}$$

Prąd obwodu (rys.2b) wyraża się wzorem

$$i = \frac{\sqrt{2} U \cos \omega t - U_p}{R} = \frac{\sqrt{2} U}{R} (\cos \omega t - \cos \theta)$$

podobnie napięcie na rezystancji obciążenia

$$U_R = \sqrt{2} U (\cos \omega t - \cos \theta)$$

Średnią wartość tego napięcia oblicza się przy pomocy wzoru

$$U_{R\dot{s}} = \frac{1}{T} \int_0^T U_R dt = \frac{1}{2\pi} \int_{-\theta_g}^{+\theta_g} \sqrt{2}U(\cos\omega t - \cos\theta)d(\omega t) = \frac{\sqrt{2}}{\pi}U(\sin\theta - \theta\cos\theta)$$

Wartość średnia prądu w obwodzie wyraża się zależnością

$$I_{\dot{s}r} = \frac{U_{R\dot{s}}}{R}$$

Wartość skuteczną prądu można obliczyć ze wzoru

$$I_{SK} = \sqrt{\frac{1}{2\pi} \int_0^{2\pi} i^2 d(\omega t)} = \frac{U}{R} \sqrt{\frac{1}{\pi} (\theta + 2\theta \cos^2 \theta - 1,5 \sin 2\theta)}$$

Stosunek wartości skutecznej do średniej prądu prostownika  $\frac{I_{SK}}{I_{SR}}$  rośnie dość szybko w miarę wzrostu  $\cos\theta$  (malenie  $\theta$ ) co świadczy o szybkim wzroście strat energetycznych układu i pogarszaniu się wykorzystania jego elementów, zwłaszcza transformatora. Można to wyrazić stosunkiem wartości mocy pozornej  $P_\pi$  w obwodzie prostownika do mocy prądu stałego  $P_R$  traconej w oporniku  $R$ .

$$\frac{P_\pi}{P_R} = \frac{U \cdot I_{SK}}{U_{R\dot{s}r} \cdot I_{\dot{s}r}}$$

Jeżeli spadek napięcia  $U_p$  na elemencie prostowniczym jest znaczenie mniejszy od napięcia zasilania  $U$  to  $2\theta \approx \pi$  i powyższe wzory upraszczają się.

$$\lambda = \pi \quad i = \frac{\sqrt{2}U}{R} \cos \omega t$$

$$U_{R\dot{s}r} = \frac{\sqrt{2}}{\pi} U \approx 0,45 \cdot U$$

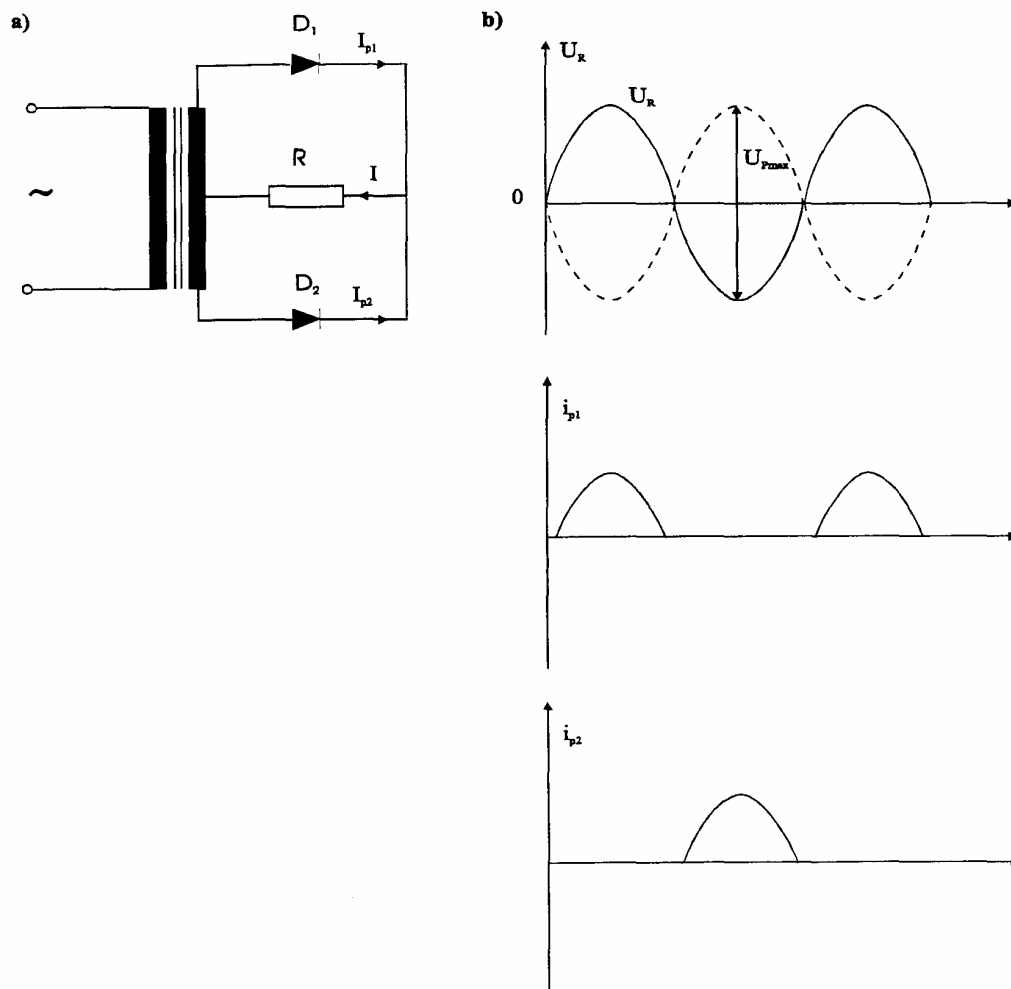
$$I_{\dot{s}r} = 0,45 \frac{U}{R}$$

$$\frac{I_{SK}}{I_{\dot{s}r}} = \frac{\pi}{2} \approx 1,57; \quad \frac{P_\pi}{P_R} = \frac{\pi^2}{2\sqrt{2}} \approx 3,49; \quad \frac{P_I}{P_R} = 2,69$$

Na elemencie prostowniczym, w czasie gdy nie przewodzi on prądu występuje napięcie ujemne, którego wartość największa, zwana maksymalnym napięciem wstecznym, jest równa.

$$U_{wst} = \sqrt{2}U \approx \pi \cdot U_{R\dot{s}r} \approx 3,14 U_{R\dot{s}r}$$

Lepsze parametry wykazuje prostownik dwupołwkowy (rys.3) i mostkowy (Graetza) pokazany na rys. 4.



Rys.3. Prostownik dwupołkowy obciążony rezystancją:

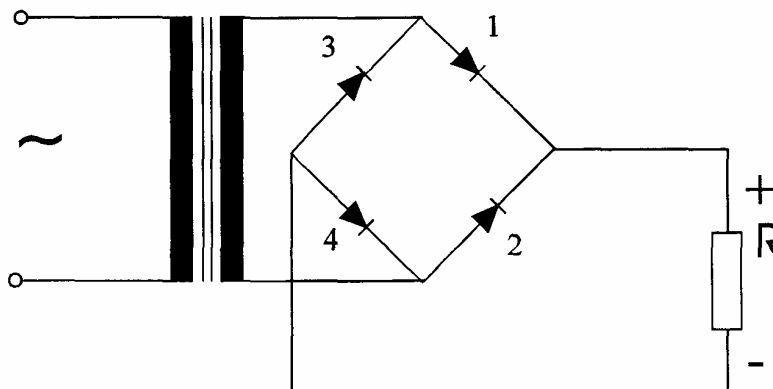
a)schemat, b)przebiegi napięcia, c)przebiegi prądu

Dla pomijalnie małych spadków napięcia na elementach prostowniczych wartość średnia napięcia w obu tych układach wynosi:

$$U_{Rsr} = \frac{2\sqrt{2}}{\pi} U \approx 0,90 U$$

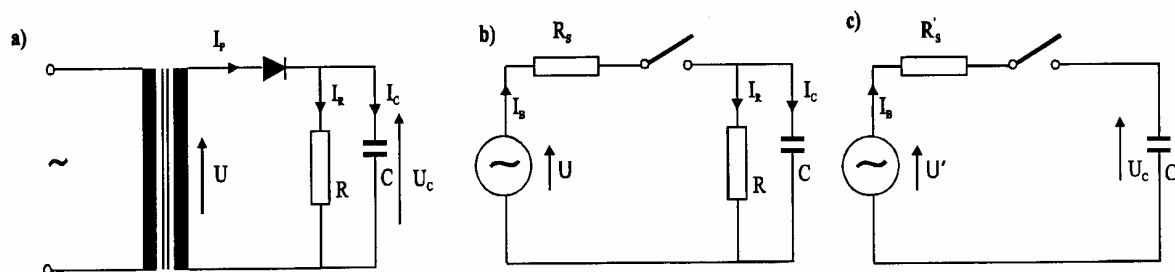
Prąd średni wyrazi się zależnością

$$I_{sr} = 0,90 \frac{U}{R}$$



Rys.4. Prostownik mostkowy (Graetza).

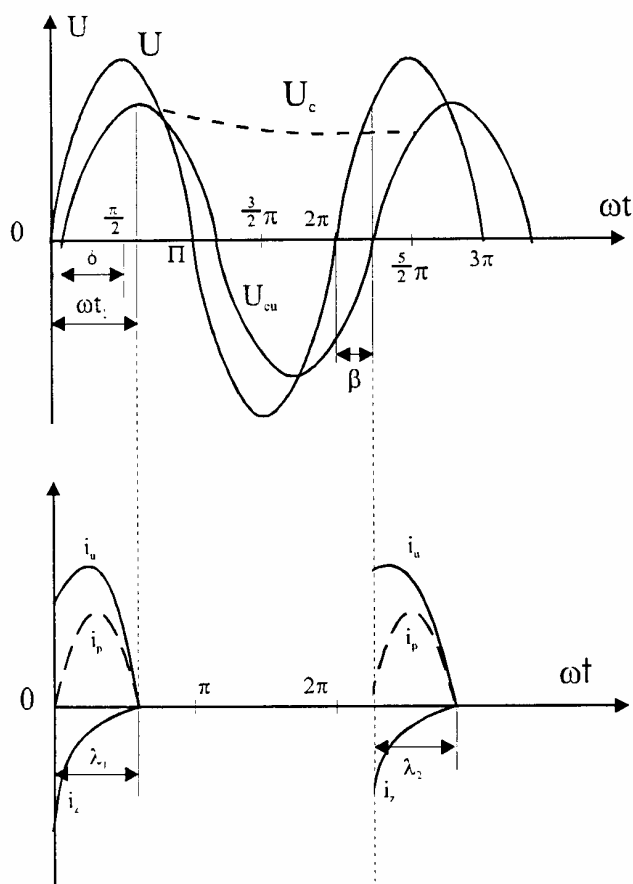
W praktyce prostowniki jednofazowe pracujące w układach zasilaczy wielu urządzeń elektronicznych obciążane są pojemnością, będącą zarazem jednym z elementów filtru RC lub LC. Schemat prostownika jednopołówkowego obciążonego pojemnością  $C$  i rezystancją  $R$  przedstawia rys.5.



Rys.5. Prostownik jednofazowy obciążony pojemnościowo:

a) schemat, b), c) układy zastępcze.

Przebiegi napięć i prądów w tym prostowniku pokazuje rys.6.



Rys.6. Przebiegi w prostowniku jednopołówkowym obciążonym pojemnościowo: a) napięcia, b) prądy.

Ładowanie kondensatora następuje wtedy gdy napięcie zasilające  $U$  jest większe od napięcia na kondensatorze  $U_c$ .

Całkowity prąd ładowania kondensatora jest sumą składowych; ustalonej  $i_u$  oraz zaburzeniowej (przejściowej)  $i_z$  i wyraża się wzorem:

$$i_c = i_u + i_z = \frac{\sqrt{2}U'}{|Z|} \left[ \sin(\omega t + \varphi') - \frac{\cos \varphi'}{\omega R R_s'} \exp\left(-\frac{t}{R_s' C}\right) \right]$$

$$\text{gdzie: } U' = U \cdot \frac{R}{R + R_s'}; \quad R_s' = \frac{R \cdot R_s}{R + R_s}$$

$$\varphi' = \arctg \frac{1}{\omega C R_s'}$$

Napięcie na kondensatorze wyraża się wzorem:

$$U_c = \frac{\sqrt{2}UR}{R + R_s} \left[ -\sin \varphi' \cos(\omega t + \varphi') + \frac{R_s'}{\omega C |Z|} \exp\left(-\frac{t}{R_s' C}\right) \right]$$

Prąd płynący przez element prostowniczy oblicza się przy pomocy wzoru:

$$i_p = i_c + i_R = i_c + \frac{U_c}{R}$$

po podstawieniu  $i_c$  i  $u_c$ :

$$i_p = \frac{\sqrt{2}UR}{R + R_s |Z|} \left[ \frac{1}{\sin \varphi} \cos(\omega t + \varphi' + \varphi) - \frac{R}{(R + R_s) \omega C |Z|} \exp\left(-\frac{t}{R_s' C}\right) \right]$$

gdzie:  $\varphi = \arctg \omega RC$  – kąt fazowy obciążenia

Po ustaleniu przepływu prądu zaczyna się wyładowanie kondensatora  $C$  naładowanego do napięcia  $U_{co}$ :

$$U_{co} = \sqrt{2}U \frac{R}{R + R_s} \sin \varphi' \sin \varphi$$

Wyładowanie to przebiega wg krzywej wykładniczej, zgodnie ze wzorem:

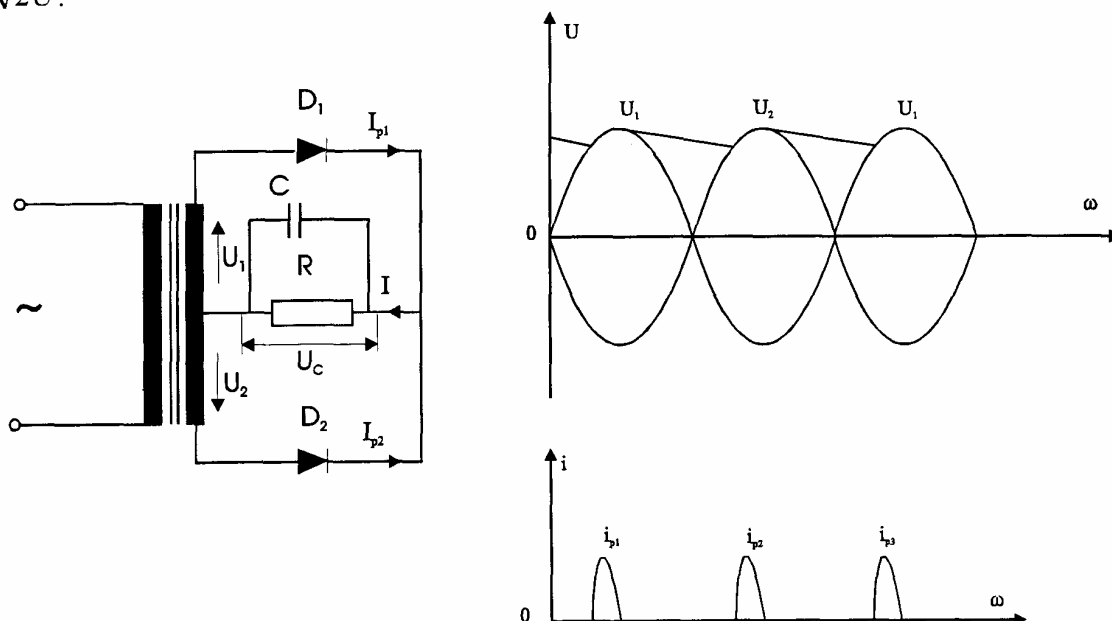
$$U_c = U_{co} \exp\left(-\frac{t - t_1}{RC}\right)$$

Proces wyładowania kondensatora trwa do chwili zrównania się napięcia  $U_c$  z napięciem zasilania. W momencie tym rozpoczyna się ponowne doładowanie kondensatora prądem  $i_c$ , który oblicza się tak samo jak w poprzednim okresie. Impuls prądu jest tu jednak krótszy o czas odpowiadający kątowi  $\beta$ , amplituda i wartość średnia maleją, gdyż prąd ładowania uzupełnia teraz tylko stratę ładunku kondensatora wynikłą z jego częściowego rozładowania przez rezystancję  $R$ .

W układzie dwupołwkowym (rys.7.) występują podobne przebiegi z tą tylko różnicą, że wyładowanie kondensatora  $C$  kończy się szybciej, a mianowicie w momencie zrównoważenia się opadającego napięcia  $u_c$  z napięciem zasilania drugiej połówki układu.

Kąt opóźnienia  $\beta$  jest więc większy a kąt przepływu prądu przez element prostowniczy- większy.

Z przedstawionych na rys.6 i 7 przebiegów wynika, że przy zmniejszaniu prądu płynącego przez rezystancję  $R$  do zera (zwiększanie  $R$  do  $\infty$ ), wartość średnia napięcia wyprostowanego  $U_{r\acute{s}r} = U_{c\acute{s}r}$  dąży do wartości amplitudy napięcia zasilającego równej  $\sqrt{2}U$ .



Rys.7. Prostownik dwupołkowy obciążony pojemnościowo:

a) schemat; b) napięcia, c) prądy.

Największe napięcie wsteczne występujące na elemencie prostowniczym wyraża się dla obydwu prostowników przybliżoną zależnością:

$$U_{wst} \cong U_c + \sqrt{2}U \approx \sqrt{2}U + \sqrt{2}U = 2\sqrt{2}U$$

Wartość tego napięcia jest blisko 3-krotnie większa od wartości skutecznej napięcia zasilającego, co stwarza konieczność doboru elementów prostowniczych o odpowiednio dużej wartości dopuszczalnego napięcia wstecznego. Powyższej wady nie wykazuje prostownik dwupołkowy mostkowy (w układzie Graetza).

Najwyższa wartość napięcia wstecznego jaka pojawia się na każdej diodzie jest równa amplitudzie napięcia zasilającego

$$U_{wst} = \sqrt{2}U$$

zarówno przy obciążeniu rezystancyjnym jak i pojemnościowym.

Przebiegi napięcia i prądu obciążenia są podobne do przebiegów w prostowniku dwupołkowym (rys.7.)

Dodatkową zaletą układu Graetza jest lepsze wykorzystanie mocy transformatora. Głównymi wadami są: duża liczba elementów prostowniczych i większe spadki napięcia  $U_p$  na mostku prostowniczym.

## 2.1. Filtry prostownicze.

Filtry prostownicze są to obwody, których zadaniem jest przepuszczenie składowej stałej napięcia wyprostowanego, oraz tłumienie składowej zmiennej tego napięcia. Miarą jakości filtrowanego napięcia jest współczynnik tętnień wyrażający się wzorem:

$$\tau = \frac{U_T}{U_{\acute{s}r}} \cdot 100$$

gdzie:  $t$ - współczynnik tętnień w procentach,  
 $U_T$ - skuteczna wartość napięcia tętnień (składowej zmiennej)  
 $U_{sr}$ - wartość średnia napięcia.

Wartość współczynnika tętnień powinna być możliwie jak najmniejsza. Zależy ona od rodzaju układu prostowniczego oraz od skuteczności filtru. Skuteczność filtru można wyrazić wzorem:

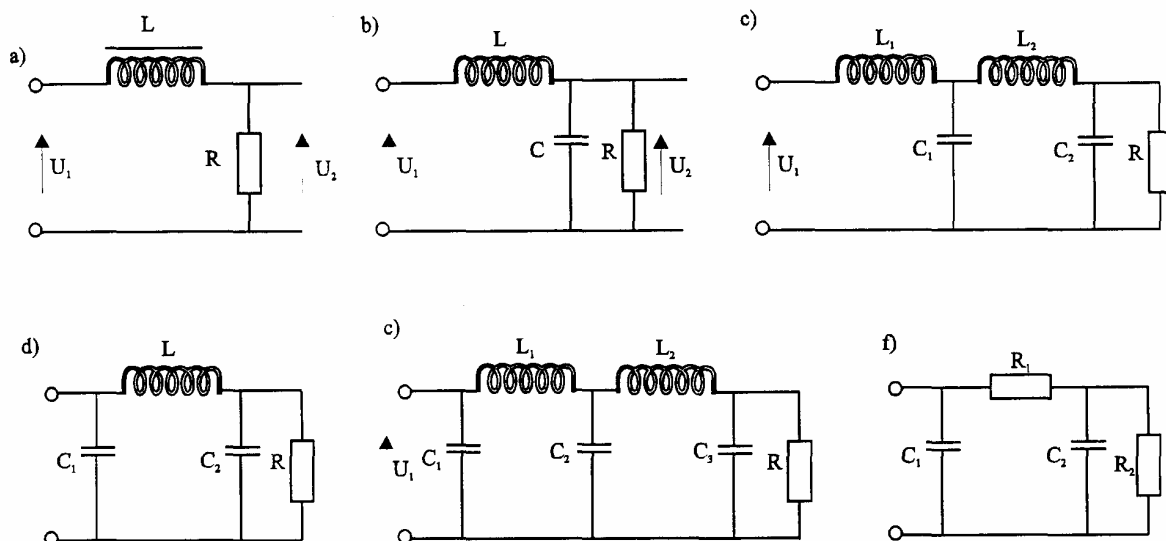
$$b = \left| \frac{U_1}{U_2} \right|$$

gdzie  $U_1$  jest wartością skuteczną najniższej harmonicznej napięcia wejściowego filtru a  $U_2$  wartością skuteczną tej harmonicznej na wyjściu filtru.

Pod względem układowym filtry można podzielić na:

- Filtry zbudowane na elementach RC.
- Filtry zbudowane na elementach LC.

Filtry LC stosowane w układach większej mocy posiadają wejście indukcyjne (typu  $\Gamma$ ) natomiast w układach małej mocy wejście pojemnościowe (typu  $\Pi$ ). W układach najmniejszej mocy stosuje się filtry RC. Skuteczność filtrów można zwiększyć przez zastosowanie większej liczby członów. Rys.8 przedstawia schematy typowych filtrów prostowniczych.



Rys.8. Schematy typowych filtrów: a) dławikowy; b) LC o wejściu indukcyjnym; c) dwuczłonowy LC o wejściu indukcyjnym; d) LC o wejściu pojemnościowym; e) dwuczłonowy LC o wejściu pojemnościowym; f) RC o wejściu pojemnościowym.

### 3. Powielacze napięcia.

Układy te mają zastosowanie w zakresie małych natężeń prądu (do 0,1-0,2 A). Zasada działania powielaczy polega na ładowaniu przez oddzielne prostowniki kilku szeregowo połączonych kondensatorów i wykorzystaniu w obwodzie obciążenia sumarycznego napięcia tych kondensatorów.

Najprostszym z powielaczy jest symetryczny podwajacz napięcia (rys.9.). W dodatnim półokresie napięcia przez diodę  $D_1$  ładuje się kondensator  $C_1$ . W ujemnym półokresie przewodzi dioda  $D_2$  i ładuje się kondensator  $C_2$ .

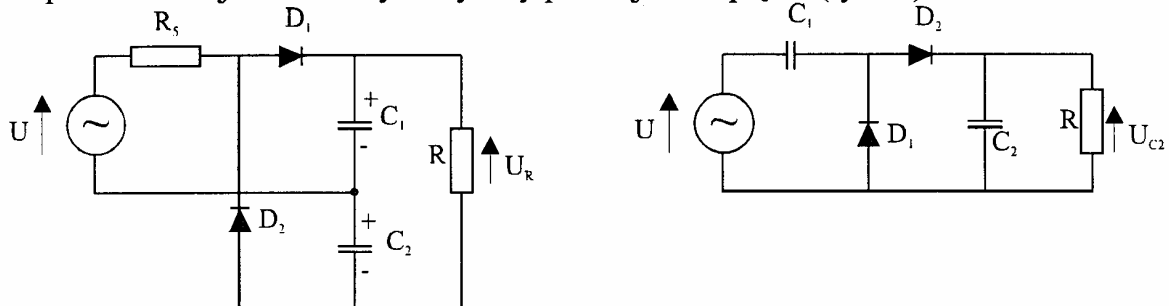
Wyladowanie obu szeregowo połączonych kondensatorów następuje przez obciążenie R. Stała czasowa rozładowania kondensatorów wynosi:

$$\tau = R \frac{C_1 \cdot C_2}{C_1 + C_2}$$

$$\text{a dla } C_1 = C_2 = C$$

$$\tau = 0,5RC$$

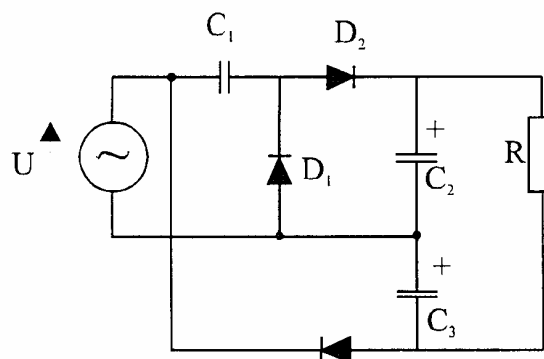
Zupełnie inaczej działa niesymetryczny podwajacz napięcia (rys.10).



Rys. 10a. Symetryczny podwajacz napięcia Rys.10b. Niesymetryczny podwajacz napięcia.

W ujemnej połowce okresu przewodzi dioda  $D_1$  ładując kondensator  $C_1$ , którego napięcie osiąga wartość  $U_{\max}$ . W dodatniej połowce przewodzi dioda  $D_2$  i kondensator  $C_2$  ładuje się napięciem będącym sumą napięcia zasilania i napięcia kondensatora  $C_1$ , a więc równym podwójnej wartości szczytowej napięcia zasilania  $U$ . Kondensator  $C_2$  wyladowuje się aperiodycznie przez rezystancję R ze stałą czasową  $\tau = RC_2$ .

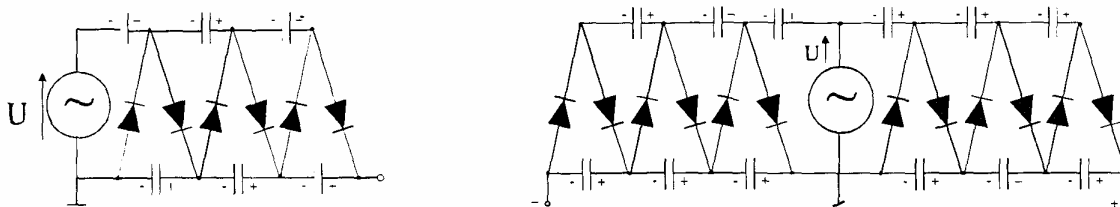
Niesymetryczny potrajacz napięcia przedstawia rys.11.



Rys.11. Niesymetryczny potrajacz napięcia.

Układ składa się z elementów  $C_1$ ,  $D_1$ ,  $C_1$ ,  $D_2$ , stanowiących niesymetryczny podwajacz napięcia, dający na kondensatorze  $C_2$  napięcie dwukrotnie większe od napięcia zasilania. Trzeci kondensator  $C_3$  jest ładowany przez diodę  $D_3$  w ujemnej połowce okresu napięcia zasilania. Napięcie wyjściowe jest równe sumie napięć na kondensatorach  $C_2$  i  $C_3$ , czyli w przybliżeniu trzykrotnej wartości napięcia zasilania.

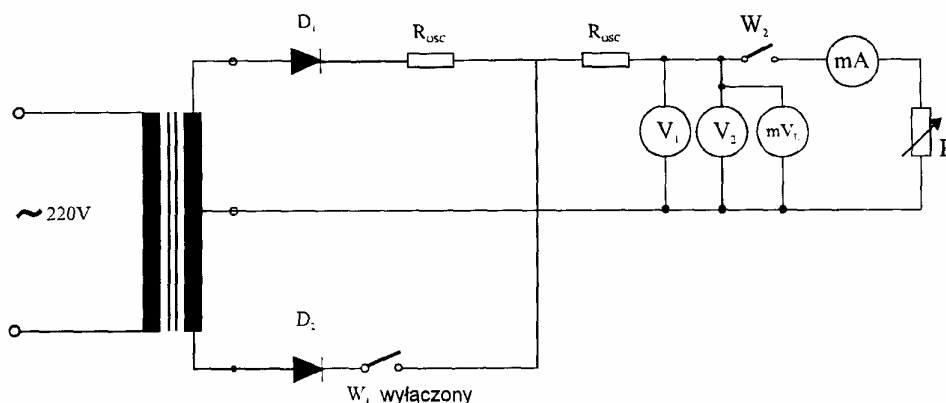
Wielokrotne powiększanie napięcia uzyskuje się przez dodawanie dalszych sekcji diodowo-pojemnościowych (rys.12.).



Rys.12. Wielokrotne powielacze napięcia: a) niesymetryczne, b) symetryczne.

## 4. Przebieg ćwiczenia.

### 4.1. Badanie prostownika jednopółwkowego obciążonego rezystancją.



Przyrządy: V - woltomierz EM  $0 \div 15$  V  
V1 - woltomierz EM  $0 \div 15$  V  
V2 - woltomierz ME  $0 \div 15-30$  V  
mVL- miliwoltomierz elektroniczny  
mA - miliamperomierz ME:  $0 \div 400$ mA  
Osc. - Oscyloskop katodowy

Pomiary:

|    |    |   |  |
|----|----|---|--|
| I  | mA | 0 |  |
| U1 | V  |   |  |
| U0 | V  |   |  |
| Ut | V  |   |  |
| t  | %  |   |  |

I - prąd wskazywany przez mA (wartość średnia),  
U1- napięcie wskazywane przez V1 (wartość skuteczna),  
U0- napięcie wskazywane przez V2 (wartość średnia),  
Ut- napięcie wskazywane przez mVL (skuteczna wartość napięcia),

Na podstawie pomiarów wykreślić charakterystyki.  $U_1=f(I)$ ;  $U_0=f(I)$ ;  $t=f(I)$ .

Narysować przebiegi napięcia na obciążeniu i prąd diody.

## 4.2. Badanie prostownika dwupołówkowego obciążonego rezystancją

Schemat pomiarowy i tabela pomiarów jak w p.4.1.

Wyłącznik W1 zamknięty.

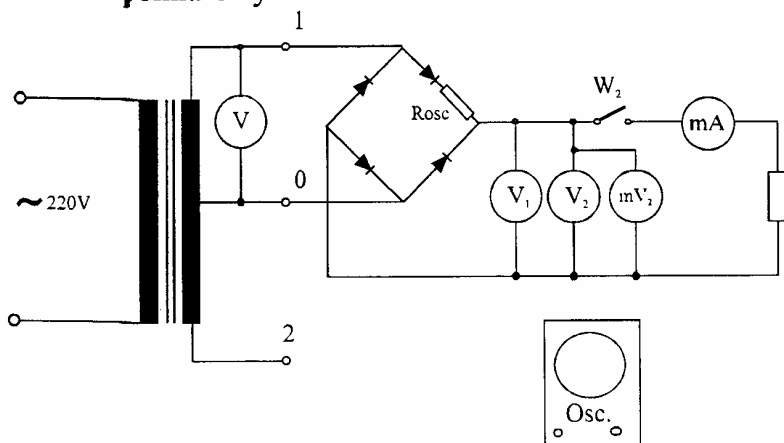
Wykreślić charakterystyki  $U_1 = f(I)$ ;  $U_0 = f(I)$ ;  $t = f(I)$ .

Narysować przebiegi napięcia na obciążeniu i prądu pojedynczej diody.

## 4.3. Badanie prostownika mostkowego.

Przyrządy jak w p. 4.1.

Schemat pomiarowy na str.14.



Pomiary:

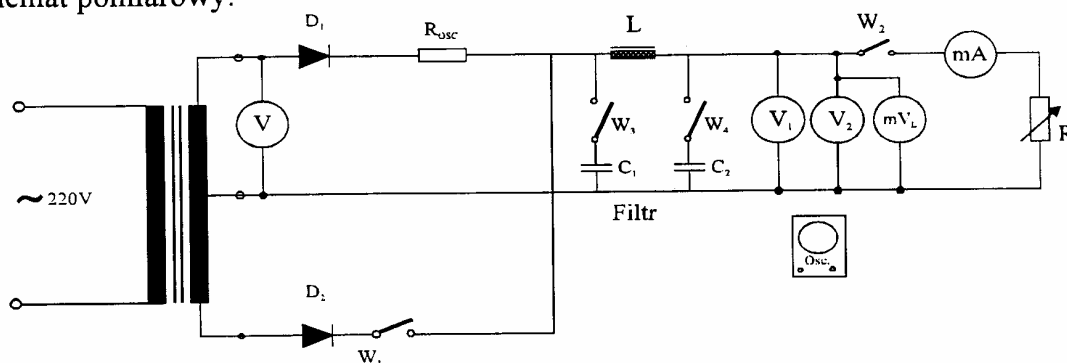
|    |    |   |  |
|----|----|---|--|
| I  | mA | 0 |  |
| U1 | V  |   |  |
| U0 | V  |   |  |
| Ut | V  |   |  |
| t  | %  |   |  |

Na podstawie pomiarów wykreślić charakterystyki  $U_1 = f(I)$ ;  $U_0 = f(I)$ ;  $t = f(I)$ .

Narysować przebiegi napięcia na obciążeniu i prądu diody.

#### 4.4. Badanie prostownika jednopołówkowego z filtrem LC.

Schemat pomiarowy.



Przyrządy jak w p.4.1.

Wyłącznik  $W_1$  - otwarty;  $W_3, W_4$  - zwarte

Pomiary:

|       |    |   |  |
|-------|----|---|--|
| I     | mA | 0 |  |
| $U_1$ | V  |   |  |
| $U_0$ | V  |   |  |
| $U_t$ | V  |   |  |
| t     | %  |   |  |

Na podstawie pomiarów wykreślić charakterystyki  $U_1=f(I)$ ;  $U_0=f(I)$ ;  $t=f(I)$ . Narysować przebiegi napięcia na obciążeniu, napięcia na diodzie i prądu diody.

#### 4.5. Badanie prostownika dwupołówkowego z filtrem LC.

Schemat pomiarowy jak w p.4.4.

Wyłącznik  $W_1$  - zamknięty.

Pomiary jak w p.4.4.

Należy wykreślić charakterystyki  $U_1 = f(I)$ ;  $U_0 = f(I)$ ;  $U_t = f(I)$ ;

Podać przebiegi napięcia na obciążeniu i prądu diody.

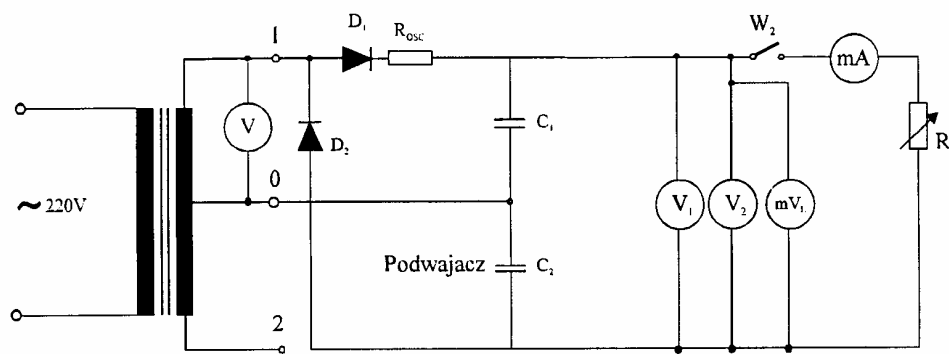
#### 4.6. Badanie prostownika dwupołówkowego z filtrem RC.

Schemat pomiarowy i przyrządy jak w p.4.4.

Zamiast indukcyjności  $L$  włączyć rezystor  $R_1$ . Pomiary jak p.4.4. i 4.5. Wykreślić charakterystyki  $U_1 = f(I)$ ;  $U_0 = f(I)$ ;  $U_t = f(I)$  i porównać z odpowiednimi charakterystykami z p.4.5.

#### 4.7. Badanie symetrycznego podwajacza napięcia .

Schemat pomiarowy.

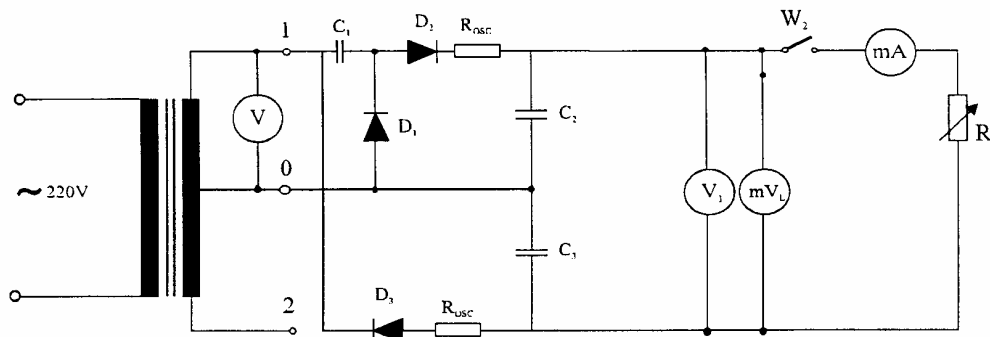


|       |    |   |  |
|-------|----|---|--|
| I     | mA | 0 |  |
| $U_0$ | V  |   |  |
| $U_t$ | V  |   |  |
| t     | %  |   |  |

Należy wykreślić  $U_0 = f(I)$ ;  $t = f(I)$ . Narysować przebieg prądu diody.

#### 4.8. Badanie niesymetrycznego potrajacza napięcia.

Schemat pomiarowy.



Przyrządy:  $V_1$  - woltomierz ME 0 - 60 V

Pomiary:

|       |    |   |  |
|-------|----|---|--|
| I     | mA | 0 |  |
| $U_0$ | V  |   |  |
| $U_t$ | V  |   |  |
| t     | %  |   |  |

Wykreślić  $U_0 = f(I)$ ;  $t = f(I)$ . Narysować przebiegi prądu diody  $D_2$  i diody  $D_3$ .