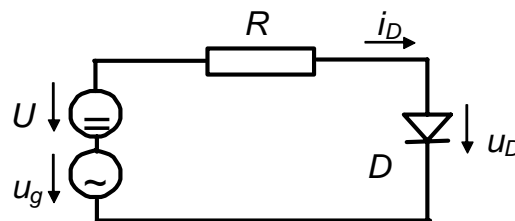


Téma 3. : Usmerňovacie diódy

Zadanie:

1. Oboznámte sa s katalógovými údajmi predložených polovodičových diód.
2. Overte funkčnosť diód.
3. Zmerajte V - A charakteristiky diód v priepustnom i v závernom smere a znázornite graficky $I_D = f(U_D)$
 - a) pre kremíkovú diódu s priechodom pn
 - b) pre Schottkyho diódu na kremíku
4. Z nameraných V - A charakteristík určte pre obe diódy
 - a) sériový odpor R_S v priepustnom smere
 - b) saturačný prúd I_S (vypočíta sa z priepustného smeru)
 - c) diferenciálny odpor r_d a statický odpor R_{st} v priepustnom smere pre prúdy $I_D = 10\mu A, 1mA, 10mA$ a $100mA$.
 - d) prahové napätie U_p v priepustnom smere.
5. Zobrazte V - A charakteristiky predložených diód osciloskopom.
 - a) Určte prahové napätie U_p v priepustnom smere.
 - b) Určte frekvenciu, pri ktorej dochádza ku deformácii charakteristiky.
 - c) Nakreslite deformovaný priebeh voltampérovej charakteristiky.
6. Navrhните jednoduchý obvod s jednou usmerňovacou diódou, ktorý usmerní striedavé napätie na jednosmerné. Pulzujúce napätie vyhlad'te zaradením filtra za usmerňovač a pred filtračný kondenzátor vložte odpor obmedzujúci nárazový prúd. Pozorujte a popíšte časové priebehy striedavého sínusového napätia na vstupe a výstupe jednoduchého jednocestného usmerňovača. Sledujte vplyv veľkosti kapacity filtračného kondenzátora na tvar výstupného napätia meraním a výpočtom vyhodnot'te efektívnosť filtrovania pri jednotlivých kondenzátoroch.
7. Vypočítajte aké by bolo striedavé napätie u_S na priepustne polarizovanej kremíkovej dióde z bodu 3a) v obvode podľa obr. 1, ak prúd pretekajúci v priepustnom smere je $I_D = 10mA$, odpor zapojený do série s diódou má veľkosť $R = 1k\Omega$ a napätie generátora sínusového signálu s frekvenciou $50Hz$ je $u_p = 0,5V$?



Obr. 3.1. Dióda v striedavom obvode.

Odporučená literatúra :

PREDNÁŠKY - Polovodiče a polovodičové pn priechody, ELEKTRONICKÉ PRVKY, návody na cvičenia a prípravu projektov (1999, M. Žiška, L. Stuchlíková) str. 68 – 130

Podklady k realizácii úloh zadania

K bodu 1:

Uveďte katalogové údaje predložených polovodičových diód: napr. maximálne napätie v závernom smere U_{RM} , maximálne opakovateľné napätie v závernom smere U_{RRM} , maximálny špičkový priepustný prúd I_{FSM} , maximálny opakovateľný prúd v priepustnom smere I_{FRM} , stredný usmernený prúd I_{FAV} , celkový dovolený stratový výkon P_{tot} , záverné napätie U_R pre dané I_R a priepustné napätie U_F pre dané I_F .

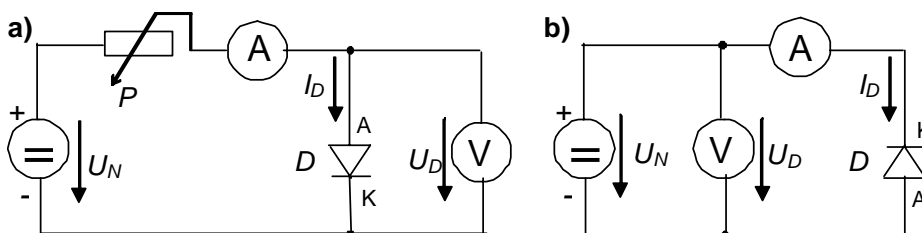
K bodu 2:

Funkčnosť diód môžete overiť napríklad nasledovne

- Charakterograf HAMEG** nastavte na meranie bipolárnych tranzistorov typu *npn* a katódu diódy pripojte na zdierku s označením *E* a anódu na zdierku s označením *C*. Nastavte minimálne meracie rozsahy napätia a stratového výkonu. Po stlačení **DUT** sa Vám v prípade funkčnej diódy na obrazovke zobrazí priepustná volt-ampérová charakteristika.
- Multimeter** vo funkcii „diódy“ zisťuje rozpojený alebo skratovaný obvod (pípanie, číselný údaj). V prípade diód ukáže úbytok na prechode [mV].

K bodu 3:

Zapojte diódu do obvodu podľa obr. 2. V meracom obvode v priepustnom smere musí byť zaradený ochrannopracovný rezistor, keďže *V-A* charakteristika diódy je veľmi strmá - veľmi malá zmena napätia U_D pri priepustnej polarizácii spôsobí veľkú zmenu prúdu diódou I_D .



Obr. 3.2. Schéma zapojenia na meranie VACH diódy a) v priepustnom a b) závernom smere

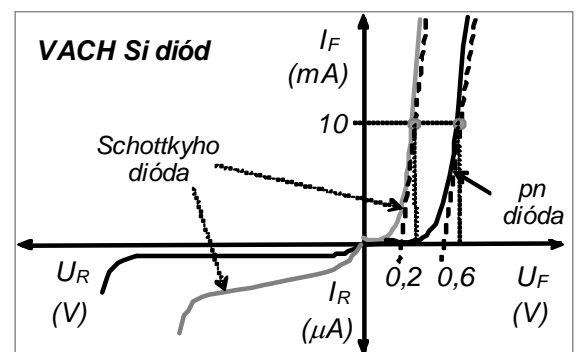
Poznámka: Pre kremíkové *pn* diódy je záverný prúd I_R nemerateľný = prúd minoritných nosičov náboja ~ pA.

!!! Pri meraní je nutné dodržiavať predpísané dovolené hodnoty prúdov a napätí meranej diódy

Zmerajte *V-A* charakteristiky diód v priepustnom (min 8 bodov, $I_{Fmax}=150\text{ mA}$) a v závernom smere (min 4 body, $U_{Rmax}=20\text{V}$), znázorníte graficky $I_D=f(U_D)$.

- Uvedomte si, že vo *VACH* sledujete ako sa mení prúd tečúci diódou I_D v závislosti od veľkosti napätia U_D pripojeného na diódu.
- Pri meraní *VACH* diódy v priepustnom smere sa odporúča nastavovať hodnoty prúdu I_D a sledovať odpovedajúce hodnoty napätia U_D . Na citlivejšiu reguláciu prúdu I_D v priepustnom smere je vhodné zaradiť do meracieho obvodu namiesto rezistora potenciometer (obr. 3.2).
- Pri voľbe meracích bodov dajte dôraz na to, aby ste vystihli podstatu *VACH* – v nelineárnej oblasti voľte meracie body hustejšie, lineárne časti charakteristiky stačí popísať dvoma bodmi (obr. 3.3).

Odporúčané hodnoty I_D pri meraní *VACH* v priepustnom smere $I_D=10\mu\text{A}$, $50\mu\text{A}$, $100\mu\text{A}$, $250\mu\text{A}$, $500\mu\text{A}$, 1mA , 2mA , 10mA , 20mA , 80mA , 100mA a 150mA .



Obr. 3.3. VACH kremíkovej diódy s *pn* priechodom a Schottkyho kontaktom

K bodu 4:

Sériový odpor R_S vypočítajte z dvoch bodov priepustnej VACH diódy

$$R_S = \frac{U_T \ln(I_1 / I_2) + U_2 - U_1}{I_2 - I_1}$$

➤ Vzťah pre R_S je odvodený zo **Shockleyho rovnice**, ktorá definuje veľkosť prúdu I_D ideálnou diódou v prípade strmého asymetrického pn priechodu v závislosti od napätia na ideálnej dióde U_D .

$$I_D = I_s \left[\exp\left(\frac{qU_D}{kT}\right) - 1 \right]$$

I_s - saturačný prúd minoritných nosičov náboja
 q - náboj elektrónu
 k - Boltzmannova konštanta
 T - teplota v [K]
 $kT/q = U_T$ - napätie Boltzmanovo
 $U_T = 0,026V$ ak $T = 300K$

➤ V prípade **reálnej diódy** je napätie na ideálnej dióde U_D v Shockleyho rovnici definované ako rozdiel napätia na reálnej dióde U a úbytku napätia na parazitnom sériovom odpore diódy R_S , teda $U_D = U - R_S I_D$. Potom pre prúd

diódou I_D platí vzťah

$$I_D = I_s \left[\exp\left(\frac{q(U - R_S I_D)}{kT}\right) - 1 \right]$$

Poznámka: Uvedený vzťah pre R_S platí za predpokladu $I_D / I_s \gg 1$. Vzhľadom na to, že hodnota R_S býva menšia ako 10Ω , treba ho určiť pri takých hodnotách prúdov, kedy nie je jeho vplyv z hľadiska presnosti merania zanedbateľný. Odporúča sa urobiť meranie pri 1mA a čo najvyššom prúde (150mA).

Saturačný prúd I_s vypočítajte z hodnôt merania pri $I_D = 1mA$. Vzťah na výpočet vychádza zo

Schockleyho rovnice pre reálnu diódu

$$I_s = \frac{I_1}{\exp\left(\frac{q(U_1 - R_S I_1)}{kT} - 1\right)} = \frac{I_1}{\exp\left(\frac{U_1 - R_S I_1}{U_T} - 1\right)}$$

Dynamický odpor r_d je možné odvodiť zo Shockleyho rovnice

$$r_d = \frac{\Delta U}{\Delta I} \Rightarrow r_d = \frac{dU}{dI} = \frac{kT}{q} \frac{1}{I_D}$$

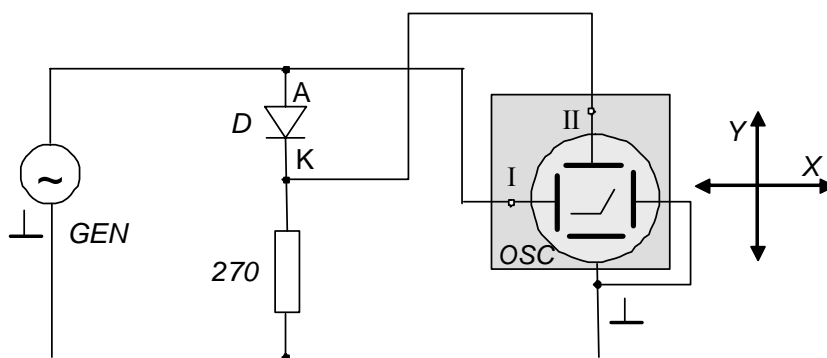
Graficky sa určuje ako smernica dotyčnice v pracovnom bode.

Statický odpor R_{st} v pracovnom bode je definovaný

$$R_{st} = \frac{U}{I}$$

Prahové napätie U_t - napätie kedy diódou začína tiecť prúd môžeme určiť z grafu VACH diódy ako prienik dotyčnice v pracovnom bode so súradnicovou osou X.

K bodu 5:



Obr. 3.4. Schéma zapojenia na zobrazenie charakteristík diód osciloskopom

Zapojte diódu do obvodu podľa obr. 3,4.

Použijeme zobrazenie osciloskopu X-Y. Výchylka X predstavuje napätie na dióde, Y predstavuje prúd diódou .

Poznámka: Pre „kostrové problémy“ nie je možné zapojiť osciloskop (X súradnicu) priamo na diódu, meria sa celkové napätie z generátora.

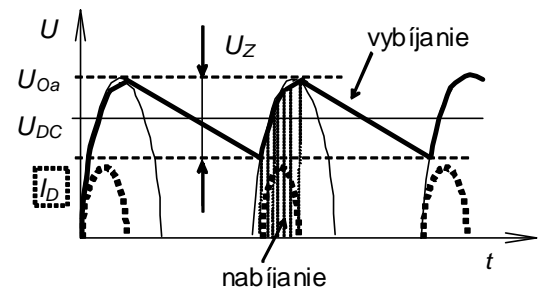
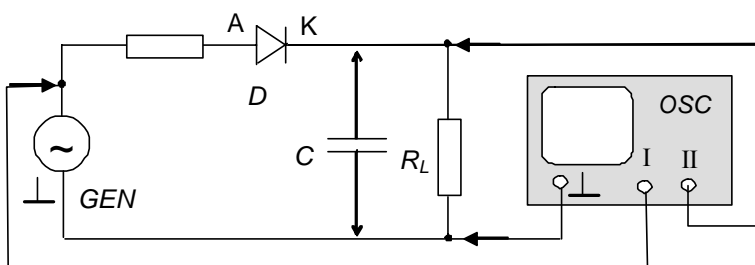
- Statické meranie: Ak otočíte diódu (prepolarizujete ju) prevráti sa jej charakteristika. Pri zvyšovaní $U_{generátora}$ sa ako prvé objaví $U_{prahové}$ v priepustnom smere (Si pn dióda $\sim 0.6V$, Si Schottkyho dióda $\sim 0.2V$). V závernom smere zistíme prah $U_{prierazné}$ v stabilizačných diódach, ak máte dostatočne veľké $U_{generátora}$.
- Dynamické meranie: Postupne zvyšujeme frekvenciu sínusového signálu funkčného generátora a sledujeme deformáciu $VACH$ (prekmit prúdu do záporných častí, hysteréziu v priepustnom smere). Odčítajte frekvenciu, pri ktorej dochádza ku deformácii charakteristiky a nakreslite deformovaný tvar $VACH$ diódy.

K bodu 6:

Zapojte diódu do obvodu podľa obr. 3.5. Zvoľte ochranný predradný rezistor R_{PS} tak aby platilo

$$R_{PS} \geq \frac{U_{Ia} - 0,7V}{I_{FSM}}$$

kde U_{Ia} je amplitúda vstupného napätia a I_{FSM} maximálny dovolený neopakovateľný nárazový prúd v priepustnom smere. Na napájanie použite funkčný generátor - sínusový priebeh.



Obr. 3.5. Schéma zapojenia na meranie jednoduchého jednocestného usmerňovača a zobrazenie signálov na výstupe.

- Jednocestný usmerňovač môžeme realizovať prepnutím osciloskopu do režimu s časovou základňou (z obr. 3.4 na obr. 3.5). Prvý kanál zobrazuje striedavé napätie U_I generátora na vstupe, druhý kanál pulzné alebo usmernené napätie U_O na zaťažovacom rezistore R_L na výstupe.
- Pozorujte a popíšte časové priebehy napätia na vstupe a výstupe jednoduchého jednocestného usmerňovača pre nízke frekvencie $f = 50Hz$, pre vysoké frekvencie (deformovaný priebeh, komutácia diódy), pri pripojenom filtračnom kondenzátore pre nízke i vysoké frekvencie.
- Z osciloskopu odčítajte veľkosti amplitúd potrebných na určenie **faktora filtrácie** $r = \frac{U_Z}{U_{DC}}$, kde U_Z je zvlnenie výstupného napätia a U_{DC} je stredná hodnota usmerneného napätia na výstupe (obr. 3.5). Postup opakujte aspoň pre dva veľkosti vyhladzovacieho kondenzátora. Faktor filtrácie r , resp. činiteľ zvlnenia sa často vyjadruje v % $r = \frac{U_Z}{U_{DC}} \cdot 100$. !!!! Vplyv na r má veľkosť f, C, R_L .

K bodu 7:

Pre analýzu v striedavých obvodoch pri dodržaní podmienky malých amplitúd signálu možno linearizovať charakteristiku diódy a nahradiť diódu v danom js pracovnom bode dvojpólom zloženým z ideálnej diódy, jednosmerného napät'ového zdroja s prahovým napätím U_P a dynamickým odporom diódy v pracovnom bode r_d (pozri náhradnú schému diódy str.83 skriptá). Postup riešenia tohto typu príkladu je uvedený v skriptách na str. 93-97.

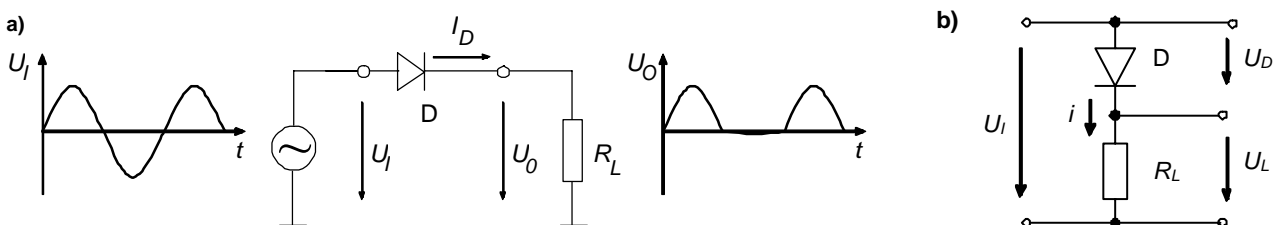
Teória

Reálne diódy - tvar *VACH* charakteristík je ovplyvnený nasledujúcimi javmi:

1. **Rekombináciou/generáciou nosičov náboja** v oblasti priestorového náboja (OPN) *pn* priechodu, čo sa prejaví hlavne zvýšením záverného prúdu. **Saturačný prúd** možno vyjadriť vzťahom
$$I_s = Aq \left(\frac{L_n}{\tau_n} n_{0p} + \frac{L_p}{\tau_p} p_{0n} \right)$$
, kde *A* je plocha priechodu, *L_n*, *L_p* sú difúzne dĺžky elektrónov a dier, *τ_n*, *τ_p* príslušné časy života minoritných elektrónov a dier a *n_{0p}*, *p_{0n}* minoritné rovnovážne koncentrácie elektrónov a dier v *p* a *n* oblasti.
2. **Sériový odpor** *R_s* (odpor kontaktov, prívodov, oblastí *n* a *p*) znižuje efektívne napätie na *pn* priechode, čoho následkom je nižší prúd tečúci diódou.
3. **Silná injekcia** sa objavuje pri takých priepustných napätiach, kedy počet injektovaných nosičov začína byť porovnateľný s koncentráciou majoritných nosičov náboja a spád potenciálu sa rozširuje aj neutrálne oblasti. Prúd od tohto momentu začína sledovať závislosť $\sim \exp(qU/2kT)$
4. **Prieraz** *pn* priechodu. Prúd záverne polarizovaného *pn* priechodu prudko narastá so zvyšujúcim sa napätím. Bežne dochádza k dvom typom nedeštruktívneho prierazu. V prípade **lavínového prierazu** dochádza k ionizácii kryštálu nosičmi náboja, ktoré získavajú energiu potrebnú na prieraz v silnom elektrickom poli. Pri **tunelovom (Zenerovom) prieraze** sa nosiče dostávajú do vodivostného pásu tunelovaním cez bariéru. Kým teplotný koeficient prierazného napätia pri lavínovom prieraze je kladný (strata energie na tepelných kmitoch), pri Zenerovom prieraze je záporný (zužuje sa zakázaný pás). Ak dôjde k deštrukcii – hovoríme o **tepelnom prieraze**.
5. *pn* priechod sa vyznačuje **vlastnou kapacitou**, ktorá má dve zložky. Prvou je kapacita spojená s existenciou OPN (OPN predstavuje dielektrikum/izolant), a teda reálne sa prejavuje v záverne ale i v priepustne polarizovanom priechode. Prakticky sa využíva len v záverne polarizovanej dióde a v prvom priblížení sa interpretuje doskovým kondenzátorom s hrúbkou dielektrika zhodnou so šírkou OPN. Druhou zložkou je **difúzna** kapacita, ktorá sa objavuje len v prípade priepustne polarizovaného priechodu. Jej existencia je podmienená difúziou náboja a konečnou veľkosťou času života minoritných nosičov náboja.

Jednocestný usmerňovač

Usmerňovače sú elektronické zariadenia (systémy), ktoré usmerňujú striedavé napätie na jednosmerné. Usmerňovače sú používané najmä v napájacích zdrojoch pre elektroniku, v regulovaných pohonoch, v energetike, pri elektrolýze hliníka a podobne.



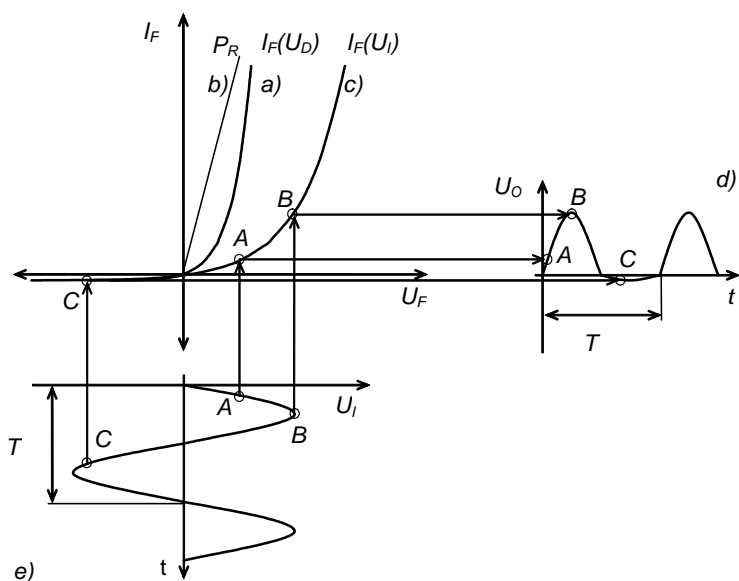
Obr. 3.6. Schéma zapojenia jednocestného diódového usmerňovača a časové priebehy vstupného striedavého napätia U_I , a výstupného pulzujúceho napätia U_O .

Jednocestný usmerňovač pozostáva z jednej diódy zapojenej v sérii so zdrojom striedavého napätia U_I a zaťažovacím odporom R_L . Na vstup usmerňovača je pripojený zdroj striedavého napätia U_I . Na výstupe usmerňovača je pripojená odporová záťaž R_L .

Princíp činnosti tohto usmerňovača spočíva v orezávaní záporných polvln vstupného napätia. Pretože usmerňujúca dióda je zapojená v sérii so zaťažujúcim odporom, obvod si možno predstaviť ako

napät'ový delič (obr. 3.6b). Pri kladnej polarizácii vstupného napätia U_I je dióda D polarizovaná priepustne a vzniká na nej malý úbytok napätia. Pre kremíkové pn diódy je to približne 0,7 V. Prúd diódou $I_D = I_F$ je veľký, je daný odporom záťaže R_L a preto podľa Ohmovho zákona vyvoláva veľký úbytok napätia na odpore záťaže R_L . Z jednoduchej úvahy o napät'ovom deliči je vstupné napätie U_I rovné súčtu napätí na dióde U_D a na záťaži U_O . Výstupné napätie je $U_O \approx U_I - 0,7V$. Pri opačnej polarizácii je dióda polarizovaná záverne, takže prúd $I_D = I_R$ je malý, je daný zvyškovým prúdom diódy. Malý prúd cez zaťažovací odpor R_L , podľa Ohmovho zákona, vyvolá malý úbytok záverného napätia U_O , takže takmer celý úbytok napätia U_I zostane na záverne polarizovanej dióde D . Výstupné napätie je takmer nulové.

Výstupné napätie je jednosmerné pulzujúce napätie, ktorého špičková hodnota je menšia oproti špičkovej hodnote vstupného napätia o úbytok napätia na dióde D (cca 0,7V). Možno ho skonštruovať grafickou metódou pomocou voltampérovej charakteristiky diódy a zaťažovacieho odporu obr. 3.7.



Obr. 3.7. Určenie časového priebehu prúdu diódou z VACH diódy.
a) exponenciálna VACH diódy,
b) lineárna VACH zaťažovacieho odporu
c) závislosť prúdu od vstupného napätia,
d) časový priebeh vstupného napätia
e) časový priebeh výstupného napätia.

Priebeh výstupného napätia môžete získať transformáciou vstupného napätia cez krivku **c)** tak, ako naznačujú body A, B a C.

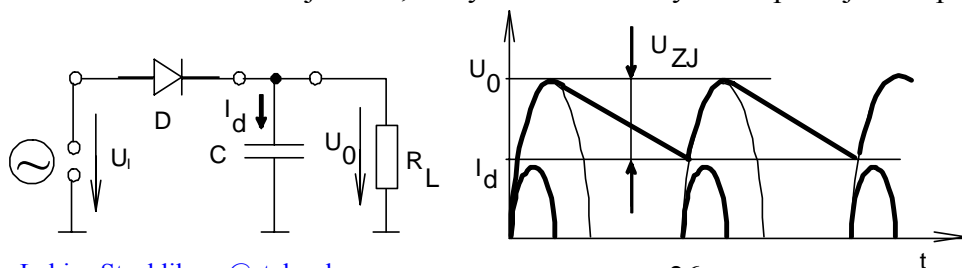
Poznámka: Z praktického hľadiska je dôležité si uvedomiť, že **stredná hodnota výstupného napätia** (t.j. meraná jednosmerným voltmetrom- predstavuje rovnaké chemické účinky jednosmerného prúdu) je pre jednocestný usmerňovač $\bar{U}_O = \frac{U_{Oa}}{\pi}$, kde U_{Oa} je amplitúda výstupného napätia

$U_{Oa} = U_{Ia} - 0,7V$. Záverné napätie na dióde, špičkové je $U_{Da} = U_{Ia}$

Toto napätie je dôležitým údajom pre správnu voľbu typu diódy pri návrhu obvodu. Musí totiž platiť, že najväčšie možné napätie, aké v obvode bude privedené na diódu (U_{Da}) bude menšie než maximálne dovolené opakované záverné napätie diódy U_{RRM} udávané výrobcom $U_{Da} < U_{RRM}$.

Filtrácia pulzujúceho napätia

Jednosmerné pulzujúce napätia získané z usmerňovačov zväčša nie sú použiteľné priamo. Za usmerňovač sa zaraďuje filter, ktorý má za úlohu vyhladiť pulzujúce napätie na jednosmerné zvlnené



Obr. 3.8. Schéma zapojenia filtračného kondenzátora za jednocestný usmerňovač

napätie. Filtrácia je tým efektívnejšia, čím menšie je zvlnenie výstupného napätia. Ako filter sa používa kondenzátor väčšej kapacity pripojený medzi výstup usmerňovača a zem. Filtračný kondenzátor je teda pripojený paralelne k záťaži.

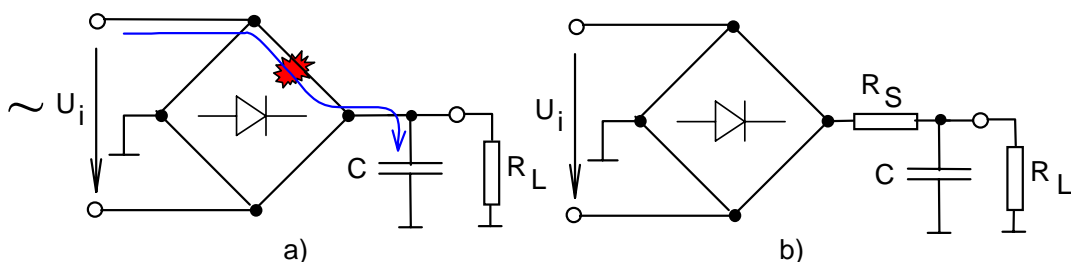
Princíp filtrácie spočíva v dobíjaní filtračného kondenzátora cez usmerňovacie diódy ak je napätie zdroja väčšie ako napätie na kondenzátore a následnom vybíjaní kondenzátora cez záťaž, ak napätie zdroja poklesne pod napätie kondenzátora. Podrobnejšie si činnosť filtra vysvetlíme na filtri zapojenom za jednoduchým jednocestným usmerňovačom (obr.3.8). Dióda D sa otvára, ak napätie zdroja u je väčšie o úbytok napätia na dióde D v priepustnom smere ($0,7V$) oproti napätiu na kondenzátore, teda aj na výstupe U_O . Cez otvorenú diódu tečie prúd I_D , ktorý sa rozdeľuje na prúd do kondenzátora I_C a prúd do záťaže I_L . $I_D = I_C + I_L$. Dominantným je prúd do kondenzátora, kondenzátor sa dobíja. Po poklese okamžitej hodnoty napätia zdroja U_I pod hodnotu napätia na kondenzátore plus $0,7V$ sa dióda uzatvára a prúd diódy sa redukuje na zanedbateľný zvyškový prúd diódy v závernom smere. Prúd kondenzátorom mení orientáciu a začína tečť do záťaže $I_C = I_L$ pretože I_D je nulové. Kondenzátor sa vybíja cez záťaž R_L .

Výstupné napätie je jednosmerné zvlnené napätie. Za účelom hodnotenie efektívnosti filtrovania zavádzame **faktor filtrácie** $r = \frac{U_Z}{U_{DC}}$, kde U_Z je zvlnenie výstupného napätia a U_{DC} je hodnota

usmerneného napätia na výstupe. Zvlnenie výstupného napätia U_Z je menšie a teda aj filtrácia účinnejšia ak je súčin kapacity kondenzátora C a odporu záťaže R_L väčší. Rovnako je napätie zvlnenia menšie pri použití dvojcestných usmerňovačov. Samotná hodnota napätia zvlnenia U_Z je daná rýchlosťou vybíjania kondenzátora C cez záťaž R_L . Rýchlosť vybíjania je daná časovou konštantou $\tau = R_L C$. Rýchlosť vybíjania je daná časovou konštantou $\tau = R_L C$.

Pre $r < 0,1$ platí $U_Z \approx \left(\frac{1}{fR_L C}\right)U_{Ia}$. Výstupné usmernené napätie potom bude $U_{DS} \approx \left(1 - \frac{1}{2fR_L C}\right)U_{Ia}$.

Zapínací nárazový prúd. Pri zapínaní zdroja môže dôjsť k situácii, že zdroj je pripojený na usmerňovač v momente veľkého okamžitého napätia. Pripojenie plného napätia predstavuje rýchlu zmenu napätia na kondenzátore veľkej kapacity. Kondenzátor veľkej kapacity predstavuje pre rýchle zmeny napätia skrat a v okamihu pripojenia napätia je nabíjací prúd obmedzovaný len vnútorným odporom diódy D . Vzniká veľký nárazový prúd. Ak je má dióda malý vnútorný odpor a malý dovolený neopakovaný prúd v priepustnom smere I_{FSM} , môže dôjsť k poškodeniu diódy. Preto sa pred filtračný kondenzátor vkladá odpor obmedzujúci nárazový prúd (obr.3.9) Pre dvojcestný mostíkový usmerňovač sa odpor volí s ohľadom na $R_S \geq \frac{U_{Ia} - 1,4V}{I_{FSM}}$, kde U_{Iasec} je špičkové napätie na vstupe usmerňovača.



Obr. 3.9. a) Naznačenie nárazového prúdu pri zopnutí zdroja s vyznačením možného poškodenia usmerňovacej diódy pri jej nesprávnej dimenzácii. b) Ochranný predradný odpor obmedzujúci nárazový zapínací prúd cez diódy.