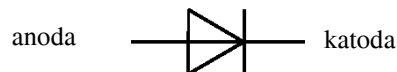


## Dioda

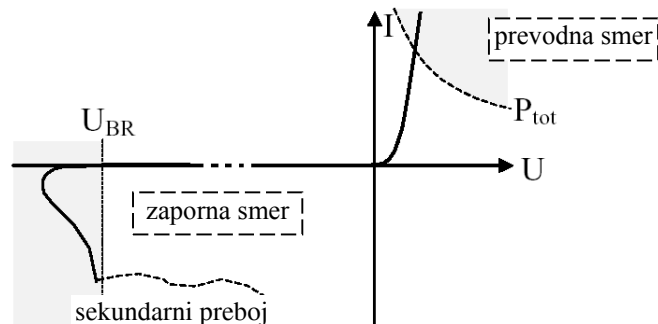
Najenostavnejši bipolarni polprevodniški element je dioda (Slika 1), ki izkorišča osnovne fizikalne lastnosti PN spoja nameščenega v primerno ohišje in opremljenega s priključnimi vezicami. Ker je tok skozi PN spoj v reverzni smeri zanemarljiv glede na tok v prevodni smeri, pravimo, da se dioda obnaša kot polprevodniški "ventil", ki prepušča tok le v eni smeri (idealizirano). Slednje je grafično ponazorjeno tudi s simbolom diode. Tok teče od anode proti katodi, pri čemer je z anodo poimenovana priključna vezica, ki je spojena s p-tipom polprevodnika, katoda pa z n-tipom.



Slika 1: Simbol diode

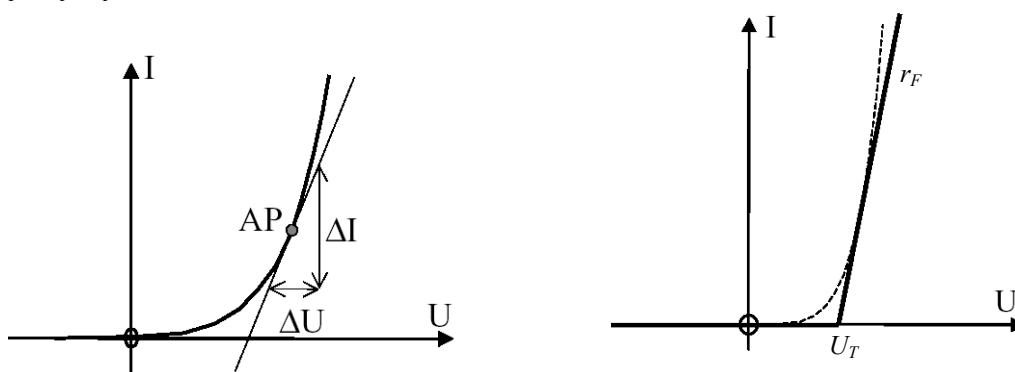
### Statična u-i karakteristika diode

Karakteristika je enaka karakteristiki PN spoja in sestoji iz dveh delov (Slika 2): prevodnega in reverznega.



Slika 2: U-I karakteristika diode s podanimi omejitvami

V prevodni smeri (angl. Forward) tok strmo narašča in je padec napetosti relativno majhen. Za delovno točko (AP) (Slika 3), ki se nahaja na strmejšem delu karakteristike, si lahko poenostavljeno mislimo, da je padec napetosti sestavljen iz dveh delov: iz konstantne pragovne napetosti in iz dela, ki je enak produktu toka in diferencialne upornosti  $u_F = U_T + i_F \cdot r_F$ ,



Slika 3: Realna in idealizirana (linearizirana) karakteristika diode v prevodni smeri

kjer je  $r_F$  nadomestna notranja diferencialna upornost diode v prevodni smeri

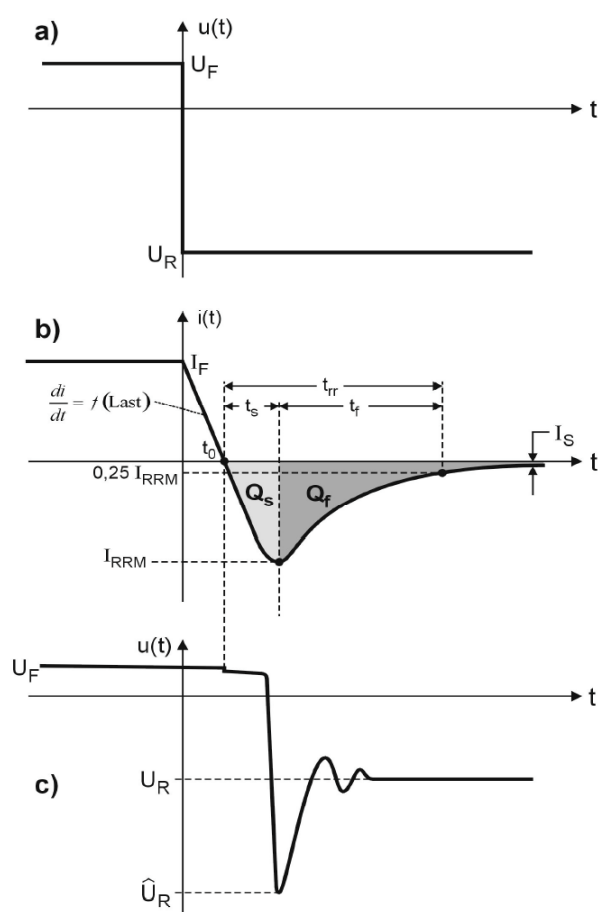
$$r_F = \frac{\Delta U}{\Delta I} = \frac{\Delta u_F}{\Delta i_F}.$$

Zaradi nastalih izgub je tok v prevodni smeri omejen na neko maksimalno dopustno vrednost, pri kateri statične izgube (mišljene so konstantne enosmerne razmere) ne prekoračijo dopustne vrednosti  $P_{tot}$ . Dopustne so kratkotrajne preobremenitve, ki pa so pretežno omejene z dinamičnimi lastnostmi ohlajevanja PN spoja.

Napetostno tokovne razmere so v reverzni smeri omejene z maksimalno napetostjo, pri kateri še ne nastopi enormno povečanje reverznega toka skozi PN spoj (reverzibilni, primarni preboj). Pri prekoračitvi maksimalne izgubne moči v reverzni smeri pride do t.i. sekundarnega, termičnega preboja, ki vodi v uničenje diode.

### Dinamične lastnosti

Diode prehajajo iz zapornega v prevodno stanje in narobe z določeno zakasnitvijo. Pri zelo hitrem porastu prevodnega toka  $i_F$  se le-ta ne more enakomerno porazdeliti na celotno Si-tabletko in zato nastopajo krajevna pregretja, ki lahko uničijo kristal. Zato podajajo proizvajalci za svoje diode največje dopustne strmine naraščanja toka  $(di/dt)_{KRIT}$ . Njihove vrednosti znašajo od 50 do 300 A/ $\mu$ s.



Slika 4: Izklop diode

V trenutku, ko postane zunanja gonilna napetost  $u_A$  negativna, tok skozi diodo ne preneha teči skočno, ampak postopoma upada do vrednosti nič. Tok diode  $i_F$  steče tedaj za kratek čas v nasprotni smeri dalje (Slika 4). Ta čas je potreben, da iz zapornega sloja, ki je bil do sedaj preplavljen s prostimi nosilci naboja le-ti odtečejo v zunanjo baterijo oziroma se rekombinirajo. Ko je ta inverzni tok  $i_R$  dosegel svojo največjo vrednost  $I_{RRM}$ , se začne z veliko strmino  $-di_F/dt$  zmanjševati proti vrednosti nič in dioda prevzame nase zaporno napetost  $u_R$ . Ta tokovna sprememba lahko povzroči na obstoječi induktivnosti tokokroga zelo velike inducirane napetosti, ki lahko napetostno ogrozijo diodo.

Šrafirano označena napetostno-časovna ploščina  $Q_{rr} = Q_s + Q_f$  se imenuje naboj sprostitve in je merilo za velikost tako imenovanega efekta koncentracije nabojev. Sproščeni naboj  $Q_s$  v času  $t_s$  ni konstanten, temveč postaja večji, če narašča temperatura kristala, amplituda toka  $I_F$  in velikost tokovne strmine  $-di_F/dt$  pri prehodu toka  $i_F$  skozi vrednost nič. Po drugi strani je naboj  $Q_f$ , potek toka v času

$t_f$  in čas upadanja  $t_f$  odvisen pretežno od uporabljenega tehnološkega procesa in strukture diode.

## Usmerniške in signalne diode

Usmerniške ali univerzalne diode opravljajo funkcijo usmerjanja tokov (signalov) v vezjih kot so:

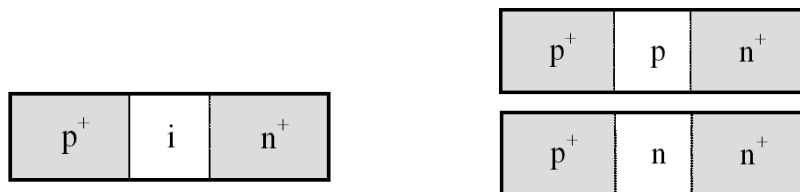
- napetostni omejevalnik,
- omrežni usmerniki,
- demodulacijska vezja,
- napetostni množilniki,
- enostavna logična vezja,
- ...

Za tako raznovrstne naloge obstaja množica diod, ki se razlikujejo po karakteristikah, ohišju ter še čem. Orientacijske vrednosti signalnih in usmerniških diod podaja tabela.

Tabela 1: Orientacijske vrednosti

Oznaka		1 N 4148	MR 501 .. 510	1 N 3913
Uporaba		signalna dioda	usmerniška dioda	usmerniška z fast recovery karakteristiko
<b>Mejne vrednosti</b>				
Periodična vršna vrednost zaporne napetosti (peak repetitive reverse voltage)	$U_{RRM}$	100 V	100 V, 200 V, ...1000 V	400 V
Srednja vrednost toka (average rectified forward current)	$I_{FAV}$	150 mA	3 A	30 A
Neponovljiva (udarna) vrednost toka v prevodni smeri (surge forward current)	$I_{FSM}$	500 mA	100 A	300 A
<b>Tipične karakteristične vrednosti (pri 25°C)</b>				
Zaporni tok (leakage current / reverse current)	$I_R$	25 nA	100 nA	10 µA
Kapacitivnost zapornega spoja ( $U_R = 1V$ ) (junction capacitance)	$C$	4 pF	40 pF	90 pF
Čas sprostitve (reverse recovery time)	$t_{rr}$	4 ns	5 µs	150 ns
Termična upornost (thermal resistance)	$R_{th}$	350 K/W	1,2 K/W	28 K/W
Ohišje		Stekleno z aksialnimi priključki	Plastično z aksialnimi priključki	Kovinsko ohišje, pritrditev z vijakom

Konstrukcija usmerniških diod za večje moči in višje napetosti je tem nalogam posebej prilagojena (Slika 4). Da se poveča prebojna trdnost, je med P in N spoj vstavljen bodisi čisti (i) ali pa zelo šibko dopiran polprevodnik. Govorimo o PIN diodah.

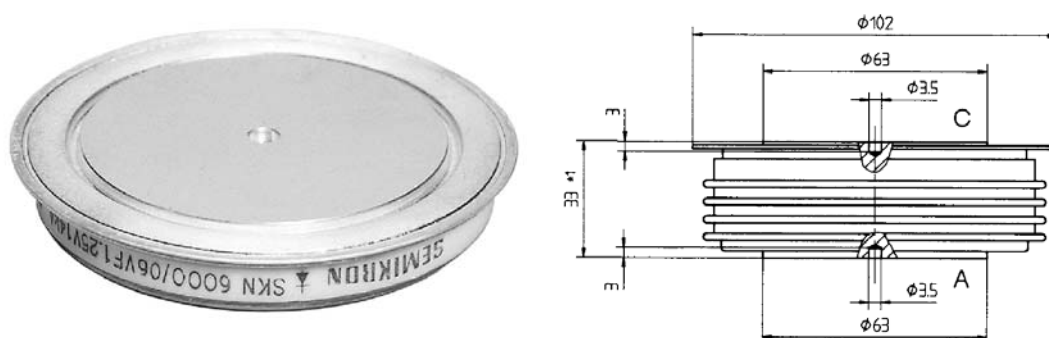


Slika 5: Notranja struktura visokonapetostnih diod

Čeprav je vstavljen sloj polprevodnika, ki je šibkeje dopiran, pa le-ta ne povzroči prekomernega povečanja padca napetosti v prevodni smeri. Temu je vzrok velika količina prostih nosilcev naboja, ki “preplavijo” (vdrejo) v osiromašeno področje. Tipične karakteristike takšne visokonapetostne močnostne diode povzema spodnja tabela.

Tabela 2: Tipične vrednosti močnostne visokonapetostne diode (Slika 6)

<b>Mejne vrednosti</b>		
Periodična vršna reverzna napetost (50 Hz)	$U_{RRM}$	4000 V
Neponovljiva vršna reverzna napetost (< 5 ms)	$U_{RSM}$	5200 V
Srednja vrednost toka (50 Hz)	$I_{FAVM}$	3300 A
Efektivna vrednost toka (50 Hz)	$I_{FRMS}$	5180 A
Neponovljiva (udarna) vrednost toka	$I_{FSM}$	50 000 A (10 ms) 130 000 A (1 ms)
<b>Tipične karakteristične vrednosti (pri 25°C)</b>		
Pragovna napetost	$U_T$	1,0 V
Diferenčna upornost	$r_F$	0,13 mΩ
Padec napetosti pri $I_F = 5000$ A	$U_F$	< 1,68 V
Zaporni tok (pri $T_j = 150$ °C; $U_R = 4000$ V)	$I_{RRM}$	< 400 mA
Termična upornost – enostransko hlajenje (junction to case) - dvostransko hlajenje	$R_{th/J-C}$	16 K/kW 8 K/kW
Termična upornost – enostransko hlajenje (case to heat sink) - dvostransko hlajenje	$R_{th/C-H}$	6 K/kW 3 K/kW
Ohišje:	disk premera 102 mm, debelina 33 mm	



Slika 6: Pripadajoče ohišje diode in njene dimenzije

Toke od nekaj amperov do nekaj 1000 A, ki tečejo v raznovrstnih pretvornikih, usmerjamo in preklapljammo s hitrimi preklopnimi močnostnimi diodami, velikost katerih je odvisna od toka. Ker je izgubna moč močnostne diode odvisna tako od trenutne kot tudi od efektivne vrednosti toka

$$P = U_T \cdot I_{FAV} + I_{FRMS}^2 \cdot r_F,$$

sta za izbiro oziroma dimenzioniranje diode pomembna:

- $I_{FRMS}$  (RMS Forward current) efektivna vrednost toka v prevodni smeri in,
- $I_{FAV}$  (Mean Forward current) srednja vrednost toka.

V blokirni oziroma reverzni smeri gonilna napetost ne sme preseči:

- $U_{RSM}$  (non-repetative peak reverse voltage)
- $U_{RRM}$  (Repetative reverse voltage).

Kjer je frekvenca priključene napetosti visoka (nad 500 Hz), moramo pri izbiri hitrih preklopnih diod preveriti preklopne čase in njeno obnašanje pri izklopu toka. Razvojni trendi sodobnih preklopnih diod so usmerjeni v izdelavo diod z izredno majhnimi sprostivnimi časi in "mehkim" upadom toka v drugem delu izklopnega pojava ( $t_f$ ) (soft turn-off dioda, CAL dioda).

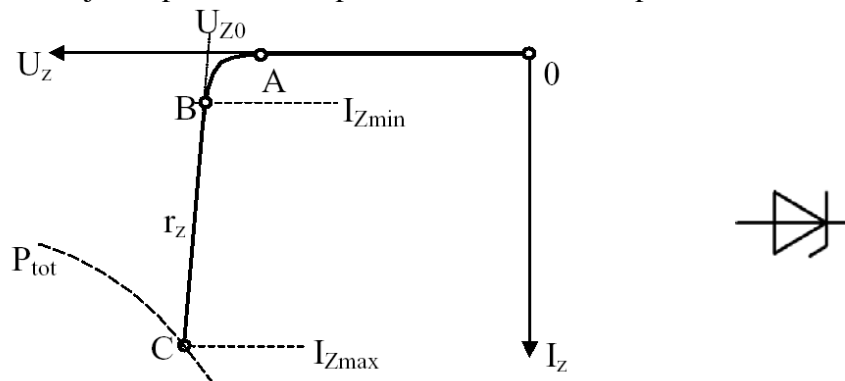
...navedi primere uporabe....

## **Signalna dioda**

.....

## Zener dioda

Zener diode temeljijo na izkoriščanju t.i. Zenerjevega efekta, ki opisuje reverzibilen (ponovljiv) pojav plazovitega preboja PN spoja v reverzni smeri (Slika 7). Pri prekoračitvi določene reverzne napetosti ( $U_{Z0}$ ) se namreč tok močno poveča (podobno kot v prevodni smeri), tako da se majhna sprememba napetosti odrazi v veliki spremembi toka.



Slika 7: Karakteristika in simbol Zener diode

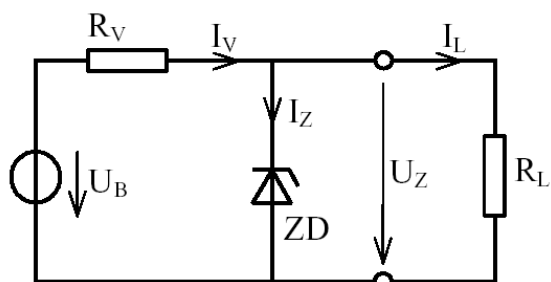
Zenerjev efekt oziroma Zener diode uporabljamo zato predvsem v funkciji napetostnih referenčnih členov in vezij za stabilizacijo napetosti, kjer želimo, da je izhodna napetost takšnih vezij čimmanj odvisna od bremenskega toka in vhodne, napajalne napetosti. Da smo opisani nalogi kos, moramo zagotoviti, da tok skozi Zener diodo nikoli ne bo manjši od  $I_{Zmin}$  ter hkrati ne večji od  $I_{Zmax}$  (nevarnost preobremenitve). Zener dioda je tem kakovostnejša čim manjša je njena diferenčna upornost v reverzni smeri  $r_Z$ .

Tabela 3: Karakteristične lastnosti Zener diod nekaterih najpogostejših družin

Oznaka družine	BZX55	BZX85	BZV48	ZX
oznaka	BZX 55 C2V7 ...BZX55 C110	BZX85 C2V7 ...BZX85 C110	BZV48 C3V3 ...BZV48 C200	ZX 3,9 ... ZX 200
Zener napetost	2,7 ... 110 V	2,7 ... 110 V	3,3 ... 200 V	3,9 ... 200 V
Izgubna moč	0,5 W	1,3 W	5 W	10 W (hladilno telo)
Ohišje	Stekleno z aksialnimi priključki	Stekleno z aksialnimi priključki	Plastično z aksialnimi priključki	Kovinsko ohišje z vijačno pritrditvijo

## Stabilizacijska vezja z Zener diodo

Vezje napetostnega stabilizatorja (Slika 8), ki je priključeno na vhodno neregulirano napetost, mora zagotoviti konstantno izhodno napetost ne glede na velikost izhodnega, bremenskega toka.

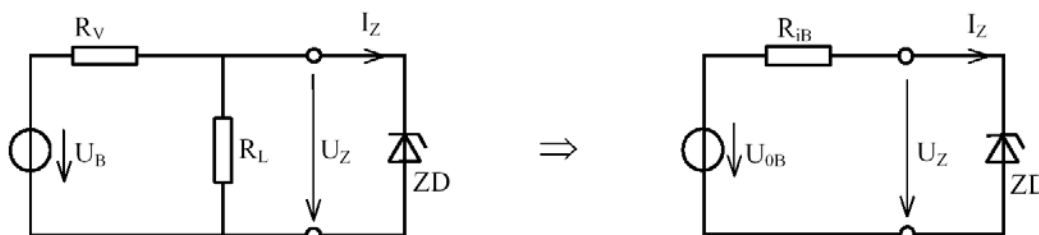


Slika 8: Najenostavnejši stabilizator napetosti

Najenostavnejše vezje za stabilizacijo napetosti je sestavljeno iz Zener diode in zaščitnega predupora. Vezje je priključeno na izvor nestabilizirane napetosti, ki pa mora biti večja od želene izhodne vrednosti. Breme je priključeno paralelno k Zener diodi, katere napetost je približno konstantna, če le zagotovimo, da bo tok skozijo vedno v mejah med  $I_{Zmin}$  in  $I_{Zmax}$ . Izpolnitev slednjega pogoja lahko preverimo bodisi po grafični ali analitični poti.

### Grafična določitev delovne točke

Osnova vseh grafičnih rešitev je, da vezje predhodno razdelimo na aktivni in pasivni dvopol. Mesto prvega reza si vzemimo tako, da aktivni dvopol sestavljajo vir napetosti, predupor in bremenski upor, medtem ko pasivni dvopol tvori Zener dioda.

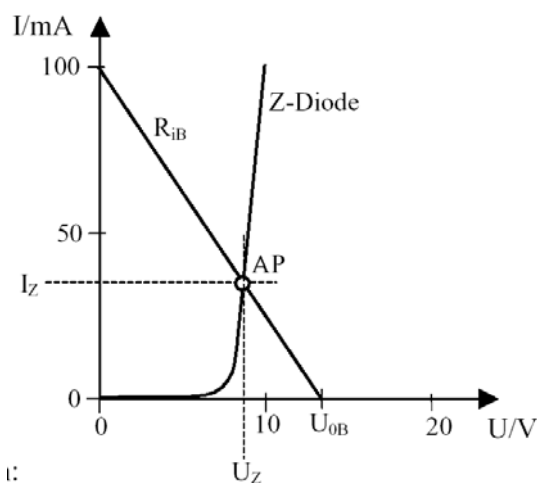


Slika: Nadomestno vezje po Theveninu – primer I

Nad aktivnim dvopolom uporabimo Theveninov izrek, ki vezje poda z ekvivalentnim napetostnim virom in z njegovo notranjo upornostjo

$$U_{0B} = U_B \cdot \frac{R_L}{R_V + R_L} = 13,3 \text{ V}$$

$$R_{iB} = \frac{R_V \cdot R_L}{R_V + R_L} = 133,3 \Omega.$$



Slika: Grafična določitev delovne točke – primer I



Tako opisano vezje ponazorimo v grafični obliki z njegovo karakteristiko, ki jo vnesemo ob karakteristiko Zener diode. Presečišče karakteristik tvori delovno točko, iz katere razberemo aktualne napetostno tokovne razmere v vezju

$$I_Z \approx 35 \text{ mA} \quad U_Z \approx 8,7 \text{ V}.$$

Preostale električne veličine vezja se izračunajo po analitični poti:

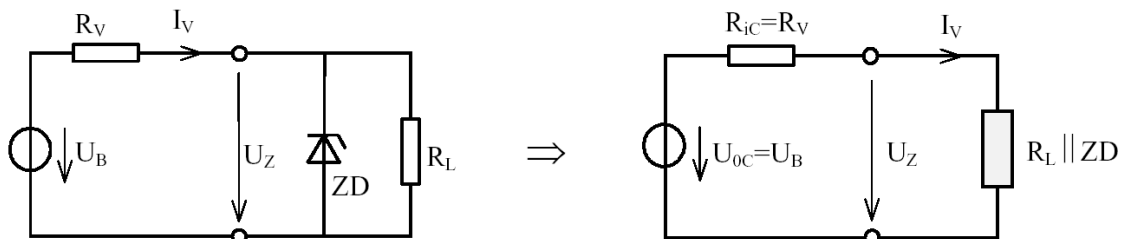
$$I_L = U_Z/R_L = 21,75 \text{ mA}$$

$$U_L = U_Z \approx 8,7 \text{ V}$$

$$I_V = I_Z + I_L = 56,75 \text{ mA}$$

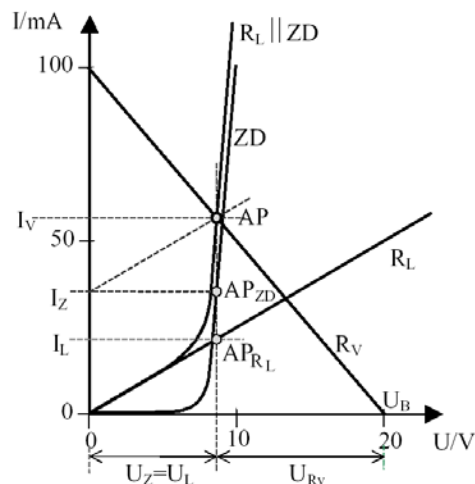
$$U_{R_V} = U_B - U_Z \approx 11,3 \text{ V}$$

Do opisanih napetostno tokovnih razmer pridemo lahko tudi tako, da v izhodiščnem vezju napravimo rez tako, da aktivni dvopol sestavljajo vir napetosti in predupor, medtem ko pasivni dvopol tvori Zener dioda skupaj z bremenskim uporom.



Slika: Nadomestno vezje po Theveninu – primer II

Karakteristiko aktivnega dvopola vrišemo v graf na podoben način kot v predhodnem primeru, medtem ko moramo karakteristiko nelinearnega, pasivnega dvopola še konstruirati. To storimo z združitvijo obeh delnih karakteristik, ki ju vrišemo ter seštejemo po ordinati.



Slika: Grafična določitev delovne točke – primer II

Presečišče karakteristik obeh delnih dvopolov podaja delovno točko, ki je opisana s parom

$$U_Z = U_L \approx 8,7 \text{ V} \quad I_V \approx 56,7 \text{ mA}.$$

Ker delovna točka (AP) podaja izhodno napetost, lahko iz grafa sočasno odčitamo tudi vrednosti

$$I_Z \approx 35 \text{ mA} \quad I_L \approx 21,5 \text{ mA}$$

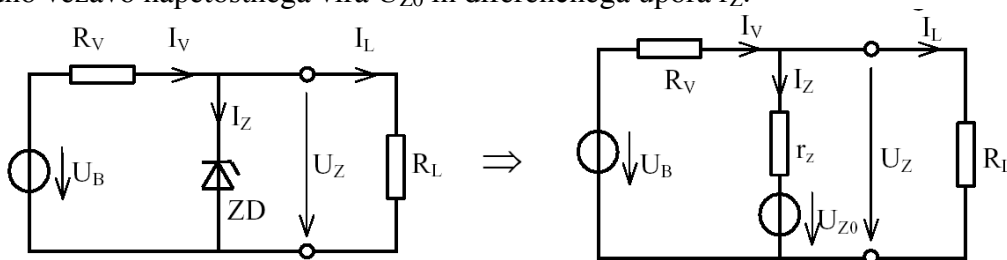
ter napetost na zaščitnem predporu

$$U_{RV} = U_B - U_Z \approx 11,3 \text{ V}.$$

Čprav obe grafični metodi podajata približne rezultate, v praksi takšen postopek reševanja pogosto uporabljamo, saj hitro pokaže ali se delovna točka Zener diode nahaja v linearnem delu karakteristike.

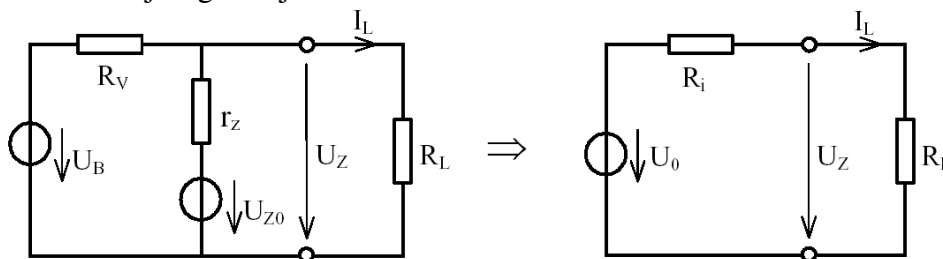
### Analitična določitev delovne točke

Analitično reševanje pričemo z linearizacijo karakteristike Zener diode, ki jo ponazorimo z zaporedno vezavo napetostnega vira  $U_{Z0}$  in diferenčnega upora  $r_Z$ .



Slika:

V naslednjem koraku s Theveninovim izrekom kompleksno vezje aktivnega dvopola, ki ga sestavljata dva vira napetosti, ponazorimo z nadomestnim napetostnim virom in notranjo upornostjo stabilizacijskega vezja.



Slika:

Napetost nadomestnega vira najhitreje določimo s pomočjo principa superpozicije

$$U_0 = U_B \frac{r_Z}{R_V + r_Z} + U_{Z0} \frac{R_V}{R_V + r_Z} = 9,09 \text{ V}.$$

Notranja upornost stabilizacijskega vezja je

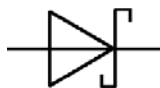
$$R_i = \frac{R_V \cdot r_Z}{R_V + r_Z} = 18,18 \Omega.$$

Od tu lahko izračunamo razmere na izhodu vezja  $I_L = \frac{U_0}{R_L + R_i} = 21,74 \text{ mA}$  in

$$U_L = U_Z = U_0 \frac{R_L}{R_L + R_i} = 8,7 \text{ V}.$$

## Schottky dioda

Delovanje Schottky-eve diode ne temelji na klasičnem PN spoju, temveč na spoju med kovino in polprevodnikom (ponavadi n-tip). Zaporni sloj nastane tudi pri takšni strukturi, le da se slednji razprostira le v polprevodniku, s čimer ta struktura pridobi »usmerniški« karakter klasične PN diode.



Slika: Simbol Schottky diode

Zaradi specifične sestave sodelujejo pri toku zgolj večinski nosilci naboja (elektroni), medtem ko je transport manjšinjskih nosilcev onemogočen (ni možnosti rekombinacij slednjih). S tem se bistveno izboljšajo dinamične lastnosti (sprstitveni čas) diode, saj so le-te pretežno odvisne od počasnega procesa rekombinacije manjšinjskih nosilcev naboja.

Ostale prednosti in slabosti Schottky diode:

- padeč napetosti v prevodni smeri je bistveno nižji (0,3 .. 0,4V),
- reverzni tok je nekajkrat večji od toka klasične PN diode, in močno odvisen od velikosti reverzne napetosti,
- nižja prebojna napetost.

Oznaka		1N 5711	BAT 42	1N5819	MBR1035
<b>Mejne vrednosti</b>					
Srednja vrednost toka v prevodni smeri	$I_{FAVM}$	15 mA	100 mA	1 A	10 A
Periodična reverzna napetost	$U_{RRM}$	70 V	30 V	40 V	35 V
<b>Tipične vrednosti</b>					
Padeč napetosti v prevodni smeri	$U_F$	< 0,41 V pri 1 mA	< 0,4 V pri 10 mA	< 0,35 V pri 100 mA	< 0,57 V pri 10 A
Spojna kapacitivnost	C	2 pF	5 pF		

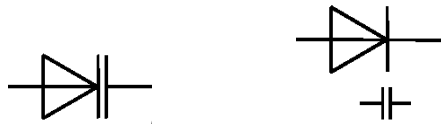
Tabela: Karakteristične vrednosti nekaterih Schottky diod

Schottky diodo zato uporabljamo predvsem v aplikacijah:

- kjer nastopajo visoke preklopne frekvence,
- preklopne diode z izredno majhnimi sprostitvenimi časi,
- močnostni usmerniki z velikimi izhodnimi tokovi,
- Schottky - logična vezja,
- optoelektronski sklopi.

## Kapacitivna (varicap) dioda

Delovanje kapacitivnih diod sloni na izkoriščanju osnovnih lastnosti PN spoja, ki se mu v reverzni smeri zelo spreminja spojna kapacitivnost.



Slika: Simbol varicap diode (star/novejši)

S spreminjanjem reverzne napetosti se spreminja debelina zapornega sloja, ki je revno z nosilci naboja (obnaša se kot izolator-dielektrik), medtem ko oba močno dopirana konca polprevodnika predstavljata elektrodi tako namišljenega kondenzatorja. Njegova kapacitivnost

$$C_s = C_{s0} \cdot \left( \frac{U_D}{U_D + U_R} \right)^n$$

se lahko glede na jakost dopiranja ( $n = 0,5$  do  $2$ ) vzdolž kristala spreminja tudi v razmerju 1:30. Karakteristične lastnosti nekaterih varicap diod povzema spodnja tabela.

Oznaka	BB112	BB139	BB631	BB709A
Max. kapacitivnost $C_{\max}$ pri $U_R = 1$ V	500 pF	50 pF	50 pF	35 pF
Min. kapacitivnost $C_{\min}$	20 pF pri $U_R = 9$ V	5 pF pri $U_R = 25$ V	3,5 pF pri $U_R = 25$ V	2,7 pF pri $U_R = 28$ V
$C_{\max} / C_{\min}$	25	10	14,3	13
Uporaba: uglaševanje nihajnih tokokrogov				

Tabela: