

# Zespół Szkół Technicznych im. J. i J. niadeckich w Grudzi dzu



Laboratorium Elektryczne . Pracownia Automatyki i  
Robotyki (s.48)

## Instrukcja Laboratoryjna: **10. Diody i układy diodowe**

Opracował mgr inż. Marcin Jabłoński

Celem wiczenia jest poznanie budowy, zasady działania i właściwości podstawowych układów elektronicznych, w których zastosowano diody prostownicze i diody Zenera.

## **21.1. Diody półprzewodnikowe**

### **21.1.1. Właściwości półprzewodników**

### **21.1.2. Złącze p-n**

### **21.1.3. Rodzaje diod półprzewodnikowych**

#### 21.1.3.1. Diody prostownicze

#### 21.1.3.2. Diody Zenera

## **21.2. Układy elektroniczne z wykorzystaniem diod półprzewodnikowych**

### **21.2.1. Układy prostownicze**

#### 21.2.1.1. Prostownik jednofazowy

#### 21.2.1.2. Prostowniki dwufazowe

#### 21.2.1.3. Podwajacz napięcia

#### 21.2.1.4. Powielacz napięcia

### **21.2.2. Filtry w układach prostowniczych**

### **21.2.3. Stabilizator napięcia stałego**

## **21.3. Badania laboratoryjne**

### **21.3.1. Pomiar charakterystyki prądowo-napięciowej diody prostowniczej**

### **21.3.2. Pomiar charakterystyki prądowo-napięciowej diody Zenera**

### **21.3.3. Badanie prostownika jednofazowego**

### **21.3.4. Badanie prostownika dwufazowego (mostek Graetz)**

### **21.3.5. Badanie podwajacza napięcia**

### **21.3.6. Badanie stabilizatora napięcia stałego**

### **21.3.7. Badanie powielacza napięcia**

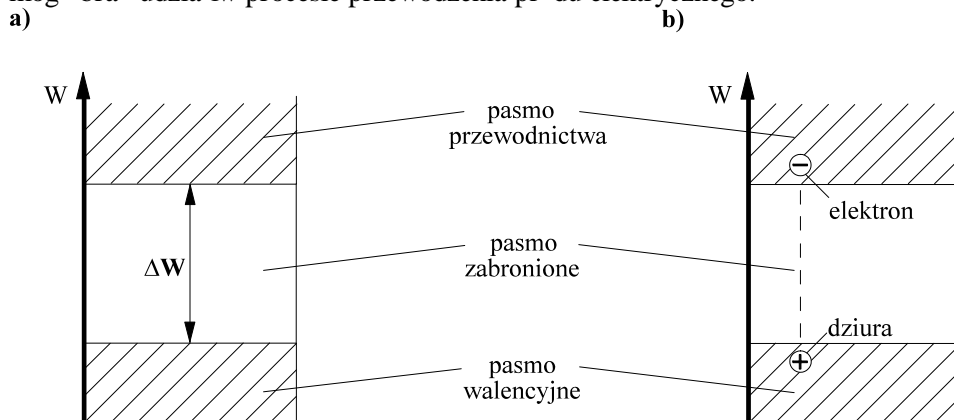
## 21.1. Diody półprzewodnikowe

### 21.1.1. Właściwości półprzewodników

Szerokie zastosowanie we współczesnej elektronice mają półprzewodniki (materiały półprzewodnikowe), a przede wszystkim krzem (Si) i german (Ge). W strukturze krystalicznej tych pierwiastków występują wiązania kowalencyjne. Każdy atom związany jest z czterema sąsiednimi atomami, tworząc sieć przestrzenną typu czworościan foremny.

Mechanizm przewodnictwa elektrycznego w ciałach krystalicznych w tym również w krzemie i germanie wyjaśnia **model pasmowy**.

Jak wiadomo, elektrony atomu odosobnionego mogą znajdować się tylko w określonych stanach energetycznych, czyli zajmują określone poziomy energetyczne. W kryształach, wskutek wzajemnego oddziaływania wielu jednakowych atomów, poziomy energetyczne ulegają rozszczepieniu, tworzą się strefy możliwych stanów energetycznych o prawie ciągłym widmie zwane pasmami energetycznymi. Dla procesu przewodnictwa elektrycznego istotne znaczenie mają dwa pasma energetyczne: **pasmo walencyjne** (podstawowe) i **pasmo przewodnictwa**. Pasmo walencyjne odpowiada wartościom energii elektronów walencyjnych, a pasmo przewodnictwa - wartościom energii, przy których elektrony stają się swobodnymi i mogą brać udział w procesie przewodzenia prądu elektrycznego.



**Rys. 21.1.** Model pasmowy półprzewodnika: a) w stanie niewzbudzonym, b) z nonikami swobodnymi

W strukturze pasmowej półprzewodników, między pasmem walencyjnym a pasmem przewodnictwa znajduje się w skrajnie wąskim **pasmo zabronione** o odstępie  $\Delta W$  ( $\Delta W_{Si}=1,08\text{eV}$ ,  $\Delta W_{Ge}=0,68\text{eV}$ ), którego elektrony nie mogą obsadzać.

W metalach pasma przewodnictwa i walencyjne zachodzą na siebie, a w izolatorach przedzielone są bardzo szerokim pasmem zabronionym ( $\Delta W > 2\text{eV}$ ).

Idealny kryształ krzemu lub germanu w stanie niewzbudzonym jest izolatorem. W tym stanie pasmo walencyjne jest całkowicie wypełnione, a pasmo przewodnictwa jest całkowicie wolne - rys.21.1a. Jeżeli taki kryształ otrzyma z zewnątrz pewną ilość energii - np. ciepłej, to może nastąpić lokalne zerwanie wiązania kowalencyjnego i przejście elektronu z pasma walencyjnego do pasma przewodnictwa - rys.21.1b.

Elektron staje się wówczas swobodnym nośnikiem ładunku ujemnego. Pozostaje po elektronie wolne miejsce w wiązaniu - równoważne elementarnemu ładunkowi dodatniemu - nazywa się dziurą, a opisane zjawisko - *generacja pary elektron-dziura*. Obok zjawiska generacji może zachodzić proces odwrotny - *rekombinacja*. Polega on na wzajemnej neutralizacji ładunków dziury i elektronu powracającego do pasma walencyjnego. W warunkach równowagi termicznej liczba generowanych par elektron-dziura jest równa liczbie par podlegających rekombinacji. Przewodnictwo elektryczne półprzewodników oparte na zjawisku generacji par

elektron-dziura nazywa się **przewodnictwem samoistnym**, a półprzewodnik, w którym występuje ten rodzaj przewodnictwa - **półprzewodnikiem samoistnym**. Wprowadzając do czystego germanu lub krzemu pewne określone porcje domieszek pierwiastków trój- lub pięciowartościowych (1 atom domieszki na  $10^8$  atomów pierwiastka podstawowego) otrzymuje się tzw. **półprzewodniki domieszkowe**, które w technice półprzewodnikowej mają największe znaczenie.

Atomy pierwiastków pięciowartościowych (antymon, arsen, fosfor) wprowadzone jako domieszki, tworzą swymi czterema elektronami walencyjnymi wiązanie kowalentne z atomami pierwiastka podstawowego, a pozostały w nadmiarze jeden elektron nie wchodzi do wiązania i staje się elektronem swobodnym. Domieszki dostarczające elektrony nadmiarowe nazywają się **donorami**, a półprzewodnik, którego cech charakterystyczny jest przewodnictwo elektronowe, nosi nazwę **półprzewodnika typu n**.

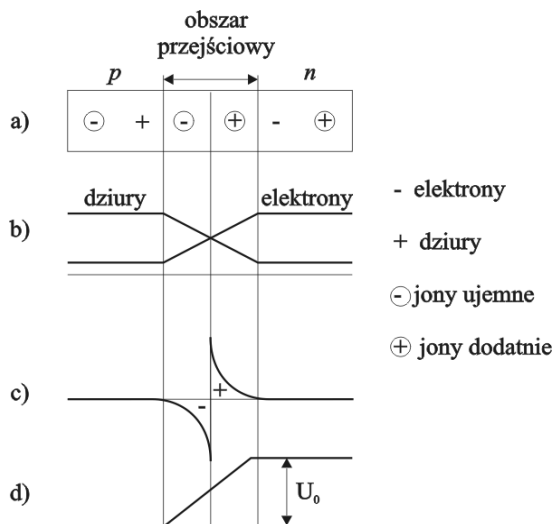
Domieszki z pierwiastków trójwartościowych (bor, gal, ind) również tworzą wiązanie kowalentne z atomami pierwiastka podstawowego. Wskutek braku jednego elektronu walencyjnego w jednym z wiązań powstaje dziura.

Domieszki powodujące niedomiar elektronów w wiąźniach sieci krystalicznej półprzewodnika nazywają się **akceptorami**, a półprzewodniki, których cech charakterystyczny jest przewodnictwo dziurowe, noszą nazwę **półprzewodników typu p**.

O charakterze przewodnictwa danego półprzewodnika decydują więc przeważające nośniki ładunków zwane wiązkościowymi. Na przykład w półprzewodniku typu n nośnikami wiązkościowymi są elektrony a mniejszościowymi - dziury. W półprzewodniku domieszkowym oprócz nośników wiązkościowych zawsze występują nośniki mniejszościowe - jako rezultat generacji termicznej par: elektron-dziura.

### 21.1.2. Złącze p-n

Złącze p-n powstaje wtedy, gdy w kryształach półprzewodnika wytworzone zostaną dwa obszary o odmiennym typie przewodnictwa p i n. Schemat złącza p-n i jego niektóre właściwości przedstawiono na rys. 21.2.

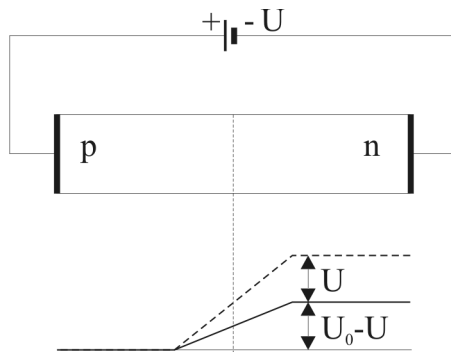


**Rys. 21.2.** Złącze p-n niespolaryzowane: a) schemat złącza, b) rozkład koncentracji dziur i elektronów swobodnych, c) rozkład natężenia pola elektrycznego, d) rozkład potencjału

Koncentracja elektronów swobodnych w obszarze n jest znacznie większa niż w obszarze p, w którym stanowi one nośnik mniejszościowy. Podobnie koncentracja dziur w obszarze p jest znacznie większa niż w obszarze n. Wskutek różnic koncentracji następuje dyfuzja nośników wiązkościowych: elektronów z obszaru n do p i dziur z obszaru p do n. Nośniki te po przejściu warstwy granicznej ulegają rekombinacji. W wyniku procesu dyfuzji w warstwie granicznej (obszarze przejściowym) po stronie obszaru n znikają elektrony swobodne, a pozostają niezrównoważone elektrycznie dodatnie jony donorów, tworząc dodatni ładunek przestrzenny. W analogiczny sposób powstaje ujemny ładunek przestrzenny w granicznej warstwie przejściowej po stronie obszaru p (rys. 21.2c). Na złączu powstaje pole elektryczne i bariera potencjału  $U_0$  (rys. 21.2d). Pole elektryczne przeciwdziała dyfuzji nośników wiązkościowych, natomiast sprzyja

przepływowi generowanych termicznie nośników mniejszościowych: elektronów swobodnych z obszaru  $p$  do  $n$  i dziur w kierunku przeciwnym. Opisany wyżej przepływ nośników większościowych nazywa się **pradem dyfuzyjnym**, a przepływ nośników mniejszościowych - **pradem termicznym**.

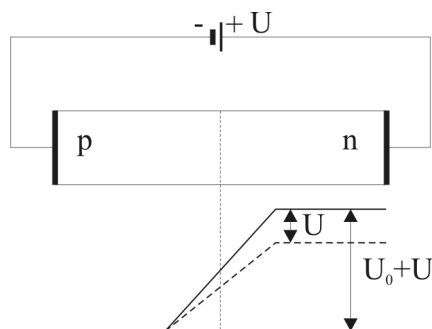
W warunkach równowagi dynamicznej złącza, prądy te wzajemnie się kompensują. Jeżeli do złącza  $p-n$  doprowadzone zostanie z zewnątrz napięcie  $U$  w ten sposób, aby dodatni biegun źródła był połączony z obszarem  $p$ , a ujemny - z obszarem  $n$ , to bariera potencjału złącza niespolaryzowanego  $U_0$  obniży się o wartość  $U$  (rys. 21.3).



Rys. 21.3. Złącze  $p-n$  spolaryzowane w kierunku przewodzenia

Przez obszar przejściowy może teraz przepływać prąd dziurowy z obszaru  $p$  do obszaru  $n$  i prąd elektronowy w kierunku przeciwnym. Ten sposób polaryzacji złącza  $p-n$  nazywa się polaryzacją **w kierunku przewodzenia**. Złącze spolaryzowane w kierunku przewodzenia odznacza się małą rezystancją wewnętrzną, a zatem dobrym przewodnictwem prądu. W przypadku polaryzacji odwrotnej przedstawionej na rys. 21.4 bariera potencjału  $U_0$  podwyższa się o wartość napięcia  $U$  hamując przepływ nośników większościowych.

Obszar wzdłuż przestrzennego pozbawiony nośników prądu zwany **warstwą zaporową** rozszerza się, co powoduje wzrost rezystancji wewnętrznej złącza. Ten rodzaj polaryzacji złącza  $p-n$  nazywa się **polaryzacją w kierunku zaporowym**. Przez złącze spolaryzowane zaporowo przepływa tylko nieznaczny prąd wsteczny wywołany ruchem nośników mniejszościowych, tj. dziur z obszaru  $n$  do obszaru  $p$ , a elektronów w kierunku przeciwnym. Prąd wsteczny zależy tylko od temperatury złącza, gdy jego głównym składnikiem jest prąd termiczny.



Rys. 21.4. Złącze  $p-n$  spolaryzowane w kierunku zaporowym

Z powyższych rozważań wynika, że charakterystyka napięciowo-prądowa złącza  $p-n$  jest asymetryczna - rys. 21.6.

Właściwość dobrego przewodnictwa prądu tylko w jednym kierunku jest podstawą wykorzystania złącza  $p-n$  w wielu elementach półprzewodnikowych (diody, tranzystory, tyrystory).

### 21.1.3. Rodzaje diod półprzewodnikowych

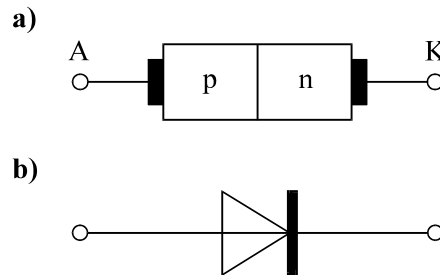
Diody półprzewodnikowe są to elementy dwukontaktowe, w których wykorzystuje się właściwości złącza p-n. Ze względu na cechy funkcjonalne związane z określonymi zastosowaniami wyróżnia się diody:

- prostownicze,
- uniwersalne,
- stabilizacyjne (Zenera),
- impulsowe,
- pojemnościowe (warikapki, waraktory),
- tunelowe,
- fotodiody,
- elektroluminescencyjne,
- mikrofalowe.

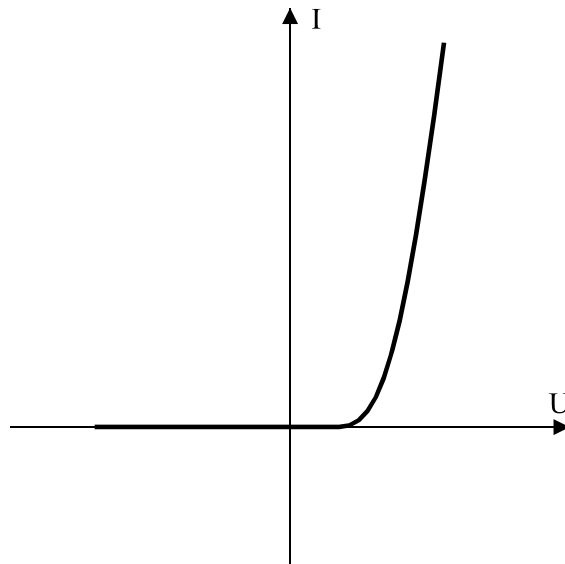
Spśród różnych typów diod półprzewodnikowych omówione zostaną tylko diody prostownicze i Zenera.

### 21.1.3.1. Diody prostownicze

Diod prostownicza stanowi złącze  $p-n$  (rys. 21.5), utworzone w płycie monokryształu krzemu lub germanu. Doprowadzenia metalowe obszarów  $p$  i  $n$  stanowią odpowiednio anod i katod diody. Właściwości prostownicze diody wynikają bezpośrednio z **asymetrii** charakterystyki napięciowo-prądowej złącza  $p-n$  (rys. 21.6).



**Rys. 21.5.** Dioda prostownicza: a) schemat budowy, b) symbol graficzny



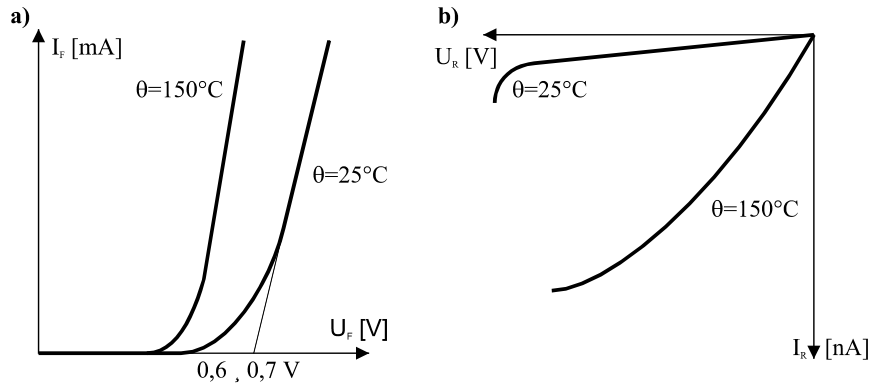
**Rys. 21.6.** Charakterystyka napięciowo-prądowa złącza  $p-n$

Właściwości diod prostowniczych charakteryzuje się za pomocą parametrów granicznych i parametrów charakterystycznych określanych zarówno dla kierunku przewodzenia, jak i dla kierunku wstecznego (zaporowego)

Podstawowymi parametrami diody są :

- maksymalny średni prąd przewodzenia, uznawany za prąd znamionowy  $I_{FN}$  diody spolaryzowanej w kierunku przewodzenia,
- szczytowe wsteczne napięcie pracy  $U_R$ .

Na rys.21.7 przedstawione są charakterystyki prostowniczej diody krzemowej przy różnych temperaturach zęcza odpowiednio dla stanu przewodzenia (a) i stanu zaporowego (b).



**Rys. 21.7.** Charakterystyki napięciowo-prądowe diody prostowniczej:  
a) w stanie przewodzenia, b) w stanie zaporowym

W stanie przewodzenia na diodzie występuje nieznaczny spadek napięcia rzędu (0,6 - 0,7)V. W stanie zaporowym przez diodę przepływa nieznaczny prąd wsteczny (nA!), silnie zależny od temperatury zęcza. Napięcie występujące na diodzie w stanie zaporowym nazywa się **napięciem wstecznym  $U_R$** . Po przekroczeniu pewnej wartości maksymalnej napięcia wstecznego  $U_{RM}$  prąd wsteczny szybko wzrasta, co może spowodować termiczne uszkodzenie diody. Dopuszczalna temperatura zęcza p-n diod krzemowych - ok.  $150^\circ\text{C}$ , a zęcz germanowych jest rzędu  $90^\circ\text{C}$ . Diody prostownicze większych mocy są zwykle zaopatrzone w radiatory, chłodzone wymuszonym obiegiem powietrza. Diody przewidziane do prostowania dużych prądów mają dużą powierzchnię zęcza, a w związku z tym - dużą pojemność warstwy zaporowej. Ogranicza to ich zakres pracy w zakresie tylko do niskich częstotliwości. W układach wysokiej częstotliwości (np. detekcyjnych) stosowane są diody o małej pojemności zęcza (diody ostrzowe). Obecnie diody krzemowe prostownicze wypierają prawie całkowicie diody germanowe z układów elektronicznych. Dzieje się to ze względu na zalety jakie posiada krzem jako materiał półprzewodnikowy, a mianowicie:



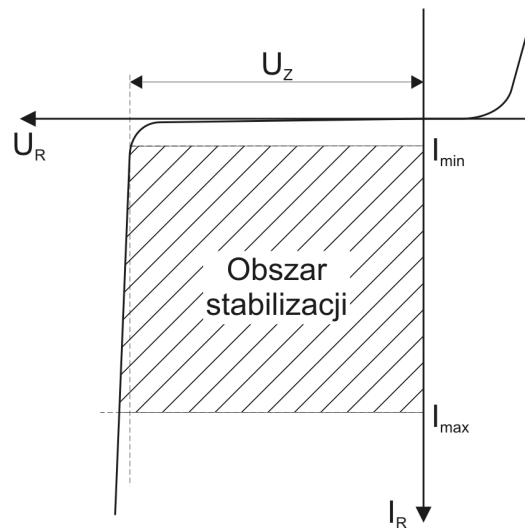
- emisja cieplna w krysztale krzemu jest bardzo mała, co umożliwia pracę złącz krzemowych w temperaturze nawet do 200°C, przy czym wartości prądu wstecznego są nieznaczne,
- możliwość osiągnięcia wysokiego dopuszczalnego napięcia wstecznego, do maksymalnej wartości 2000 V, a nawet więcej,
- możliwość osiągnięcia dużego prądu do 200 A/cm<sup>2</sup>.

### 21.1.3.2. Diody Zenera

Diody Zenera to specjalne diody krzemowe, w których wykorzystuje się zakrzywienie charakterystyki prądowo-napięciowej w obszarze przebicia Zenera (przebiega nieniszcząco struktury krystalicznej półprzewodnika).

Podczas normalnej pracy dioda Zenera jest zatem spolaryzowana w kierunku zaporowym.

Charakterystyka prądowo-napięciowa diody przedstawiona jest na rys.21.8. Napięcie wsteczne  $U_Z$ , przy którym następuje gwałtowne zakrzywienie charakterystyki nazywa się **napięciem Zenera**. Wartość napięcia  $U_Z$  zależy od rezystywności tego krzemu i dla najczęściej spotykanych typów diod Zenera wynosi od kilku do kilkudziesięciu woltów.



**Rys. 21.8.** Charakterystyka napięciowo-prądowa diody Zenera

Spadek napięcia na diodzie w obszarze przebicia, zwany **napięciem stabilizacji**, prawie nie zależy od prądu przepływającego przez diodę. Parametrem, który charakteryzuje zależność napięcia stabilizacji od prądu jest **rezystancja**

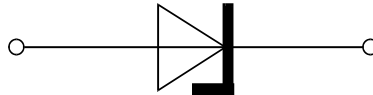
**dynamiczna  $r_z$** , wyrażająca stosunek przyrostu napięcia stabilizacji  $\Delta U_z$  do przyrostu prądu  $\Delta I_z$ :

$$r_z = \frac{\Delta U_z}{\Delta I_z} \quad (21.1)$$

Rezystancja dynamiczna diody Zenera w zakresie stabilizacji jest bardzo mała. W rozważaniach przybliżonych przyjmuje się, że napięcie stabilizacji jest stałe (niezależne od prądu) równe wartości napięcia Zenera  $U_z$ . Maksymalna wartość prądu  $I_{zmax}$ , przy której dioda Zenera może pracować, jest ograniczona jej mocą dopuszczalną  $P_{tot}$  zgodnie z zależnością:

$$I_{zmax} = \frac{P_{tot}}{U_z} \quad (21.2)$$

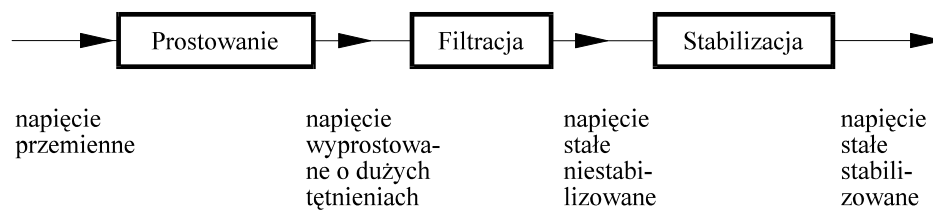
Po przekroczeniu mocy  $P_{tot}$  może nastąpić uszkodzenie diody na skutek termicznego przebicia złącza  $p-n$ . Diody Zenera znajdują szerokie zastosowanie w układach stabilizacyjnych, ograniczających napięcie itp. Symbol graficzny diody Zenera przedstawiony jest na rys. 21.9.



**Rys. 21.9.** Symbol graficzny diody Zenera

## 2. Układy elektroniczne z wykorzystaniem diod półprzewodnikowych

Większość układów elektronicznych zasilana jest napięciem stałym. Realizowane to jest z wykorzystaniem układów zwanych zasilaczami. Są to układy, których zadaniem polega na wyprostowaniu napięcia przemiennego, odfiltrowaniu składowych zmiennych i ewentualnej stabilizacji uzyskanego napięcia stałego. Napięcie to doprowadzone jest następnie do układu obciążenia. Blokowy schemat funkcyjny zasilacza przedstawiony jest na rys. 21.10.

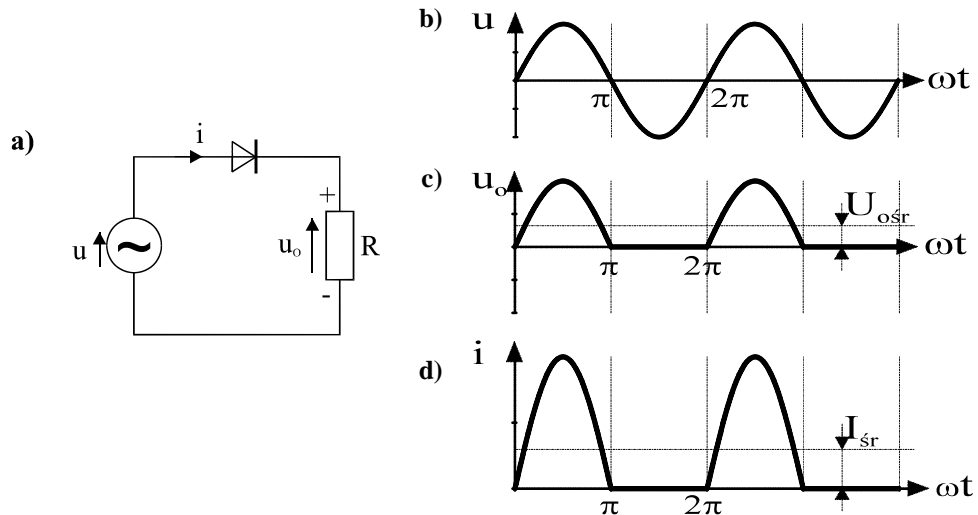


**Rys. 21.10.** Blokowy schemat funkcyjny zasilacza

## 21.2.1 Układy prostownicze

### 21.2.1.1. Prostownik jednofazowy

Najprostszy układ prostownika, zwany jednofazowym układem jednofazowym przedstawiony jest na rys. 21.11a.



**Rys. 21.11.** Prostownik jednofazowy: a) schemat, b) przebieg czasowy napięcia zasilającego, c) przebieg czasowy napięcia na rezystancji obciążenia, d) przebieg czasowy prądu.

Układ zawiera źródło napięcia sinusoidalnego  $u=U_m \sin \omega t$ , zawór elektryczny w postaci diody prostowniczej i rezystancję obciążenia  $R$ . Dzięki zaworowemu działaniu diody, prąd w obwodzie może płynąć tylko w jednym kierunku (jest to słuszne dla idealnego prostownika, gdy w układzie rzeczywistym przy polaryzacji diody w kierunku zaporowym płynie niewielki prąd wsteczny). Wartość chwilowa prądu jest określona zależnościami:

$$i = \frac{u}{R} = \frac{U_m}{R} \sin \omega t \quad \text{dla} \quad 0 < \omega t < \pi$$

$$i = 0 \quad \text{dla} \quad \pi \leq \omega t \leq 2\pi$$
(21.3)

Jest to przykład przebiegu przedstawionym na rys.21.11d. Przebieg napięcia  $u_o$  na odbiorniku pokazany jest na rys.21.11c. Napięcie wyjściowe  $u_o$  jest napięciem jednokierunkowym. Wartość średnia, czyli skuteczna stała tego napięcia wynosi:

$$U_{0sr} = \frac{1}{2\pi} \int_0^{\pi} u d(\omega t) = \frac{U_m}{2\pi} \int_0^{\pi} \sin \omega t d(\omega t) = \frac{U_m}{\pi}. \quad (21.4)$$

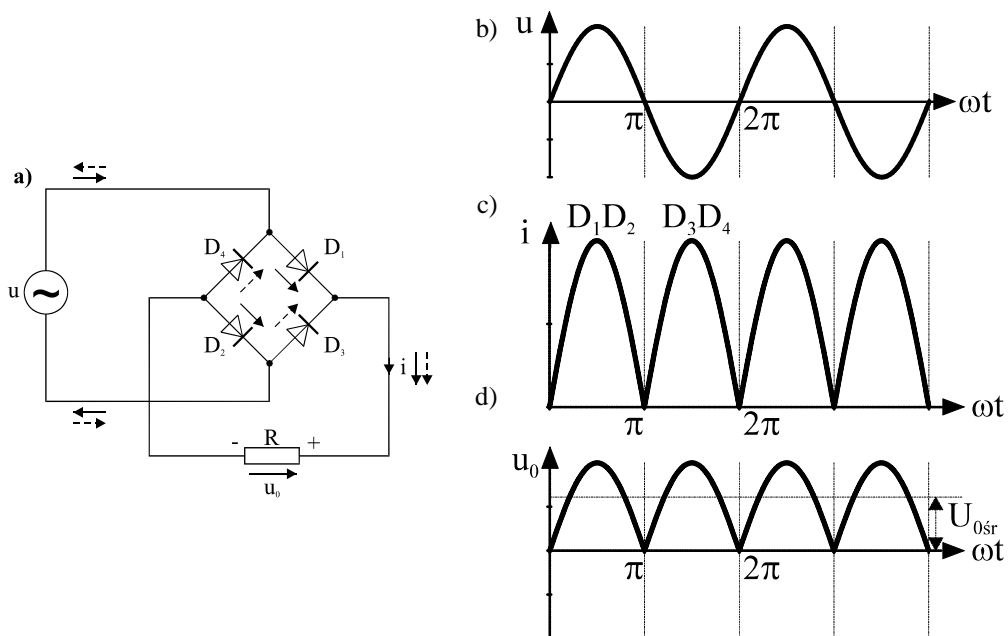
### 21.2.1.2. Pr prostowniki dwupokwowe

Na rys.21.12a przedstawiony jest uk ad prostownika dwupokowego, zwanego uk adem mostkowym (**mostek Graetza**).

Przy dodatniej p ocali napi cia u przewodz diody  $D_1$  i  $D_2$ , a przy ujemnej - diody  $D_3$  i  $D_4$ . Pr d p en cy przez odbiornik ma ten sam kierunek w obu p okresach. Przebiegi napi i pr d w uk adzie mostkowym przedstawiono na rys. 21.12c i 21.12d. rednia warto wyprostowanego napi cia, która w danym przypadku wynosi:

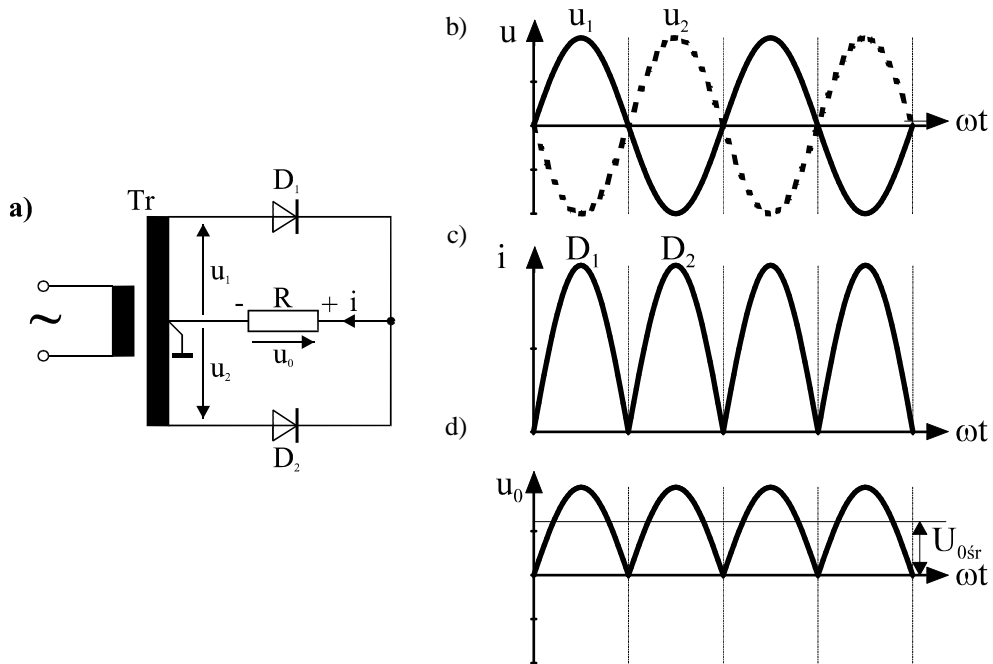
$$U_{0sr} = \frac{1}{\pi} \int_0^{\pi} U_m \sin \omega t d(\omega t) = \frac{2}{\pi} U_m \quad (21.4)$$

jest dwa razy wi ksza ni w uk adzie prostownika jednopokowego.



**Rys. 21.12.** Prostownik jednofazowy dwupokowy: a) schemat, b) przebieg czasowy napi cia zasilaj cego, c) przebieg czasowy pr du obci enia, d) przebieg czasowy napi cia na rezystancji obci enia

Inny układ jednofazowego prostownika dwupołówkowego przedstawiony jest na rys.21.13a.



**Rys. 21.13.** Prostownik jednofazowy dwupołówkowy w układzie transformatorowym:

- a) schemat, b) przebieg czasowy napięcia zasilającego, c) przebieg czasowy prądu obciążenia, d) przebieg czasowy napięcia na rezystancji obciążenia

W układzie tym, w uzwojeniu wtórnym transformatora Tr, wykorzystywany jest środkowy odczep w celu uzyskania dwóch napięć sinusoidalnych o jednakowych amplitudach, lecz przesuniętych względem siebie w fazie o  $180^\circ$ , to znaczy:

$$u_2(t) = -u_1(t). \quad (21.5)$$

W ciągu połowy okresu, gdy  $u_1 > 0$  przewodzi dioda  $D_1$  i wówczas przy założeniu idealnej charakterystyki diody mamy  $u_0 = u_1$ . Gdy napięcie  $u_1$  przyjmuje ujemną wartość, wtedy napięcie  $u_2 > 0$  i przewodzi dioda  $D_2$ . Wtedy  $u_0 = u_2$ . W wyniku tego przez rezystancję obciążenia R płynie prąd  $i$  o przebiegu podanym na rys.21.13c.

Średnia wartość wyprostowanego napięcia, w tym przypadku wynosi:

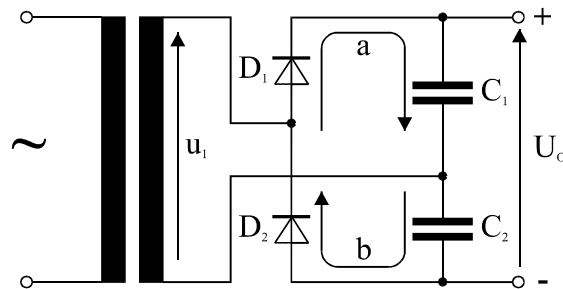
$$U_{0sr} = \frac{2}{\pi} U_m \quad (21.6)$$

jest dwa razy większa niż w układzie prostownika jednopołówkowego pracującego z tym samym prądowym napięciem wejściowym i z tym samym obciążeniem ( $U_{\text{trafo}}=1:1$ ).

Należy zwrócić uwagę, że maksymalna wartość napięcia wstępnego występującego na diodach w układzie transformatorowym jest dwukrotnie większa niż w układzie mostkowym, przy założeniu jednakowych napięć wyjściowych, co stanowi wadę tego układu.

### 21.2.1.3. Podwajacz napięcia

Na rys. 21.14 przedstawiony jest układ podwajacza napięcia.



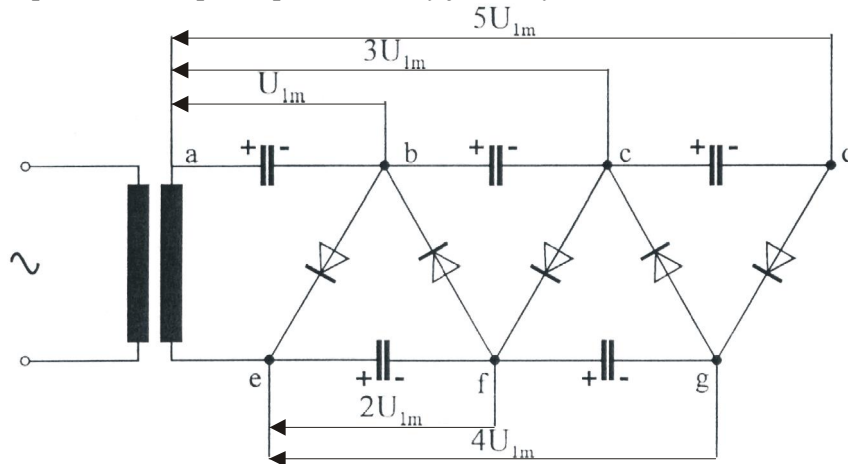
**Rys. 21.14.** Prostownik dwupołówkowy z podwajaczem napięcia

Przy dodatniej półokresie napięcia zasilającego u kondensator  $C_1$  ładuje się poprzez diodę  $D_1$  (linia a - rys. 21.14). Napięcie na kondensatorze narasta do wartości  $U_m$  równej amplitudzie napięcia źródła. Podobnie w następnym półokresie ładuje się kondensator  $C_2$  poprzez diodę  $D_2$  (linia b - rys. 21.14). Napięcie na wyjściu układu będzie sumą napięć na poszczególnych kondensatorach, jest równe w przybliżeniu podwojonej amplitudzie napięcia zasilającego  $U_o \cong 2U_m$ .

Istotną wadą tego układu jest mała wartość napięcia  $U_o$  przy zmianie obciążenia. Zwiększenie stabilności napięcia wyjściowego  $U_o$  uzyskuje się po zastosowaniu kondensatorów o dużej pojemności.

#### 21.2.1.4. Powielacz napięcia

Układ powielacza napięcia przedstawiony jest na rysunku 21.15.



**Rys. 21.15.** Powielacz napięcia,

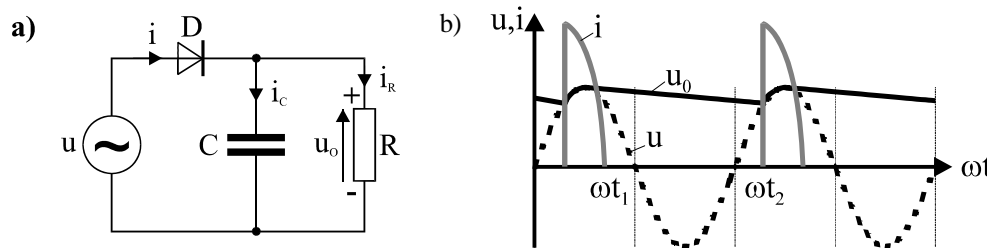
Przy dodatniej półokresie napięcia zasilającego ładuje się kondensator między punktami  $a$  i  $b$  do wartości maksymalnej  $U_m$  napięcia zasilającego. Podczas ujemnej półokresie napięcia to b dzie się dodawa do napięcia zasilającego, aby naładować kondensator między punktami  $e$  i  $f$  do wartości  $2U_m$ . / cz c kaskadowo diody i kondensatory w sposób pokazany na rysunku, mo na osiągnąć wielokrotne powielenie napięcia. Wyjciowe napięcie wyprostowane powielacza mo e być zdejmowane z zacisków  $ab, ac, ad, \dots$  lub  $ef, eg, \dots$ . W zależności od tego, które z zacisków wyjściowych są wykorzystywane, uzyskuje się napięcie wyprostowane o wartości równej parzystej lub nieparzystej wielokrotności amplitudy napięcia prostowanego, przy tym krotność powielania jest równa liczbie diod znajdujących się pomiędzy zaciskami wyjściowymi. W praktyce krotność powielania jest zazwyczaj ograniczona do kilkunastu lub kilkudziesięciu - w zależności od prądu obciążenia.

Diody w powielaczu napięcia narażone są jedynie napięciowo, gdy w obwodach powielacza prąd niewielki. Narażenie napięciowe diod jest tu takie samo jak w prostowniku jednofazowym jednofazowym.

### 21.2.2. Filtry w układach prostowniczych

Tętnienia napięć otrzymywanych na wyjściach prostowników są w wielu przypadkach niepożądane. Jednym ze sposobów zmniejszenia tętnienia jest zastosowanie filtrów. Najczęściej stosuje się filtry indukcyjne, pojemnościowe, pojemnościowo-indukcyjne lub pojemnościowo-rezystancyjne.

Na rys. 21.16a przedstawiony jest układ prostownika jednopołówkowego z filtrem pojemnościowym.



**Rys. 21.16.** Prostownik jednopołówkowy z filtrem pojemnościowym: a) schemat, b) przebiegi czasowe napięcia i prądu

W czasie przewodzenia diody przez odbiornik R i przez kondensator C płyną odpowiednio prądy:

$$i_R = \frac{u}{R} = \frac{U_m}{R} \sin \omega t \quad (21.7)$$

$$i_C = C \frac{du}{dt} = \omega C U_m \cos \omega t$$

a przez diodę przepływa prąd sumaryczny  $i = i_R + i_C$ . Z chwili  $t_1$  (rys.21.16b), gdy prąd  $i$  zmniejsza się do zera ( $i=0$ ), dioda przestaje przewodzić odcinając obwód RC od źródła. Od chwili  $t_1$ , czyli od napięcia początkowego  $U_m$ , następuje rozładowanie kondensatora przez odbiornik R, przy czym prąd wyładowania maleje wykładniczo zgodnie z zależnością

$$i_R = \frac{U_m}{R} e^{-\frac{t-t_1}{RC}} \quad (21.8)$$

Prądowi rozładowania odpowiada napięcie na odbiorniku

$$u = R i_R = U_m e^{-\frac{t-t_1}{RC}} \quad (21.9)$$



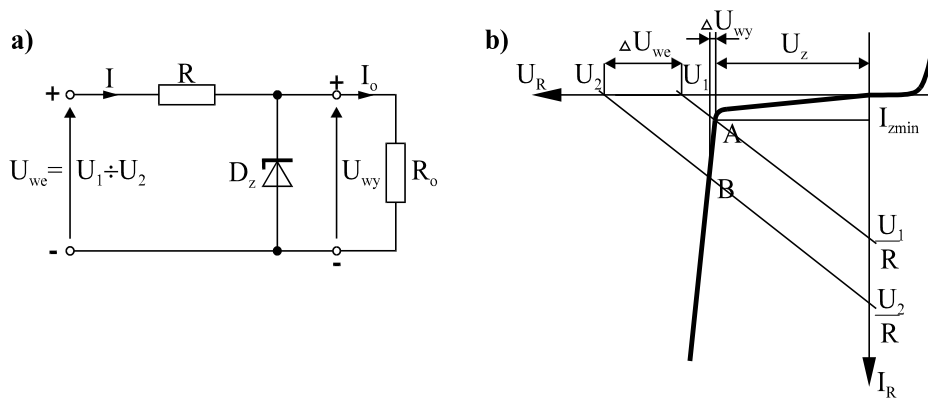
Proces rozładowania kondensatora trwa aż do chwili  $t_2$ , w której następuje zrównanie napięcia na kondensatorze z napięciem źródła.

Od tej chwili zawór ponownie zaczyna przewodzić i proces się powtarza. Skuteczność działania filtru pojemnościowego zależy od stałej czasowej  $\tau=RC$ . Przy małych wartościach  $R$  należy stosować kondensatory o dużej pojemności. Filtry stosowane w praktyce mają zwykle bardziej złożone układy.

### 21.2.3. Stabilizator napięcia stałego

Zadaniem stabilizatora jest utrzymanie stałej wartości napięcia na wyjściu  $U_{wy}$  niezależnie od wahań napięcia wejściowego i prądu obciążenia  $I_0$ .

Przykładowy układ stabilizatora napięcia stałego wykonanego z wykorzystaniem diody Zenera przedstawiony jest na rys. 21.17a.

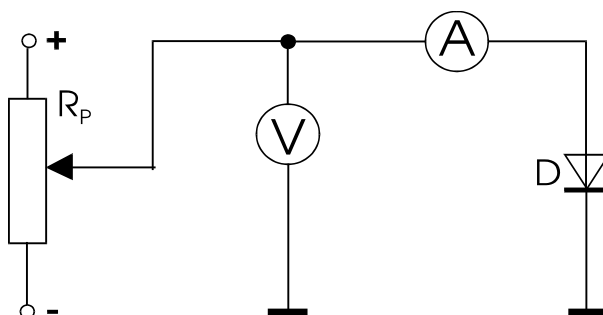


**Rys. 21.17.** Stabilizator napięcia stałego z diodą Zenera: a) schemat, b) charakterystyka prądowo-napięciowa diody Zenera

Układ składa się z rezystora  $R$ , elementu regulacyjnego niesterowanego w postaci diody Zenera oraz rezystora  $R_0$ , stanowicego obciążenie. Na rys. 21.17b widać, że przy wzroście napięcia wejściowego od  $U_1$  do  $U_2$ , czyli o wartość  $\Delta U_{we}$ , punkt pracy diody Zenera przesuwa się z punktu A do punktu B. Zmiana napięcia wyjściowego  $\Delta U_{wy}$  jest nieproporcjonalnie mała. Tak więc dioda Zenera dzięki odpowiedniej charakterystyce napięciowo-prądowej jest elementem, który przy zmianach napięcia wejściowego tak zmienia swoją rezystancję dla prądu stałego, że w konsekwencji napięcie na wyjściu układu ulega bardzo niewielkim zmianom. Napięcie wejściowe musi spełniać warunek  $U_{we} > U_z$ .

## 21.3. Badania laboratoryjne

### 21.3.1. Pomiar charakterystyki prądowo-napięciowej diody prostowniczej



Rys. 21.18. Schemat połączeń

W układzie przedstawionym na rys.21.18 wykonaj pomiary dla kilku zadanych wartości napięcia. Dokładnie wyznacz napięcie, przy którym dioda zaczyna przewodzić (przy polaryzacji w kierunku przewodzenia).

Wyniki pomiarów zestaw w tabeli 21.1.

Tabela 21.1

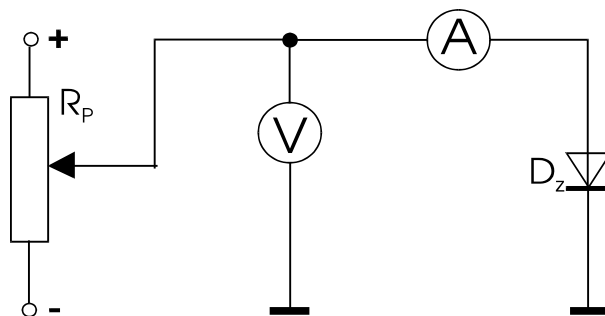
Lp.	Kierunek przewodzenia		Kierunek zaporowy	
	$U_F$	$I_F$	$U_R$	$I_R$
	V	mA	V	$\mu A$
1				
í	í	í	í	í
10				

Na podstawie wyników pomiarów narysuj charakterystykę prądowo-napięciową  $I=f(U)$  badanej diody. Dla jednej wybranej wartości napięcia z tabeli 21.1 oblicz rezystancję diody w kierunku przewodzenia i w kierunku zaporowym.

$$R_F =$$

$$R_R =$$

### 21.3.2. Pomiar charakterystyki prądowo-napięciowej diody Zenera



Rys. 21.19. Schemat połączeń

W układzie przedstawionym na rys.21.19 wykonaj pomiary dla kilku zadanych wartości napięcia.

Wyniki pomiarów zestaw w tabeli 21.2.

Tabela 21.2.

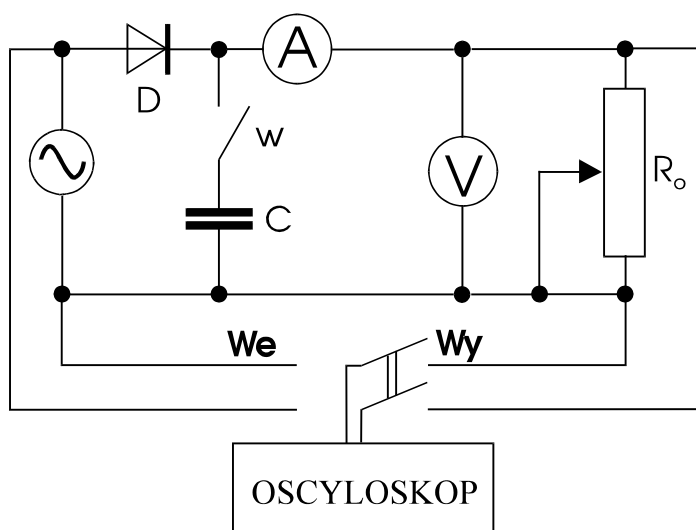
Lp.	Kierunek przewodzenia		Kierunek zaporowy	
	U V	I mA	U V	I mA
1				
í	í	..	í	í
10				

Na podstawie wyników pomiarów narysuj charakterystykę prądowo-napięciową  $I=f(U)$  badanej diody. Wyznacz rezystancję dynamiczną diody w kierunku zaporowym zgodnie z następującym wzorem:

$$r_z = \frac{\Delta U_z}{\Delta I_z}$$

Porównaj otrzymane charakterystyki diody prostowniczej i diody Zenera.

### 21.3.3. Badanie prostownika jednofazowego



Rys. 21.20. Schemat połączeń

W układzie przedstawionym na rys.21.20 wykonaj następujące badania i pomiary:

- zaobserwuj i odrysuj z ekranu oscyloskopu kształt krzywej napięcia wejściowego,
- zaobserwuj i odrysuj z ekranu oscyloskopu kształt krzywej napięcia wyjściowego (na odbiorniku) przy odłączonym (w - otwarty) i zamkniętym kondensatorze (w - zamknięty),
- zmieniając wartość rezystancji  $R_0$  pomierz charakterystykę zewnętrzną prostownika przy odłączonym (w - otwarty) i zamkniętym kondensatorze C (w - zamknięty).

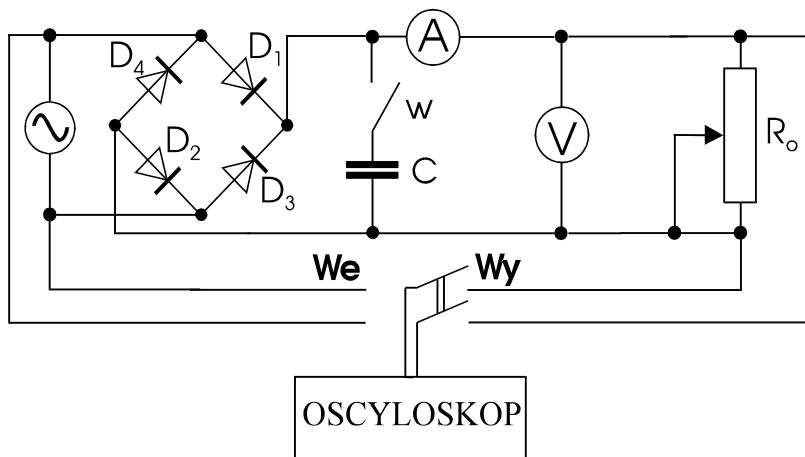
Wyniki pomiarów zestaw w tabeli 21.3.

Tabela 21.3

Lp.	U	I	$I_{(zC)}$	$U_{(zC)}$
	V	mA	mA	V
1				
í	í	í	í	í
8				

Na podstawie wyników pomiarów zawartych w tabeli 3 wykona charakterystyki zewnętrzne dla wartości skutecznych  $U=f(I)$ , przy włączonym i wyłączonym kondensatorze.

### 3.4. Badanie prostownika dwupołprzewodnikowego (mostek Graetz'a)



Rys. 21.21. Schemat połączeń

W układzie przedstawionym na rys.21.21 wykona badania i pomiary jak w punkcie 3.3.2:

Wyniki pomiarów zestawisz w tabeli 21.4.

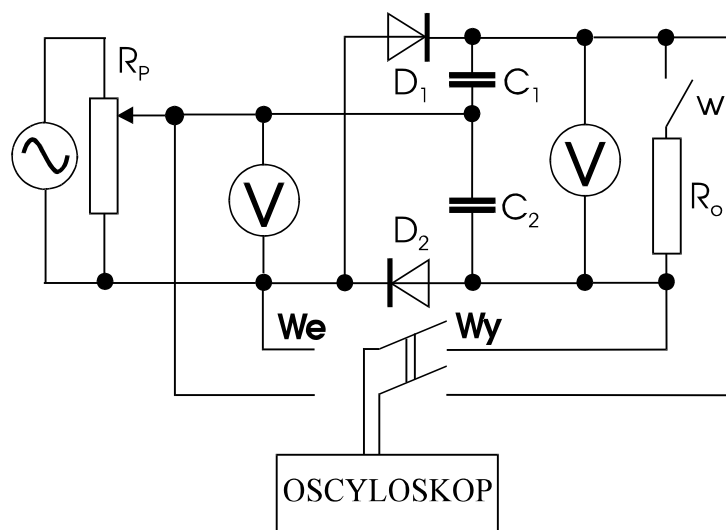
Tabela 21.4.

Lp.	U	I	$I_{(zC)}$	$U_{(zC)}$
	V	mA	mA	V
1				
í	í	í	í	í
8				

Na podstawie wyników zawartych w tabeli 21.4 narysować charakterystyki zewnętrzne dla wartości skutecznych  $U=f(I)$ , przy włączonym i wyłączonym kondensatorze.

**Uwaga!** Charakterystyki te narysować na wspólnym wykresie z charakterystykami z p.3.3.

### 21.3.5. Badanie podwajacza napięcia



Rys. 21.22. Schemat połączeń

W układzie przedstawionym na rys.21.22 wykonaj następujące badania i pomiary:

- zaobserwuj i odrysuj z ekranu oscyloskopu kształt krzywej napięcia wejściowego,
- zaobserwuj i odrysuj z ekranu oscyloskopu kształt krzywej napięcia wyjściowego (na odbiorniku) przy odłączonym i załączonym obciążeniu,
- odczytaj wartość maksymalną napięcia wejściowego (z oscyloskopu) oraz odczytaj wskazania woltomierza.

Pomiary wykonaj dla dwóch wartości napięcia wejściowego.

Wyniki pomiarów zestaw w tabeli 21.5.

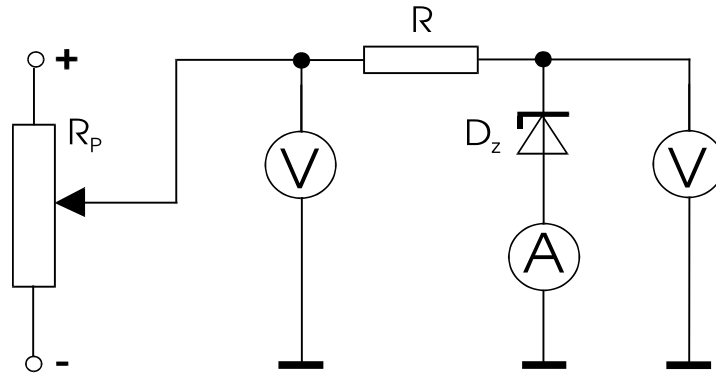
Tabela 21.5

Lp.	$U_{we \max}$	$U_{wy}$
	V	V
1		
2		

Na podstawie wyników z tabeli 21.5 oblicz dla obydwu wartości napięcia stosunek

$$\frac{U_{wy}}{U_{we \max}} =$$

### 21.3.6. Badanie stabilizatora napięcia stałego



**Rys. 21.23.** Schemat połączeń

W układzie przedstawionym na rys. 21.23 wykonaj pomiary dla kilku zadanych wartości napięcia wejściowego.

Wyniki pomiarów zestaw w tabeli 21.6.

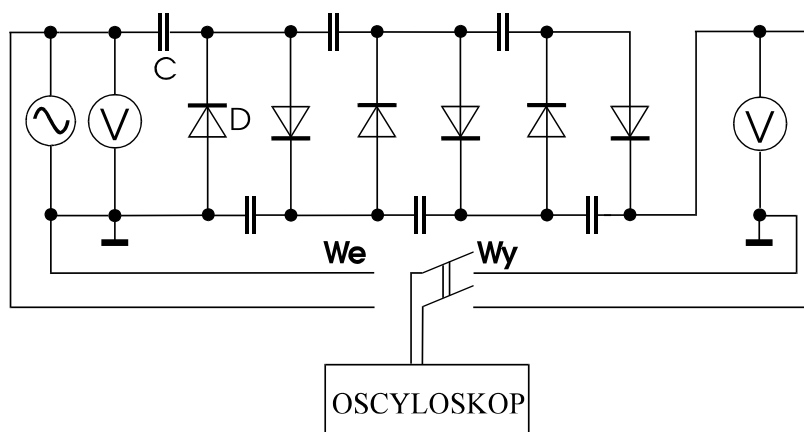
**Tabela 21.6**

Lp.	$U_{we}$	$I_z$	$U_{wy}$
	V	mA	V
1			
í	í	í	í
6			

Na podstawie wyników zawartych w tabeli 6 narysuj charakterystykę  $U_{wy}=f(U_{we})$ . Określ współczynnik stabilizacji

$$F_U = \frac{dU_{wy}}{dU_{we}} = \frac{\Delta U_{wy}}{\Delta U_{we}} =$$

### 21.3.7. Badanie powielacza napięcia



Rys.21.24. Schemat poćcze

W ukłdzie przedstawionym na rys. 21.24 wykona nastuj ce badania:

- zaobserwowa i odrysowa z ekranu oscyloskopu ksztac krzywej napi cia wej ciowego,
- zaobserwowa na ekranie oscyloskopu ksztac napi cia wyj ciowego ,
- odczyta warto napi cia wej ciowego (z oscyloskopu) oraz odczyta wskazania woltomierza.

Wyniki pomiarów zestaw w tabeli 21.7.

Tabela 21.7

$U_{we \max}$	$U_{wy}$
V	V

Na podstawie wyników z tabeli 21.7 obliczy :

$$\frac{U_{wy}}{U_{we \max}} =$$