

**Zakład Napędów Wieloźródłowych  
Instytut Maszyn Roboczych Ciężkich  
Politechnika Warszawska**

**Laboratorium Elektrotechniki i Elektroniki**

**Ćwiczenie E1 - instrukcja**

**Zasilacze:**

**Prostowniki niesterowane, prostowniki sterowane**

**Warszawa 2018r.**

## Spis treści

1. Cel i zakres ćwiczenia
2. Wiadomości teoretyczne
3. Zagadnienia do opracowania
4. Literatura pomocnicza

### 1. Cel i zakres ćwiczenia

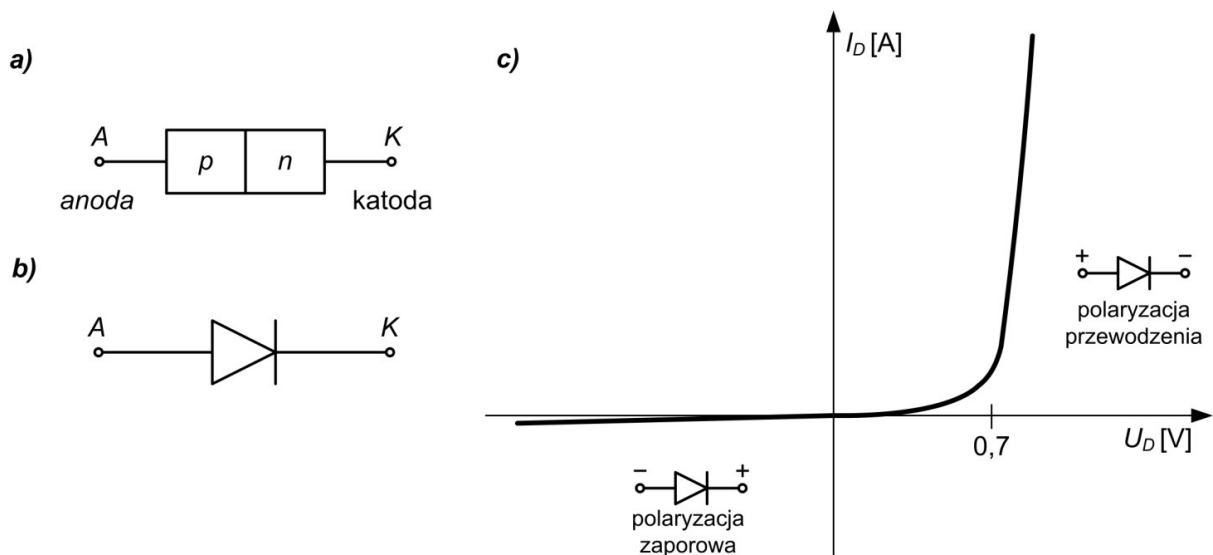
Ćwiczenie ma na celu poznanie zasad działania i wielkości charakteryzujących: prostowniki niesterowane i prostowniki sterowane, to jest układy elektroniczne, które umożliwiają przekształcanie napięć i prądów z możliwością płynnej regulacji ich wartości.

### 2. Wiadomości teoretyczne

#### 2.1. Prostowniki niesterowane

Prostownanie jest to proces, w wyniku, którego z przebiegu przemiennego (mającego wartości dodatnie i ujemne) otrzymuje się przebieg przybierający wartości tylko jednego znaku. Do realizacji powyższego procesu stosuje się elementy nieliniowe spełniające funkcję jednokierunkowych zaworów prądowych (przeważnie diody półprzewodnikowe).

Podstawową cechą elementu prostowniczego jest charakterystyka prądowo–napięciowa przebiegająca odmiennie dla dodatnich i ujemnych wartości napięć. Przykładową charakterystykę diody prostowniczej przedstawia rysunek 1c.

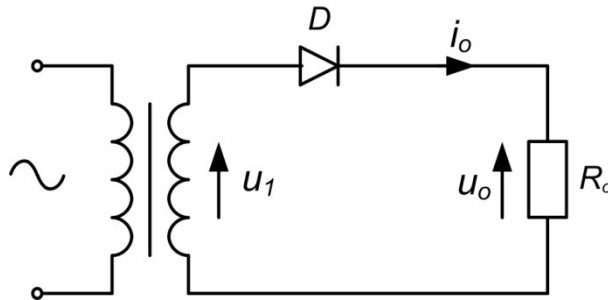


Rys.1. Dioda prostownicza: a) struktura, b) symbol, c) charakterystyka prądowo-napięciowa

Dioda prostownicza jest najprostszym elementem półprzewodnikowym wytworzonym przez połączenie dwóch materiałów typu *p* i *n*, stanowiących odpowiednio: anodę i katodę.

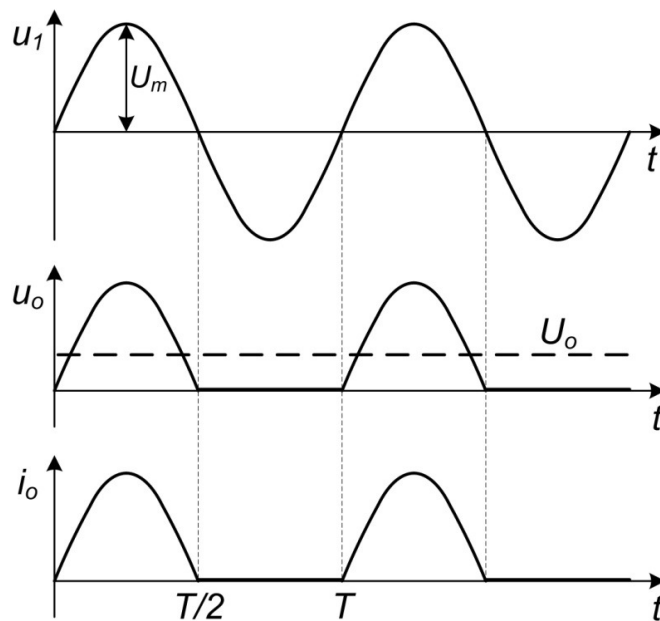
### 2.1.1. Prostownik jednofazowy

Najprostszym układem prostowniczym jest prostownik jednofazowy przedstawiony na rysunku 2.



Rys.2. Schemat prostownika jednofazowego

Dioda prostownicza podczas przedziału czasowego od  $0$  do  $T/2$  odpowiadającego dodatniej półfali napięcia wejściowego jest spolaryzowana w kierunku przewodzenia i przez odbiornik płynie prąd.



Rys.3. Przebiegi napięć i prądu w układzie prostowniczym jednofazowym z obciążeniem rezystancyjnym

W kolejnym przedziale czasowym od  $T/2$  do  $T$  odpowiadającym ujemnej półfali napięcia wejściowego dioda jest spolaryzowana w kierunku zaporowym i blokuje przepływ prądu przez odbiornik. W rezultacie otrzymujemy napięcie wyjściowe o jednakowej polaryzacji:

$$\begin{cases} u_o = U_m \sin \omega t & \text{dla } 0 \leq \omega t \leq \pi \\ u_o = 0 & \text{dla } \pi \leq \omega t \leq 2\pi \end{cases} \quad (1)$$

oraz jednokierunkowy prąd odbiornika:

$$i_o = \frac{u_o}{R_o} \quad (2)$$

Wartość średnia napięcia wyjściowego wyznaczona za cały okres przebiegu wynosi:

$$U_o = \frac{1}{T} \int_0^{T/2} u_1 dt = \frac{1}{2\pi} \int_0^\pi U_m \sin \omega t d\omega t = \frac{U_m}{\pi} = 0,318U_m \quad (3)$$

Napięcie wyjściowe można również przedstawić w postaci szeregu Fouriera:

$$u_o = \frac{U_m}{\pi} + \frac{U_m}{2} \sin \omega t - \frac{2U_m}{3} \cos 2\omega t - \frac{2U_m}{15} \cos 4\omega t - \dots \quad (4)$$

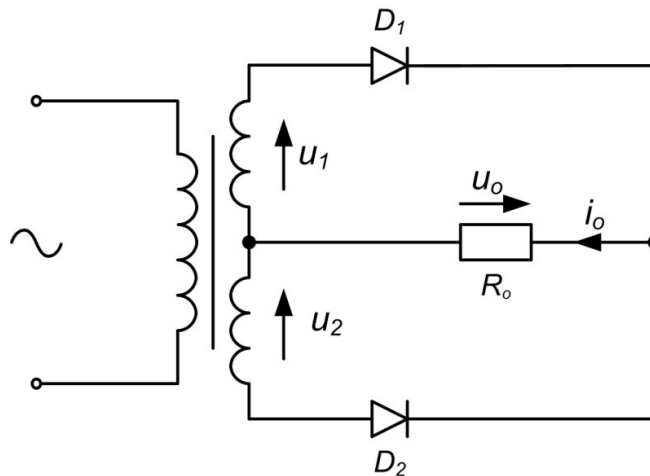
Składowe stałe napięcia wyjściowego i prądu wyjściowego wynoszą odpowiednio:

$$U_o = \frac{U_m}{\pi} \quad ; \quad I_o = \frac{U_m}{\pi R_o} \quad (5)$$

Składowa stała prądu, która przepływa przez transformator powoduje podmagnesowanie rdzenia transformatora, czyli przesunięcie jego punktu pracy do zakresu dużego prądu magnesowania i małej przenikalności magnetycznej. Powoduje to konieczność przewymiarowania transformatora w stosunku do mocy pobieranej przez odbiornik.

### 2.1.2. Prostownik dwupołówkowy

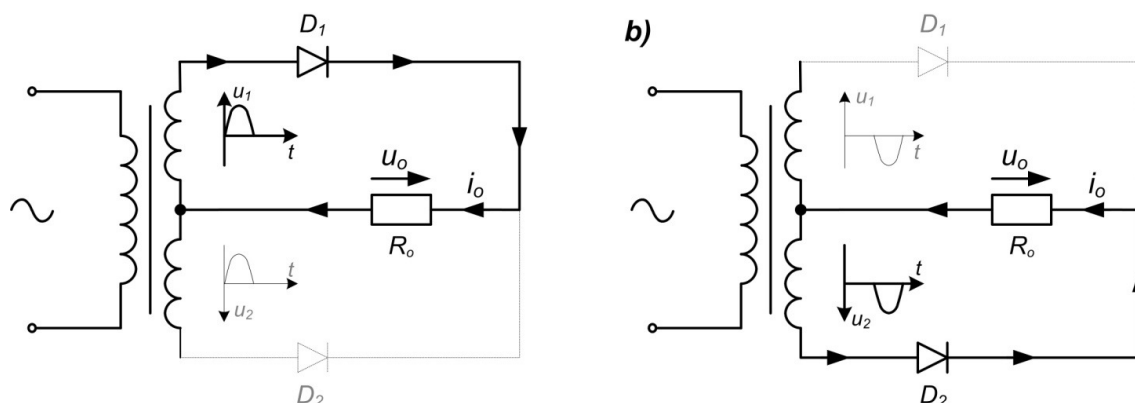
Jednym z prostowników dwupołówkowych jest układ wykorzystujący transformator z wyprowadzonym środkiem uzwojenia wtórnego oraz dwie diody prostownicze, jak pokazano na rysunku 4.



Rys.4. Schemat prostownika dwupołówkowego

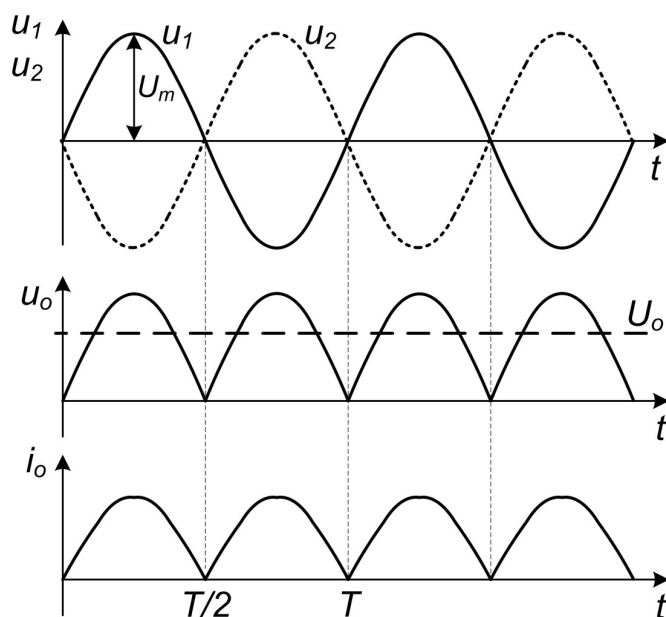
W układzie tym diody przewodzą na przemian, w czasie półfali dodatniej napięcia wejściowego przewodzi dioda  $D_1$  i prąd płynie przez górną część uzwojenia transformatora, diodę pierwszą i obciążenie, natomiast w czasie półfali ujemnej przewodzi dioda  $D_2$  i prąd płynie przez dolną część uzwojenia transformatora, diodę drugą i obciążenie.

Zasada działania prostownika dwupołówkowego została zilustrowana na rysunku 5.



Rys.5. Obwód zastępczy prostownika dwupołówkowego: a) dla dodatniej półfali napięcia wejściowego, b) dla ujemnej półfali napięcia wejściowego

Przebiegi napięć i prądu w prostowniku dwupołówkowym przedstawiono na rysunku 6.



Rys.6. Przebiegi napięć i prądu w układzie prostowniczym dwupołówkowym z obciążeniem rezystancyjnym

Na wyjściu prostownika otrzymujemy napięcie o jednakowej polaryzacji:

$$\begin{cases} u_o = U_m \sin \omega t & \text{dla } 0 \leq \omega t \leq \pi \\ u_o = -U_m \sin \omega t & \text{dla } \pi \leq \omega t \leq 2\pi \end{cases} \quad (6)$$

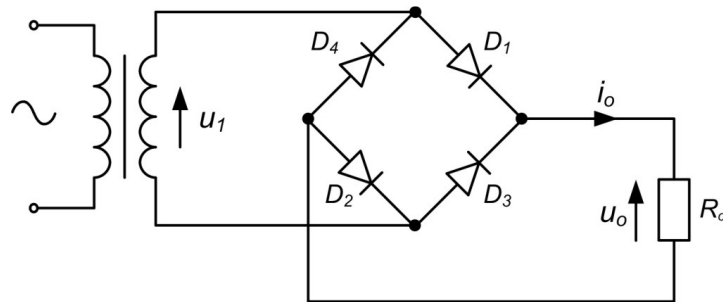
Wartość średnia napięcia wyjściowego wyznaczona za cały okres przebiegu wynosi:

$$U_o = \frac{1}{T} \int_0^{T/2} u_1 dt + \frac{1}{T} \int_{T/2}^T u_2 dt = \frac{1}{2\pi} \int_0^{\pi} U_m \sin \omega t d\omega t + \frac{1}{2\pi} \int_{\pi}^{2\pi} -U_m \sin \omega t d\omega t = \frac{2U_m}{\pi} \quad (7)$$

Wadą tego układu jest konieczność stosowania transformatora z symetrycznym uzwojeniem wtórnym.

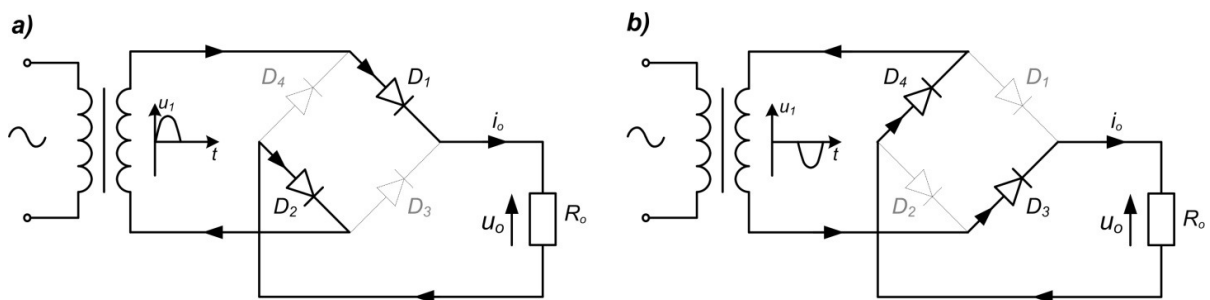
### 2.1.3. Pr prostownik dwupołówkowy mostkowy

Najczęściej stosowanym prostownikiem dwupołówkowym jest układ mostkowy zbudowany z czterech diod prostowniczych.



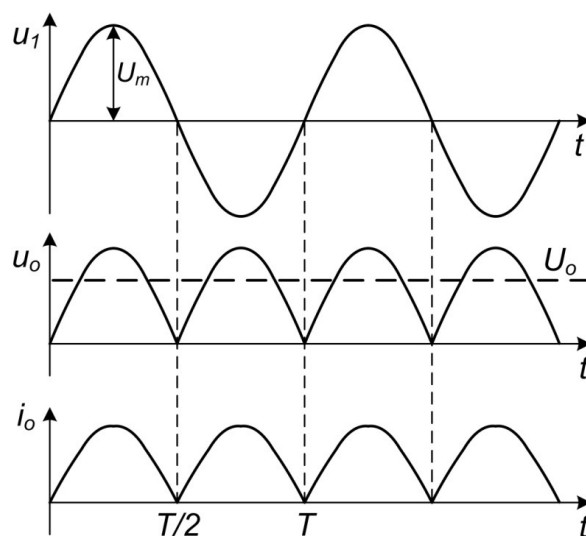
Rys.7. Schemat prostownika dwupołówkowego mostkowego

W układzie tym dla dodatnich wartości napięcia wejściowego przewodzą diody  $D_1$  i  $D_2$ , a dla ujemnych przewodzą diody  $D_3$  i  $D_4$ , jak pokazano na rysunku 8. Prąd płynie przez obciążenie w jednym kierunku, a napięcie na odbiorniku jest jednakowej polaryzacji.



Rys.8. Obwód zastępczy prostownika dwupołówkowego mostkowego: a) dla dodatniej półfali napięcia wejściowego, b) dla ujemnej półfali napięcia wejściowego

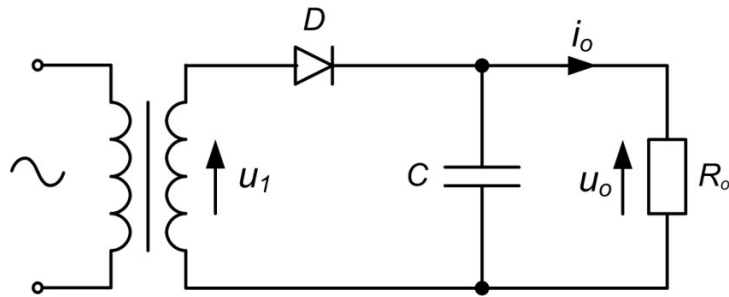
Prąd jest pobierany z uzwojenia wtórnego przez cały okres, co daje lepsze wykorzystanie mocy transformatora. Wadą natomiast układu jest konieczność stosowania czterech diod.



Rys.9. Przebiegi czasowe napięć i prądu w prostowniku dwupołówkowym mostkowym z obciążeniem rezystancyjnym

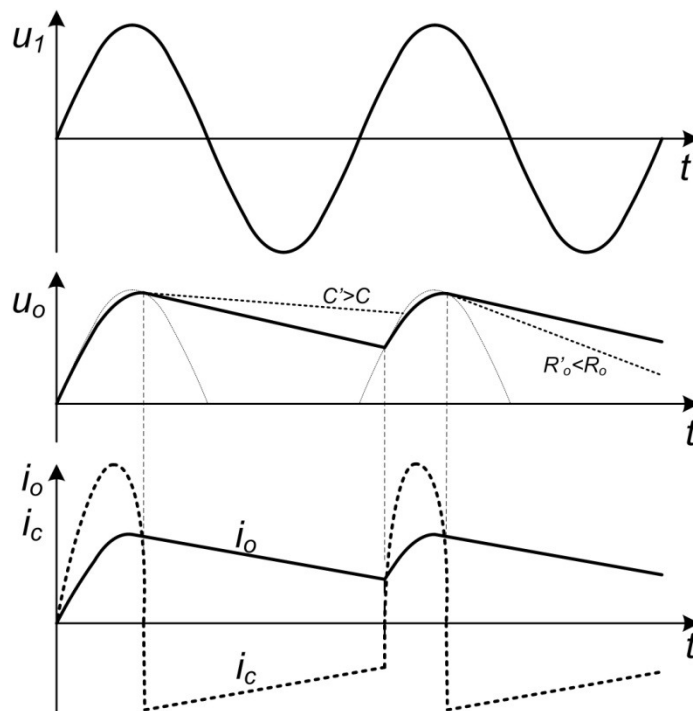
### 2.1.2. Prostownik z filtrem pojemnościowym

Prostowniki z obciążeniem rezystancyjnym charakteryzują się dużym poziomem tętnień napięcia i prądu wyjściowego, co ogranicza ich zakres zastosowania w wielu układach elektronicznych. Zmniejszenie tętnień napięcia wyjściowego można uzyskać przez dołączenie filtrów wygładzających. Podstawową częścią takiego filtru są elementy reaktancyjne. Na rys. 10 przedstawiono prostownik jednofazowy z filtrem w postaci kondensatora dołączonego równolegle do odbiornika. Otrzymuje się w ten sposób prostownik z obciążeniem rezystancyjno-pojemnościowym.



Rys.10. Schemat prostownika jednofazowego z filtrem pojemnościowym

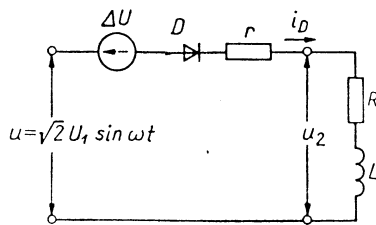
W czasie trwania dodatniej półfali napięcia wejściowego, kiedy napięcie wejściowe  $u_1$  przewyższa napięcie wyjściowe  $u_o$ , kondensator  $C$  doładuje się do maksymalnej wartości napięcia wejściowego. Od chwili, w której napięcia  $u_1$  i  $u_o$  zrównują się, dioda nie przewodzi prądu, co powoduje, że kondensator rozładowuje się ze stałą czasową  $R_o C$ . Proces ten trwa do momentu, kiedy w następnym cyku nastąpi zrównanie się napięcia wejściowego i wyjściowego, po czym kondensator jest ponownie doładowywany.



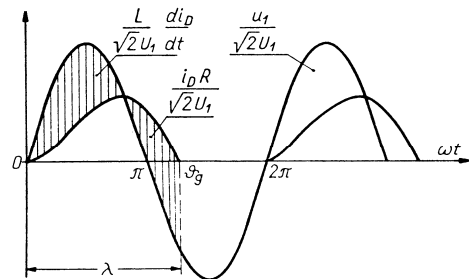
Rys.11. Przebiegi czasowe napięć i prądów w prostowniku jednofazowym z obciążeniem rezystancyjnym-pojemnościowym

### 2.1.3. Prostownik z obciążeniem rezystancyjno-indukcyjnym

Schemat zastępczy prostownika przy obciążeniu R, L oraz przebiegi napięć przedstawiają rysunki 12 i 13:



Rys.12. Schemat zastępczy



Rys.13. Przebiegi napięć

Rozpatrując powyższy obwód przy pominięciu rezystancji r i spadku napięcia  $\Delta U$ , przy napięciu

$$\text{zasilania} \quad u_1 = \sqrt{2} U_1 \sin \omega t \quad - \quad i_D = \frac{\sqrt{2} U_1}{R} \cos \Theta_2 [\sin(\omega t - \Theta_2) + \sin \Theta_2 \exp(-\omega t \operatorname{ctg} \Theta_2)]$$

$$\text{oraz} \quad u_2 = \sqrt{2} U_1 \sin \omega t \quad , \quad \text{gdzie:} \quad \Theta_2 = \arctan(\omega L/R).$$

Włączenie prostownika następuje przy  $t = 0$ , natomiast prąd przestaje płynąć w obwodzie w chwili, gdy samoindukcja równoważy napięcie wejściowe. Wartość średnią prądu obciążenia

$$\text{można zapisać jako:} \quad i_D = \frac{\sqrt{2} U_1}{2\pi R} (1 - \cos \lambda).$$

Układy prostownikowe mogą pracować również, gdy obciążenie stanowi odbiornik o charakterze R,L przy elementach połączonych równolegle.

## 2.2. Prostowniki sterowane

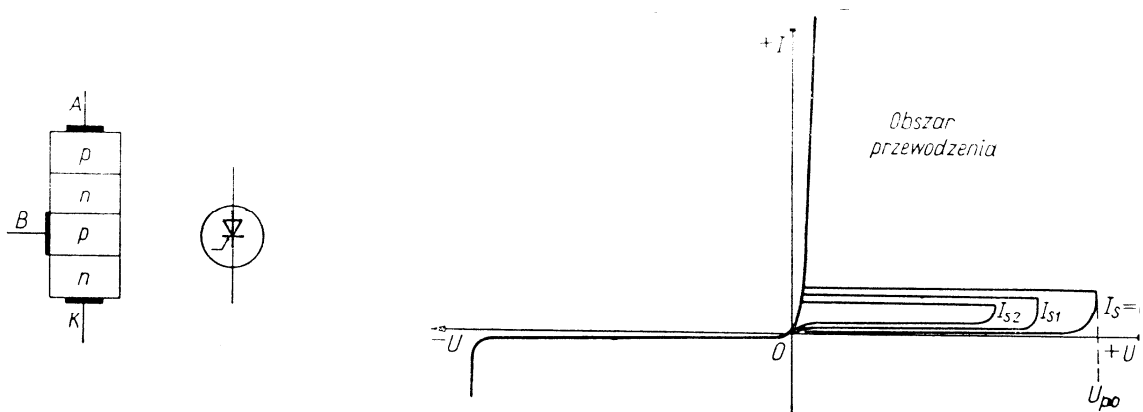
Sterowane elementy prostownikowe - głównie tyrystory - są podstawowymi elementami układów regulacyjnych. Różnica w stosunku do prostowników niesterowanych polega na możliwości regulacji prądu i napięcia wyprostowanego, przez zmianę kąta otwarcia (przewodzenia) prostownika. Otwieranie prostowników w zakresie napięć dodatnich odbywa się przez wprowadzenie do obwodu sterującego sygnału napięciowego lub prądowego o wartości określonej charakterystyką danego prostownika. Rodzaj i kształt sygnałów sterujących zależy od prostownika i charakteru obciążenia.

Prostowniki sterowane są zasilane napięciem przemiennym. Wyłączenie prostownika następuje w chwili, gdy napięcie na nim uzyskuje wartość równą zero, lub gdy prąd prostownika uzyska wartość mniejszą od niezbędnej do podtrzymania jego przewodzenia.

Tyrystor - sterowana dioda krzemowa jest przyrządem półprzewodnikowym o strukturze p-n-p-n. Dopóki do elektrody sterującej (bramki) nie zostanie doprowadzony impuls prądu, tyrystor



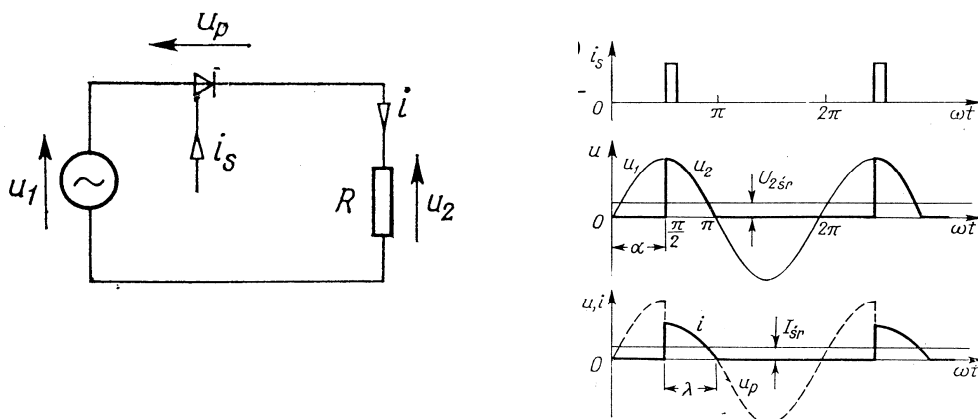
pozostaje w stanie zaporowym, niezależnie od znaku napięcia anoda - katoda. Przy dodatnich napięciach anoda - katoda tyrystor wprowadza się w stan przewodzenia przez doprowadzenie do bramki napięcia dodatniego względem katody. W stanie przewodzenia obwód traci własności sterownicze, a charakterystyka prądowo-napięciowa obwodu jest prawie identyczna z charakterystyką diody krzemowej, spolaryzowanej w kierunku przewodzenia. Strukturę oraz charakterystykę prądowo-napięciową tyrystora przedstawia rysunek 14.



Rys.14. Struktura i charakterystyka tyrystora

### 2.2.1. Prostownik sterowany z obciążeniem rezystancyjnym

Układ jednofazowego prostownika sterowanego o obciążeniu rezystancyjnym oraz przebiegi prądów i napięć przedstawiono na rysunku 15



Rys.15. Prostownik sterowany: schemat ideowy i przebiegi napięć

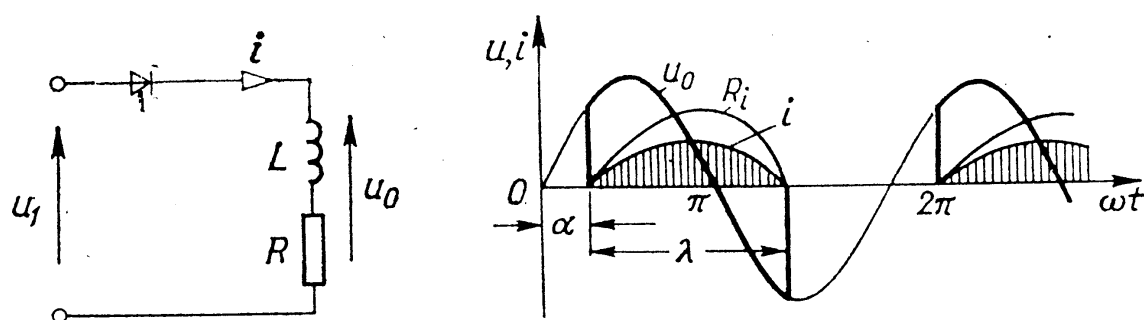
Przy braku impulsów sterujących w obwodzie bramki tyrystor nie przewodzi prądu. Wyzwolenie tyrystora impulsem prądowym może nastąpić tylko w czasie dodatniej półsinusoidy napięcia. Z rysunku 15 wynika, że im wcześniej nastąpi wyzwolenie tyrystora, tym większe są średnie wartości prądu i napięcia wyprostowanego. Tyrystor może być wysterowany najwcześniej w chwili odpowiadającej początkowi dodatniej półfali napięcia zasilającego. Kąt liczony od tej chwili do chwili wyzwolenia tyrystora nazywa się kątem opóźnienia włączenia. Dla czasu

przechodzenia sinusoidy napięcia przez zero, tyrystor przechodzi w stan zaporowy i może być włączony ponownie impulsem sterującym przy dodatniej półfali napięcia następnego cyklu. Zmieniając kąt opóźnienia można regulować napięcie wyprostowane od zera do pełnej wartości średniej, jak w przypadku prostownika niesterowanego. Średnią wartość napięcia dla danego kąta oblicza się z zależności:

$$U_{2sr} = \frac{1}{2\pi} \int_{\alpha}^{\pi} U_m \sin \omega t d(\omega t) = \frac{1}{2\pi} U_m (1 + \cos \alpha).$$

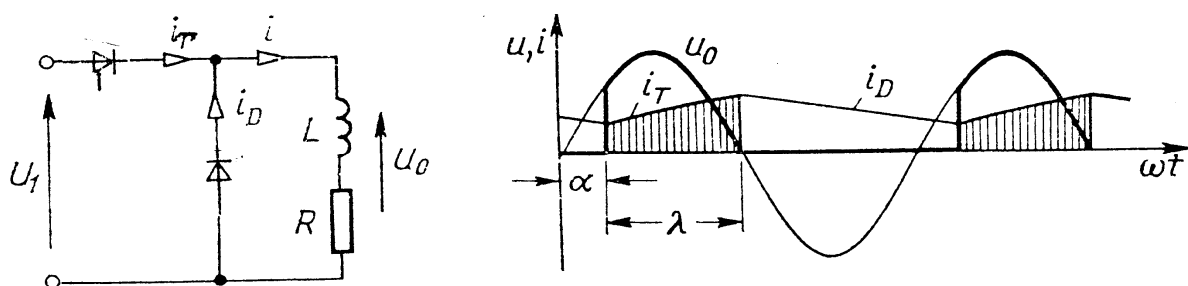
### 2.2.2. Prostownik sterowany z obciążeniem rezystancyjno – indukcyjnym

Układ jednofazowego prostownika sterowanego o obciążeniu rezystancyjno – indukcyjnym oraz przebiegi napięć i prądu przedstawia rysunek 16



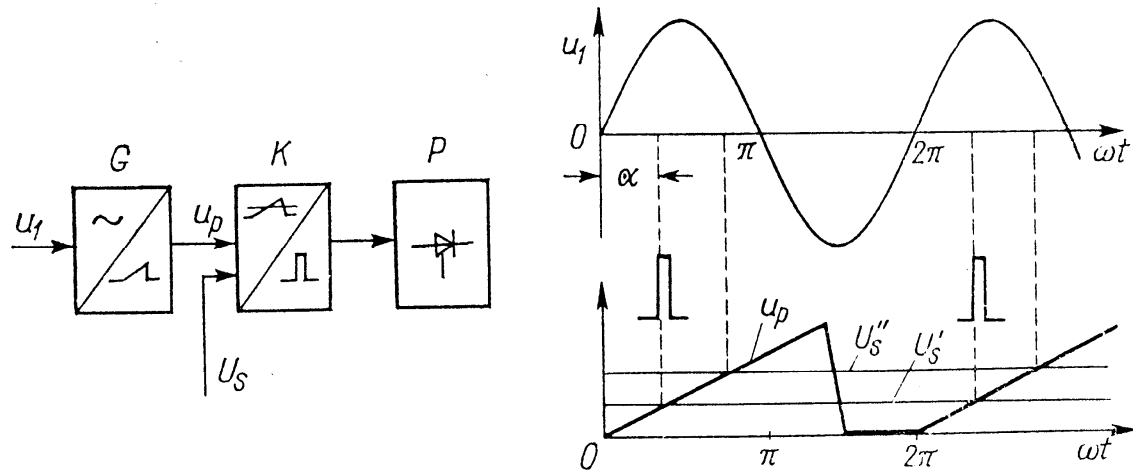
Rys.16. Jednofazowy prostownik sterowany, schemat ideowy i przebiegi napięć przy obciążeniu rezystancyjno – indukcyjnym

W prostowniku sterowanym z indukcyjnością w obwodzie przebiegi prądu i proporcjonalnego do niego napięcia na odbiorniku rezystancyjnym są zniekształconą sinusoidą. Indukcyjność obwodu, podobnie jak w prostownikach niesterowanych łagodzi przebieg narastania prądu oraz powoduje wzrost czasu jego przepływu przez tyrystor. Przewodzenie prądu odbywa się częściowo przy ujemnej półfali napięcia zasilającego. W celu zachowania ciągłości przepływu prądu w obwodzie obciążenia włącza się „diodę gaszącą” w sposób podany przykładowo na rysunku 17



Rys.17. Prostownik sterowany z indukcyjnością i diodą gaszącą oraz przebiegi napięć

Schemat blokowy przykładowego układu sterowania prostowników sterowanych oraz przebiegi wyjaśniające zasadę jego działania przedstawia rysunek 18



Rys.18. Schemat blokowy przykładowego układu sterowania tyrystorów.

G – generator napięcia piłokształtnego, K – generator impulsów sterujących,  
P – prostownik sterowany

### 3. Zagadnienia do opracowania

1. Właściwości elementów prostownikowych oraz ich charakterystyki prądowo-napięciowe
2. Prostownik jednopółkowy, schemat i przebiegi czasowe napięć i prądu
3. Prostownik dwupółkowy, schemat i przebiegi czasowe napięć i prądu
4. Prostownik mostkowy, schemat i przebiegi czasowe napięć i prądu
5. Prostownik z filtrem pojemnościowym, schemat i przebiegi czasowe napięć i prądów
6. Wpływ pojemności na kształt napięcia wyjściowego w prostowniku z filtrem pojemnościowym
7. Wpływ obciążenia na kształt napięcia wyjściowego w prostowniku z filtrem pojemnościowym
8. Prostownik z obciążeniem rezystancyjno-indukcyjnym, schemat i przebiegi czasowe napięć
9. Zasady regulacji wartości średnich prądu i napięcia w obwodach z prostownikami sterowanymi
10. Możliwości zastosowania prostowników sterowanych do zasilania silników prądu stałego

### 4. Literatura pomocnicza

1. Notatki z wykładu Elektrotechnika i Elektronika
2. Elektrotechnika i elektronika dla nieelektryków – praca zbiorowa WNT
3. Układy elektroniczne w automatyce napędowej; H. Tunia, B. Winiarski, WNT
4. Układy tyrystorowe; J. Luciński, WNT
5. Elektronika; A. Chwaleba, WSiP

Opracował: dr inż. P. Majewski