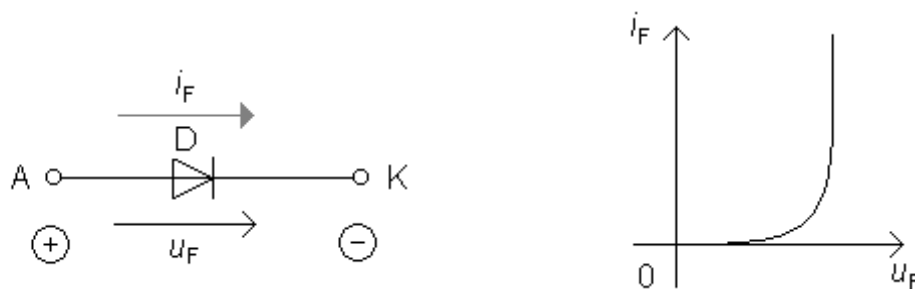


## 9 DIÓDY A USMERŇOVAČE

### 9 VŠEOBECNÁ ČASŤ

**Dióda** – polovodičový nelineárny prvok (dvojpól, jednobrána) s jedným priechodom PN, ktorý má tú vlastnosť, že v jednom smere prepúšťa prúd (priechod PN je vodivý, čiže otvorený) a v opačnom smere je takmer nevodivý (je uzavretý). Polovodičové diódy pri svojej činnosti využívajú práve túto jednosmernú elektrickú vodivosť priechodu PN. Často sa tento jav označuje ventilový jav, a preto sa diódy niekedy nazývajú ventily. Ich vnútornú štruktúru tvorí teda jeden PN priechod vyznačujúci sa tým, že za istých okolností sa správa buď ako izolant alebo ako dobrý vodič. Závisí to od polarity priloženého napätia medzi anódou a katódou polovodičovej diódy. Dióda je základným stavebným prvkom usmerňovacej techniky.

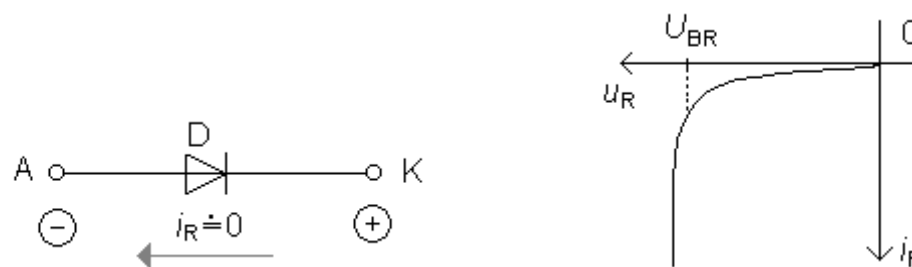
Princíp činnosti polovodičovej diódy – ak na anódu (A) diódy priložíme kladné napätie (+) a na jej katódu (K) záporné napätie (–), dióda sa nachádza vo vodivom stave (v priepustnom, priamom smere), prechádza ňou priepustný prúd  $i_F$ , pričom na nej vzniká úbytok napätia  $u_F$ , tzv. priepustné napätie (ideálna dióda má  $u_F = 0$ , skutočná dióda má  $u_F = 0,7$  až  $2$  V). Na obr. 9.1 je VA (statická) charakteristika polovodičovej diódy v priepustnom smere.



Obr. 9.1 Polovodičová dióda polarizovaná priepustne

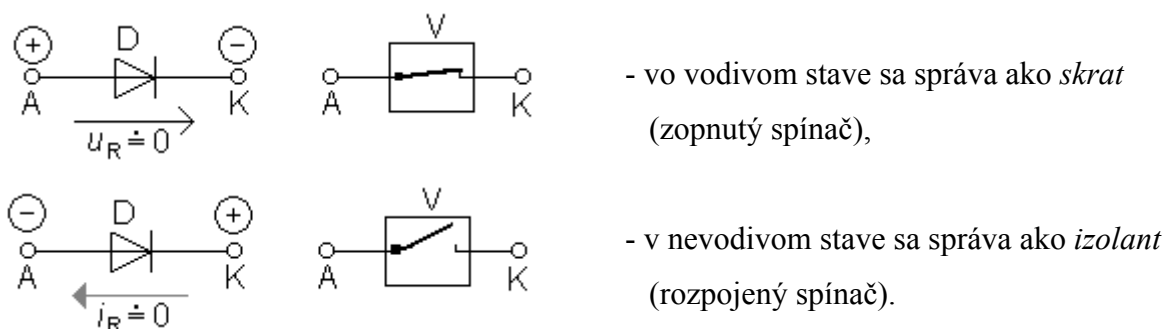
Pri obrátenej polarite napätia prechádza diódou záverný prúd  $i_R$  a vzniká na nej úbytok napätia – záverné napätie  $u_R$  (ideálna dióda má  $i_R = 0$ , skutočná dióda má  $i_R =$  jednotky až stovky  $\mu A$ ). Napätie  $U_{(BR)}$  sa nazýva prierazné záverné napätie. Túto hodnotu napätia (stovky V až niekoľko kV) nesmieme prekročiť. Inak príde k prierazu a poškodeniu diódy a následnému prudkému nárastu záverného prúdu. Na obr. 9.2 je VA (statická) charakteristika polovodičovej diódy v závernom smere.

Pri bežných kremíkových diódach pomer medzi priepustným a záverným prúdom ( $i_F/i_R$ ) býva približne  $10^4$  až  $10^6$ . V praxi obyčajne zanedbávame úbytok napätia na dióde



Obr. 9.2 Polovodičová dióda polarizovaná záverne

v priepustnom smere ( $u_F = 0$ ) a záverný prúd diódy v nepriepustnom smere ( $i_R = 0$ ). Z uvedenej teórie vyplýva správanie sa diódy vo vodivom a nevodivom (závernom) stave



### Rozdelenie diód:

1. Podľa materiálu, z ktorého sú zhotovené:
  - kremíkové (Si) – pomalé, tepl. nezávislé
  - germániové (Ge) – rýchle, tepl. závislé
  - gáliumarzenidové (GaAs) – LED
  - a gáliumfosfidové (GaP)
2. Podľa získania prechodu PN:
  - hrotové – bezkapacitné (vhodné pre impulznú techniku),
  - plošné – vysokokapacitné (nevhodné pre vf tech.).
3. Podľa použitia:
  - usmerňovacie – pre usmerňovanie striedavých prúdov,
  - spínacie – v impulzných a spínacích obvodoch,
  - detekčné – v demodulátoroch oddeľujú nf signál od vf signálu,
  - kapacitné – v ladiacich obvodoch sa nastavujú = napätím,
  - stabilizačné – na stabilizáciu jednosmerného napätia (Zenerova dióda),
  - Schottkyho (tunelové) – pre oscilátory a klopné obvody,
  - fotodiódy – pre optické snímače a luxmetre bez zdroja prúdu.

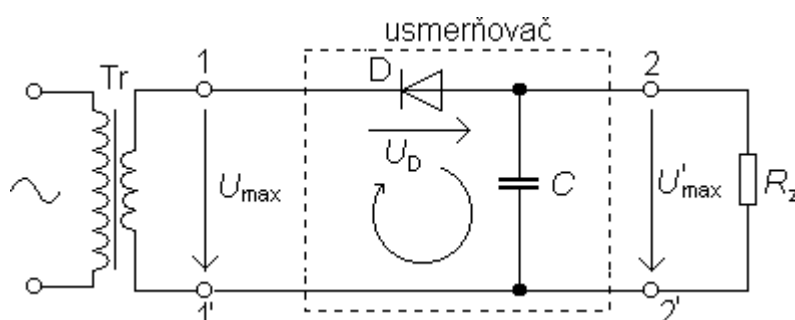
**Usmerňovač** – je statický (pre svoju činnosť nepotrebuje mechanicky pohybujúce sa časti) menič elektrickej energie, ktorý mení striedavé napätie na jednosmerné.

Rozdelenie usmerňovačov:

1. Podľa toho, či regulujú alebo neregulujú strednú hodnotu usmerného výstupného napätia
  - neriadené (ich výstupné napätie je stále),
  - riadené (ich výstupné napätie možno regulovať v širokom rozsahu s minimálnymi stratami).
2. Podľa zapojenia
  - jednoimpulzové – uzlové,
  - dvojimpulzové – mostíkové.
3. Podľa počtu usmerných impulzov počas jednej periódy
  - jednoimpulzové – vedú prúd len za čas jednej polperiódy vstupného signálu,
  - dvojimpulzové – vedú prúd pri oboch polperiódach na vstupe,
  - trojimpulzové – pre napájanie js motora ( $U$  a  $I$  sú menej zvlnené),
  - šesťimpulzové – na premenu počtu fáz a napájanie js motora.

Predstavme si usmerňovač podľa obr. 9.3 . Pre slučku na jednosmernej strane platí podľa Kirchhoffovho zákona, že súčet napätí na dióde  $U_D$  a na kondenzátore (alebo odpore  $R_z$  – to je to isté napätie, lebo  $R_z$  a  $C$  sú zapojené paralelne)  $U'_{\max}$  sa rovná napätiu  $U_{\max}$ , čiže

$$U_{\max} = U'_{\max} + U_D \quad (9.1)$$



Obr. 9.3 Usmerňovač s vyhladzovacím kondenzátorom s kapacitou  $C$

Stredná hodnota výstupného napätia pri jednoimpulzovom usmerňovači bude

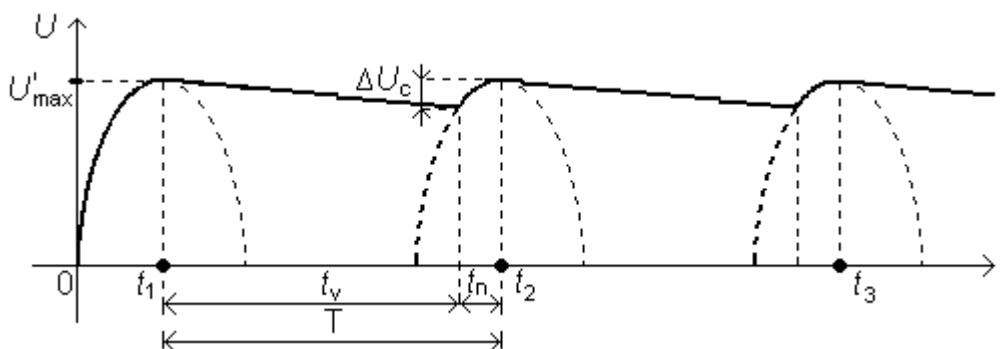
$$U_{\text{str}} = U_{\text{ds}} = \frac{1}{T} \cdot \int_0^T U_d \cdot dt = \frac{1}{2\pi} \cdot \int_0^\pi U_{\max} \sin \alpha \cdot d\alpha = \frac{U_{\max}}{\pi} = \frac{\sqrt{2} U_{\text{ef}}}{\pi} = 0,45 U_{\text{ef}}.$$

Výstupné napätie je 0,45-násobok efektívnej hodnoty vstupného napätia. (Pri dvojimpulzovom jednofázovom usmerňovači je stredná hodnota výstupného napätia

dvojnásobná ako pri jednoimpulzovom zapojení:  $U_{ds} = 0,9 U_{ef}$ . Pri trojimpulzovom trojfázovom usmerňovači je  $U_{ds} = 1,17 U_{ef}$  a pri šesťimpulzovom trojfázovom usmerňovači je  $U_{ds} = 1,35 U_{ef}$ .)

Efektívna hodnota striedavého napätia na sekundárnom vinutí je

$$U_{ef} = \frac{U_{\max}}{\sqrt{2}} = \frac{U_{\max}}{1,41}.$$



Obr. 9.4 Priebeh na výstupe usmerňovača s kondenzátorom  $C$

V čase  $t_1, t_2, t_3, \dots$  je na kondenzátore s kapacitou  $C$  (a teda na výstupe usmerňovača) jednosmerné napätie  $U'_{\max}$ . Kapacita kondenzátora  $C$  sa z tejto hodnoty napätia vybíja, ako vidíme z obr. 9.4 za čas  $t_v$ , pre ktorý platí

$$t_v \doteq \frac{1}{f}, \quad (9.2)$$

kde  $t_v$  je čas vybíjania kondenzátora,  $t_n$  je čas nabíjania kondenzátora. Presne platí

$$T = 1/f,$$

ale nedopúšťame sa veľkej chyby, pretože  $t_v \doteq 10 \cdot t_n$ . (Vzhľadom na veľké tolerancie elektrolytických filtračných kondenzátorov môžeme pripustiť takúto chybu.) Za čas  $t_v$  je teda dióda pólovaná v nepripustnom smere a kondenzátor s kapacitou  $C$  sa vybíja prúdom

$$I_{js} = \frac{U'_{\max}}{R_z}. \quad (9.3)$$

Hodnotu elektrickej kapacity kondenzátora určíme takto

$$C \cdot \Delta U_c = Q, \quad \text{ale} \quad Q = I_{js} \cdot t_v, \quad \text{čiže} \quad C \cdot \Delta U_c = I_{js} \cdot t_v \quad \text{a teda}$$

$$C = \frac{I_{js} \cdot t_v}{\Delta U_c}, \quad (9.4)$$

kde  $\Delta U_c$  je pokles napätia na kondenzátore.

Pre činiteľ zvlnenia platí

$$\Phi_v = \frac{U_{zvl\ ef}}{U'_{\max}}. \quad (9.5)$$

Predpokladáme, že na jednosmerné napätie je superponované sínusové zvlnenie. Dopúšťame sa tým chyby, ale vzhľadom na už spomínané veľké tolerancie elektrolytických kondenzátorov si ju môžeme dovoliť.

Pre efektívnu hodnotu zvlnenia platí

$$U_{zvl\ ef} = \frac{\Delta U_c}{2 \cdot \sqrt{2}}. \quad (9.6)$$

Čas potrebný na znovunabitie kapacity  $C$  na hodnotu  $U'_{\max}$  je približne desaťkrát menší ako čas vybíjania, teda sa musí nabíjať desaťkrát väčším prúdom, ako sa vybíja. Pre percentuálny pokles napätia pri záťaži  $R_z$  potom platí

$$\Delta U'_{\max} \doteq \frac{10 \cdot R_{tr}}{R_z}, \quad \text{alebo} \quad \Delta U'_{\max} \doteq \frac{10 \cdot R_{tr}}{R_z} \cdot 100, \quad (9.7)$$

kde  $R_{tr}$  je odpor sekundárneho vinutia transformátora.

## 9.2 RIEŠENÉ PRÍKLADY

**Príklad 9.2.1.** Určte maximálnu a strednú hodnotu usmerneneného napätia na jednoimpulznom kremíkovom usmerňovači, ak je pripojený na striedavé napätie  $U_{ef} = 5\text{ V}$ .

*Riešenie:* Napätie na vstupe usmerňovača je

$$U_{\max} = \sqrt{2} \cdot U_{ef} = 1,41 \cdot 5\text{ V} \doteq 7\text{ V}.$$

Úbytok napätia na kremíkovej dióde  $U_D$  môžeme predpokladať  $0,7\text{ V}$ . Podľa (9.1)

$$U_{\max} = U'_{\max} + U_D \Rightarrow U'_{\max} = U_{\max} - U_D = 7\text{ V} - 0,7\text{ V} = 6,3\text{ V},$$

$$U_{str} = \frac{2}{\pi} \cdot U'_{\max} = 0,637 \cdot 6,3\text{ V} \doteq 4\text{ V}.$$

**Príklad 9.2.2.** Navrhните jednoimpulzný usmerňovač s vyhladzovacím kondenzátorom tak, aby dával jednosmerné napätie  $9\text{ V}$  pri prúde  $I_{js} = 20\text{ mA}$ . Zvlnenie nech nepresahuje hodnotu  $\Delta U_c = 0,5\text{ V}$ . Vypočítajte, o koľko poklesne napätie pri odbere  $20\text{ mA}$  oproti napätiu naprázdno ak odpor sekundárneho vinutia transformátora je  $R_{tr} = 1\ \Omega$ .

*Riešenie:* Usmerňovač zapojíme podľa obr. 9.3. Podľa vzťahu (9.1)

$$U_{\max} = U'_{\max} + U_D = 9\text{ V} + 0,7\text{ V} = 9,7\text{ V},$$

$$U_{ef} = \frac{U_{\max}}{\sqrt{2}} = \frac{9,7\text{ V}}{1,41} \doteq 6,9\text{ V}.$$

Kondenzátor sa vybíja z hodnoty  $U'_{\max}$  za čas  $t_v$

$$t_v \doteq \frac{1}{f} = \frac{1}{50 \text{ s}^{-1}} = 0,02 \text{ s} = 20 \text{ ms},$$

prúdom 20 mA (to vtedy, keď je dióda pólovaná v nepriepustnom smere a tento prúd musí dodávať kondenzátor). Veľkosť kondenzátora určíme pomocou vzťahu (9.4), teda

$$C = \frac{I_{js} \cdot t_v}{\Delta U_c} = \frac{20 \cdot 10^{-3} \text{ A} \cdot 20 \cdot 10^{-3} \text{ s}}{0,5 \text{ V}} = \frac{0,0004 \text{ A s}}{0,5 \text{ V}} = 0,0008 \text{ F} = 0,8 \text{ mF} = 800 \mu\text{F}.$$

Volíme kondenzátor  $C = 1\,000 \mu\text{F} = 1 \text{ mF}$ .

$U_{zvl\text{ef}}$  je podľa vzťahu (9.6)

$$U_{zvl\text{ef}} = \frac{\Delta U_c}{2 \cdot \sqrt{2}} = \frac{0,5 \text{ V}}{2 \cdot 1,41} \doteq 0,177 \text{ V}.$$

Činiteľ zvlnenia  $\Phi_v$  vypočítame podľa vzťahu (9.5)

$$\Phi_v = \frac{U_{zvl\text{ef}}}{U'_{\max}} = \frac{0,177 \text{ V}}{9 \text{ V}} \doteq 0,0197, \quad \text{alebo v \%:} \quad 1,97 \%.$$

Rezistor  $R_z$  vypočítame z Ohmovho zákona

$$R_z = \frac{U'_{\max}}{I_{js}} = \frac{9 \text{ V}}{0,02 \text{ A}} = 450 \Omega.$$

Percentuálny pokles napätia pri zaťažení určíme po dosadení do vzťahu (9.7)

$$\Delta U'_{\max} \doteq \frac{10 \cdot R_{tr}}{R_z} \cdot 100 = \frac{10 \cdot 1 \Omega}{450 \Omega} \cdot 100 \doteq 2,2 \%.$$

**Príklad 9.2.3.** Navrhnete mostíkový usmerňovač zapojený podľa obr. 9.5a, aby sme z neho mohli odoberať prúd  $I_{js} = 100 \text{ mA}$  pri napätí  $U'_{\max} = 40 \text{ V}$ , ktoré má zvlnenie 2 %. Napätie  $U'_{\max} = 40 \text{ V}$  pri prúde  $I_{js} = 100 \text{ mA}$  nesmie poklesnúť oproti hodnote naprázdno o viac ako 1 %.

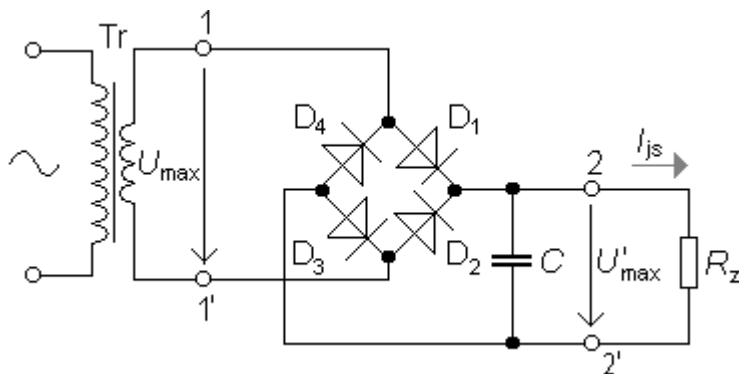
*Riešenie:* V mostíkovom zapojení sú dve diódy súčasne vodivé a dve nevodivé, vzťah (9.1) budeme teda musieť trochu pozmeniť:

$$U_{\max} = U'_{\max} + 2 \cdot U_D = 40 \text{ V} + 2 \cdot 0,7 \text{ V} = 40 \text{ V} + 1,4 \text{ V} = 41,4 \text{ V},$$

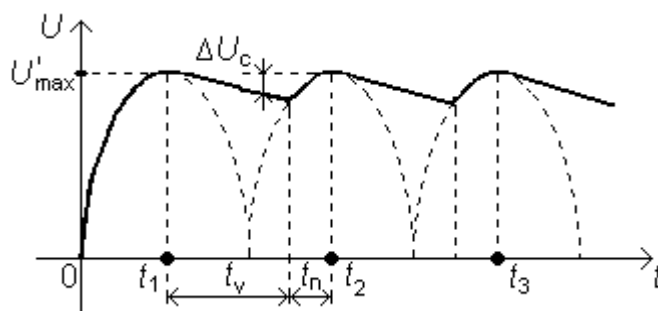
kde  $2 \cdot U_D$  je úbytok na dvoch vodivých diódach

$$U_{\text{ef}} = \frac{U_{\max}}{\sqrt{2}} = \frac{41,4 \text{ V}}{1,41} = 29,3 \text{ V} \doteq 30 \text{ V}.$$

Na sekundárnej strane transformátora musí byť  $U_{\text{ef}} = 30 \text{ V}$ . Jednosmerné napätie  $U'_{\max}$  môže mať zvlnenie 2 %, čo pri 40 V robí 0,8 V. Pokles napätia na kondenzátore  $\Delta U_c$  podľa (9.6) je



Obr. 9.5a



Obr. 9.5b

$$U_{\text{zvleť}} = \frac{\Delta U_c}{2 \cdot \sqrt{2}} \Rightarrow \Delta U_c = 2 \cdot \sqrt{2} \cdot U_{\text{zvleť}} = 2 \cdot 1,41 \cdot 0,8 \text{ V} = 2,25 \text{ V}.$$

Čas  $t_v$ , za ktorý sa pri dvojimpulznom usmerňovači vybíja kapacita kondenzátora  $C$ , je polovičný ako pri jednoimpulznom usmerňovači (porovnaj obr. 9.4 a 9.5):

$$t_v = \frac{1}{f} = \frac{1}{100 \text{ s}^{-1}} = 10 \text{ ms}.$$

Veľkosť kapacity kondenzátora môžeme vypočítať zo vzťahu (9.4)

$$C = \frac{I_{\text{js}} \cdot t_v}{\Delta U_c} = \frac{100 \cdot 10^{-3} \text{ A} \cdot 10 \cdot 10^{-3} \text{ s}}{2,25 \text{ V}} = \frac{0,001 \text{ A s}}{2,25 \text{ V}} = 444,44 \cdot 10^{-6} \text{ F} \doteq 450 \text{ } \mu\text{F}.$$

Volíme najbližšiu vyššiu vyrábanú hodnotu  $500 \text{ } \mu\text{F}$ .

Zaťažovací odpor  $R_z$  vypočítame z Ohmovho zákona

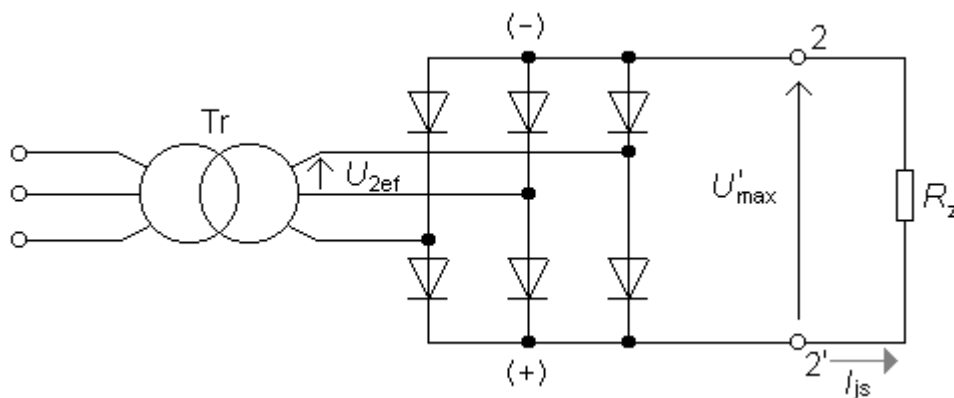
$$R_z = \frac{U'_{\text{max}}}{I_{\text{js}}} = \frac{40 \text{ V}}{0,1 \text{ A}} = 400 \text{ } \Omega.$$

Napätie  $U'_{\text{max}}$  môže pri zaťažení poklesnúť o 1 % (0,01) čiže zo vzťahu (9.7)

$$\Delta U'_{\text{max}} \doteq \frac{10 \cdot R_{\text{tr}}}{R_z} \Rightarrow R_{\text{tr}} = \frac{\Delta U'_{\text{max}} \cdot R_z}{10} = \frac{0,01 \cdot 400 \text{ } \Omega}{10} = 0,4 \text{ } \Omega.$$

Sekundárne vinutie transformátora nesmie mať väčší odpor ako  $R_{\text{tr}} = 0,4 \text{ } \Omega$ .

**Príklad 9.2.4.** Akým striedavým združeným napätím  $U_2$  musíme napájať trojfázový mostík z obr. 9.6, ak máme na jednosmernej strane dostať usmernené napätie  $U_{js} = U'_{\max} = 220 \text{ V}$  a prúd  $I_{js} = 50 \text{ A}$ ? Zaťaženie je prevažne odporové. Akým spôsobom navrhnete diódy? Stačí sa uspokojiť len s približným riešením, kedy zanedbáme rozptylovú reaktanciu vinutia transformátora a odpor diód budeme rešpektovať len približne tým, že do výpočtu zavedieme stredný úbytok napätia  $U_D = 1,1 \text{ V}$  v priepustnom smere pre jednu diódu.



Obr. 9.6

*Riešenie:* Vychádzame zo známeho vzťahu

$$U_{\max} = U'_{\max} + 2 \cdot U_D = 220 \text{ V} + 2 \cdot 1,1 \text{ V} = 222,2 \text{ V}.$$

Striedavé združené napätie pre napájanie trojfázového mostíka

$$U_{2ef} = \frac{\pi}{3} \cdot \frac{U_{\max}}{\sqrt{2}} = \frac{\pi}{3} \cdot \frac{U'_{\max} + 2 \cdot U_D}{\sqrt{2}} = \frac{\pi}{3} \cdot \frac{222,2 \text{ V}}{\sqrt{2}} = 164,53 \text{ V} \doteq 165 \text{ V}.$$

Stredný priepustný prúd jednej diódy

$$I_d = \frac{I_{js}}{3} = \frac{50 \text{ A}}{3} \doteq 16,7 \text{ A}.$$

Najvyššie záverné napätie

$$U_{i \max} = \frac{\pi}{3} \cdot U_{js} = \frac{\pi}{3} \cdot 220 \text{ V} = 230,3 \text{ V} \doteq 230 \text{ V}.$$

Volíme šesť kremíkových diód na prúd  $I_d = 20 \text{ A}$  (napr. KY 718) s príslušnou chladiacou plochou. Medzná hodnota záverného napätia týchto diód je 270 V, teda dostačujúca.

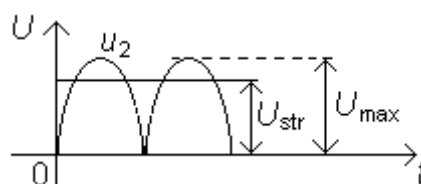
**Príklad 9.2.5.** Žeriavový asynchrónny motor je brzdený jednosmerným prúdom  $I_{js} = 15 \text{ A}$  privádzaným do statora. Činný odpor statorového vinutia je  $R_1 = 1,67 \Omega$ . Pomerná doba brzdenia (zaťažovateľ)  $\varepsilon = 5 \%$ . Určte sekundárne napätie  $U_2$  transformátora a diódy.



*Riešenie:* Zvolíme jednofázový mostík. Predpokladáme pomerne veľkú indukčnosť na jednosmernej strane a zanedbáme rozptylové indukčnosti transformátora, takže počítame s obdĺžnikovými priebehmi usmerneného prúdu i prúdu transformátora. Úbytok napätia jednej diódy je  $U_D = 1,1 \text{ V}$ . Môžeme si predstaviť, že statorové vinutie motora je napájané zo zdroja, ktorý dáva napätie znázornené na obr. 9.7.

$$U_{\max} = U_2 \cdot \sqrt{2},$$

$$U_{\text{str}} = \frac{2}{\pi} \cdot U_{\max} = \frac{2}{\pi} \cdot U_2 \cdot \sqrt{2}.$$



Obr. 9.7

Toto napätie sa skladá z jednosmernej zložky  $U_{js}$  a zo striedavých zložiek, ktoré však vzhľadom k veľkej indukčnosti v obvode nevyvolávajú žiadne prúdy.

Potrebné jednosmerné napätie

$$U_{js} = R_1 \cdot I_{js} = 1,67 \, \Omega \cdot 15 \text{ A} = 25,05 \text{ V} \doteq 25 \text{ V},$$

$$U_{js} = U'_{\max}.$$

Stredná hodnota napätia je

$$U_{\text{str}} = \frac{2}{\pi} \cdot U_{\max}, \quad \text{kde } U_{\max} = \sqrt{2} \cdot U_2,$$

$$U_{\text{str}} = U'_{\max} + 2 \cdot U_D \Rightarrow U'_{\max} = U_{\text{str}} - 2 \cdot U_D = \frac{2}{\pi} \cdot U_{\max} - 2 \cdot U_D = \frac{2}{\pi} \cdot \sqrt{2} \cdot U_2 - 2 \cdot U_D.$$

Z posledného vzťahu si vyjadríme sekundárne napätie  $U_2$  transformátora

$$U_2 = \frac{(U'_{\max} + 2 \cdot U_D) \cdot \pi}{2 \cdot \sqrt{2}} = \frac{(25 \text{ V} + 2 \cdot 1,1 \text{ V}) \cdot \pi}{2 \cdot \sqrt{2}} \doteq 30,2 \text{ V}.$$

V jednofázovom mostíku vedie každá dióda priepustný prúd len po dobu jednej polovice periódy, takže diódy dimenzujeme na prúd

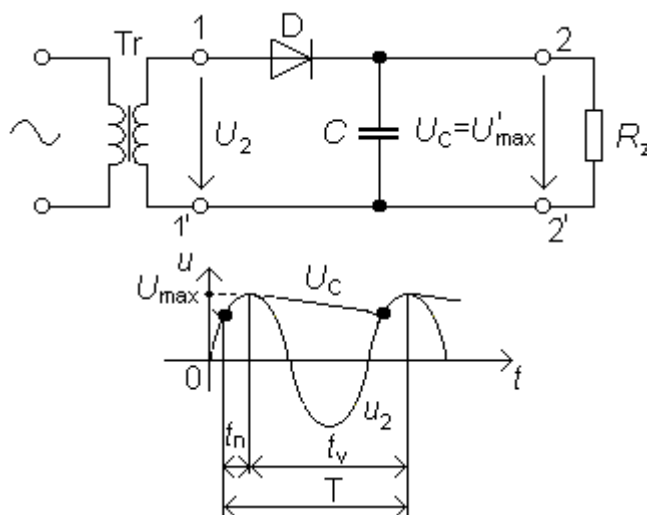
$$\frac{I_{js}}{2} = \frac{15 \text{ A}}{2} = 7,5 \text{ A}.$$

Najväčšie záverné napätie

$$U_{i \max} = U_2 \cdot \sqrt{2} = 30,2 \text{ V} \cdot \sqrt{2} \doteq 42,7 \text{ V}.$$

Použijeme diódy typu KY 710 na 10 A určené pre napätie  $U_2 = 60 \text{ V}$  s medznou hodnotou  $U_{i \max} = 180 \text{ V}$ . Pre malú tepelnú kapacitu polovodičových prvkov neberieme do úvahy zaťažovateľ. Zaťažovateľ by však ovplyvnil dimenzovanie sekundárneho vinutia transformátora.

**Príklad 9.2.6.** Na získanie jednosmerného napätia  $U_{js} = U'_{\max} = 100 \text{ V}$  na činnom odpore  $R_z = 30 \text{ k}\Omega$ , použijeme najjednoduchší jednofázový jednoimpulzový usmerňovač s jednou diódou D a s vyhladzovacím kondenzátorom s kapacitou  $C$  podľa obr. 9.8. Aké veľké musí byť sekundárne napätie  $U_2$  transformátora Tr a aká veľká musí byť kapacita  $C$  kondenzátora, ak má byť zvlnenie  $\Phi_v$  usmerného prúdu menšie ako 2 % (0,02). Frekvencia je 50 Hz. Úbytok napätia na dióde je  $U_D = 1,1 \text{ V}$ .



Obr. 9.8

*Riešenie:* V čase  $t_v$ , kedy sa kondenzátor vybíja do odporu  $R$ , nedodáva dióda D žiadny prúd, pretože napätie  $U_2$  je menšie než napätie  $U_C$  na kondenzátore. Pri vybíjaní kondenzátora s kapacitou  $C$  do odporu  $R$  klesá napätie  $U_C$  exponenciálne

$$U_C = U_{\max} \cdot e^{-\frac{t}{CR}}.$$

Ak je zvlnenie malé, môžeme exponenciálu nahradiť dotyčnicou

$$U_C = U_{\max} \cdot \left(1 - \frac{t}{CR}\right) \quad \text{pretože} \quad \frac{dU_C}{dt} = -\frac{U_{\max}}{CR} \cdot e^{-\frac{t}{CR}}.$$

Ďalej môžeme pri veľmi malom zvlnení uviesť

$$U_{\max} \doteq U_2 \cdot \sqrt{2}$$

a z toho pre  $U_C$  platí

$$U_C = U_2 \cdot \sqrt{2} \cdot \left(1 - \frac{t}{CR}\right).$$

Pri malom zvlnení môžeme napísať  $t_v = T = \frac{1}{f}$

a za strednú hodnotu usmerneného napätia  $U_{js} = U'_{\max}$  vziať hodnotu, ktorú má napätie  $U_C$  uprostred času vybíjania

$$U'_{\max} = U_C \quad \Rightarrow \quad U'_{\max} = U_2 \cdot \sqrt{2} \cdot \left(1 - \frac{\frac{T}{2}}{CR}\right) = U_2 \cdot \sqrt{2} \cdot \left(1 - \frac{1}{2CRf}\right).$$

Efektívna hodnota zvlnenia (striedavej zložky usmerneného napätia)

$$U_{zvl\ ef} = \frac{U_0}{2 \cdot \sqrt{3}} = \frac{U_2 \cdot \sqrt{2} \cdot \frac{T}{CR}}{2 \cdot \sqrt{3}} = U_2 \cdot \sqrt{2} \cdot \frac{1}{2 \cdot \sqrt{3} \cdot CRf},$$

kde  $U_0$  je strieda zvlnenia.

Zvlnenie (činiteľ zvlnenia)

$$\Phi_v = \frac{U_{zvl\ ef}}{U'_{\max}} = \frac{U_2 \cdot \sqrt{2} \cdot \frac{1}{2 \cdot \sqrt{3} \cdot CRf}}{U_2 \cdot \sqrt{2} \cdot \left(1 - \frac{1}{2CRf}\right)} = \frac{1}{\sqrt{3} \cdot (2CRf - 1)} \Rightarrow \sqrt{3} \cdot (2CRf - 1) \cdot \Phi_v = 1.$$

Z posledného vzťahu si vyjadríme kapacitu kondenzátora

$$C = \frac{1 + \sqrt{3} \cdot \Phi_v}{2 \cdot \sqrt{3} \cdot \Phi_v \cdot Rf} = \frac{1 + \sqrt{3} \cdot 0,02}{2 \cdot \sqrt{3} \cdot 0,02 \cdot 30\,000 \cdot 50} F = \frac{1,034\,64}{1,039\,23 \cdot 10^5} F = 9,95 \cdot 10^{-6} F = 9,95 \mu F.$$

Transformátor Tr musí dávať sekundárne napätie s efektívnou hodnotou

$$U'_{\max} = U_{\max} - U_D,$$

$$\begin{aligned} (U_2 \cdot \sqrt{2} - U_D) \cdot \left(1 - \frac{1}{2CRf}\right) &= U_{js} \quad \Rightarrow \quad U_2 = \frac{1}{\sqrt{2}} \cdot \left( \frac{U_{js}}{1 - \frac{1}{2CRf}} + U_D \right) = \\ &= \frac{1}{\sqrt{2}} \cdot \left( \frac{100}{1 - \frac{1}{2 \cdot 9,95 \cdot 10^{-6} \cdot 3 \cdot 10^4 \cdot 50}} + 1,1 \right) = \frac{1}{\sqrt{2}} \cdot 104,566\,204\,5 = 73,94\,V \doteq 74\,V \end{aligned}$$

a to pri zaťažení nabíjacími rázmi v čase  $t_n$  (obr. 9.8); kde  $\Delta U = 1,1 \text{ V}$  je úbytok napätia jednej diódy.

Dióda musí byť zvolená na stredný prúd, ktorého približná veľkosť je

$$I_d = \frac{U_{js}}{R} = \frac{100 \text{ V}}{30\,000 \Omega} = 0,003\,33 \text{ A} = 3,33 \text{ mA}$$

a na záverné napätie

$$U_{i \max} \doteq 2 \cdot U_2 \cdot \sqrt{2} = 2 \cdot 74 \cdot \sqrt{2} = 209,3 \text{ V}.$$

Môžeme zvoliť plošnú kremíkovú diódu typu KA 503 na 9 mA a na záverné napätie  $U_{in} = 215 \text{ V}$ .

### 9.3 ÚLOHY NA SAMOSTATNÉ RIEŠENIE

**Úloha 9.3.1.** Jednoimpulzný kremíkový usmerňovač (obr. 9.3) bez filtračného kondenzátora má zaťažovací odpor  $R_z = 20 \Omega$ . Aká bude maximálna hodnota usmerneného napätia  $U'_{\max}$

- ak maximálna hodnota striedavého napätia  $U_{\max} = 5 \text{ V}$ , (4,3 V)
- ak efektívna hodnota striedavého napätia  $U_{ef} = 5 \text{ V}$ . (6,3 V)
- Aká veľká musí byť maximálna hodnota striedavého napätia, aby usmerňovač dodával do zaťažovacieho odporu priemerný jednosmerný výkon 1 W.  
( $U_{\max} \doteq 9,7 \text{ V}$ )

**Úloha 9.3.2.** Kremíkový usmerňovač je zapojený podľa obr. 9.3. Na sekundárnej strane transformátora je  $U_{ef} = 18 \text{ V}$ ,  $f = 50 \text{ Hz}$ . Kondenzátor má kapacitu  $C = 1\,000 \mu\text{F}$  a  $R_z = 200 \Omega$ . Pre kremíkovú diódu uvažujte  $U_D \doteq 0,7 \text{ V}$ .

- Aké bude jednosmerné napätie na zaťažovacom odpore? (24,7 V)
- Aké bude zvlnenie? (3,5 %)
- Aké by bolo zvlnenie, keby striedavé napätie malo frekvenciu  $f = 400 \text{ Hz}$ ? (0,44 %)
- Aký by bol pokles napätia na tomto usmerňovači, keby dával jednosmerné napätie  $U'_{\max} = U_{js} = 30 \text{ V}$ , odoberali by sme prúd  $I_{js} = 2,25 \text{ mA}$  a odpor sekundárneho vinutia by bol  $R_{tr} = 2,25 \Omega$ ? (0,168 %)
- Aký by bol pokles napätia na našom usmerňovači, keby dával jednosmerné napätie  $U_{js} = 24,7 \text{ V}$ , odoberali by sme prúd  $I_{js} = 123,5 \text{ mA}$  a odpor sekundárneho vinutia by bol  $R_{tr} = 2,25 \Omega$ ? (11,25 %)

**Úloha 9.3.3.** Navrhnete zapojenie kremíkovej diódy do jednoimpulzného usmerňovača s vyhladzovacím kondenzátorom, tak, aby sme získali naprázdno napätie  $U_{js0} = 10 \text{ V}$ . Na uvedený usmerňovač môžete použiť striedavú sieť  $220 \text{ V}$ ,  $50 \text{ Hz}$  a transformátor. Vypočítajte prevod transformátora, ak pri určitom záťažnom prúde má byť napätie na usmerňovači (teda jednosmerné napätia)  $U_{js} = 9,2 \text{ V}$ .

(p = 31)

**Úloha 9.3.4.** Navrhnete a nakreslite dvojimpulzný usmerňovač s vyhladzovacím filtrom tak, aby pri nominálnej záťaži dával prúd  $I_{js} = 100 \text{ mA}$  pri jednosmernom maximálnom napätí  $U'_{\max} = 50 \text{ V}$ . Jednosmerné napätie má mať zvlnenie  $2 \%$ . Na dióde uvažujte s úbytkom napätia  $U_D = 0,7 \text{ V}$ .

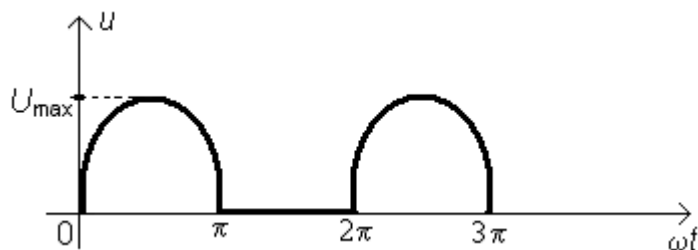
a) Vypočítajte maximálnu hodnotu  $U_{\max}$  a efektívnu hodnotu  $U_{\text{ef}}$  napájacieho vstupného napätia mostíka dvojimpulzného usmerňovača.

b) Určte veľkosť kapacity  $C$  kondenzátora použitého filtra v  $\mu\text{F}$ !

( a)  $U_{\max} = 51,4 \text{ V}$ ;  $U_{\text{ef}} = 36,3 \text{ V}$ ; b)  $354 \mu\text{F}$ )

**Úloha 9.3.5.** Odvodte strednú a efektívnu hodnotu jednoimpulzne usmerneného sínusového priebehu napätia podľa obr. 9.9.

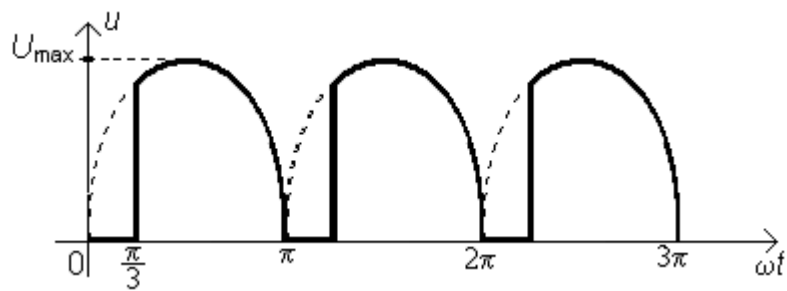
$$(U_{\text{str}} = \frac{U_{\max}}{\pi}; \quad U_{\text{ef}} = \frac{U_{\max}}{2})$$



Obr. 9.9

**Úloha 9.3.6.** Odvodte strednú hodnotu  $U_{\text{str}}$  a efektívnu hodnotu  $U_{\text{ef}}$  dvojimpulzne usmerneného striedavého napätia podľa obr. 9.10. Ďalej odvodte priemerný výkon na rezistore  $R$ , na ktorý je toto napätie priložené.

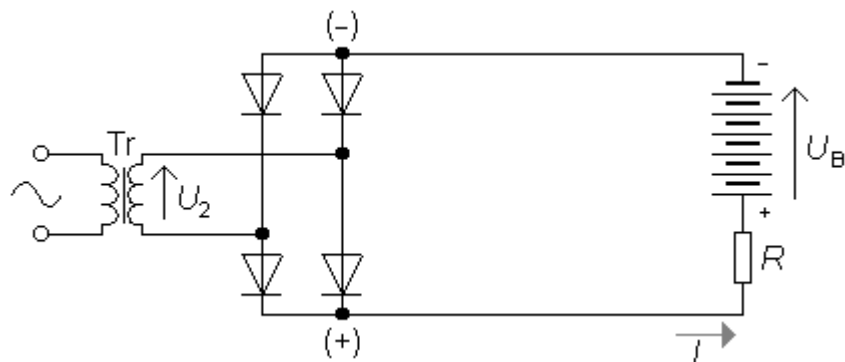
$$(U_{\text{str}} = \frac{3U_{\max}}{2\pi}; \quad U_{\text{ef}} \cong 0,63 U_{\max}; \quad \bar{P} \cong 0,4 \cdot \frac{U_{\max}^2}{R})$$



Obr. 9.10

**Úloha 9.3.7.** Z jednofázového „bezpečnostného“ transformátora Tr pre 220/24 V chceme cez usmerňovač a odpor  $R$  nabíjať podľa obr. 9.11 akumulátorovú olovenú batériu 12 V s kapacitou 35 Ah. Určte potrebné diódy a odpor  $R$ .

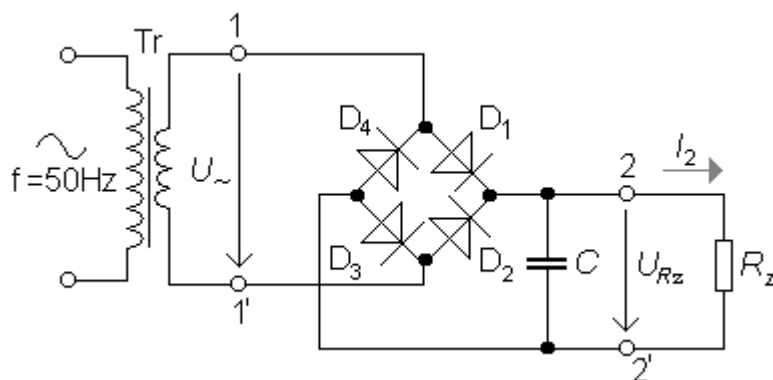
( $I_d = 1,75$  A;  $U_{i\max} \doteq 34$  V;  $R = 3,05 \Omega$ )



Obr. 9.11

**Úloha 9.3.8.** Vypočítajte kapacitu vyhladzovacieho kondenzátora  $C$  pre dvojimpulzný usmerňovač na obr. 9.12 pre zvlnenie výstupného napätia  $U_{pp} \leq 4$  V (špička – špička), ak stredná hodnota napätia na záťaži je  $U_{Rz} = 150$  V a maximálny prúd v záťaži je  $I_{2\max} = 100$  mA.

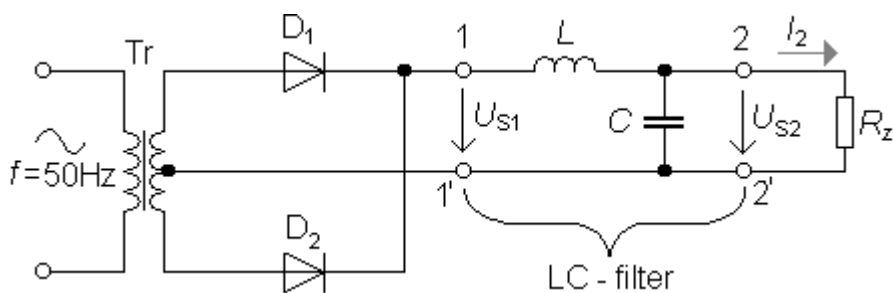
( $C = 250 \mu\text{F}$ )



Obr. 9.12

**Úloha 9.3.9.** Vypočítajte kapacitu kondenzátora  $C$  LC-filtra a minimálnu hodnotu zaťažovacieho odporu  $R_{z \min}$  pre dvojimpulzný usmerňovač na obr. 9.13, pričom amplitúda prvej harmonickej zvlneného napätia na záťaži je  $U_1 \leq 50 \text{ mV}$ , stredná hodnota napätia za usmerňovačom  $U_{S1} = 20 \text{ V}$ , maximálny prúdový odber  $I_{2 \max} = 50 \text{ mA}$  a hodnota indukčnosti tlmivky je  $L = 100 \text{ mH}$ .

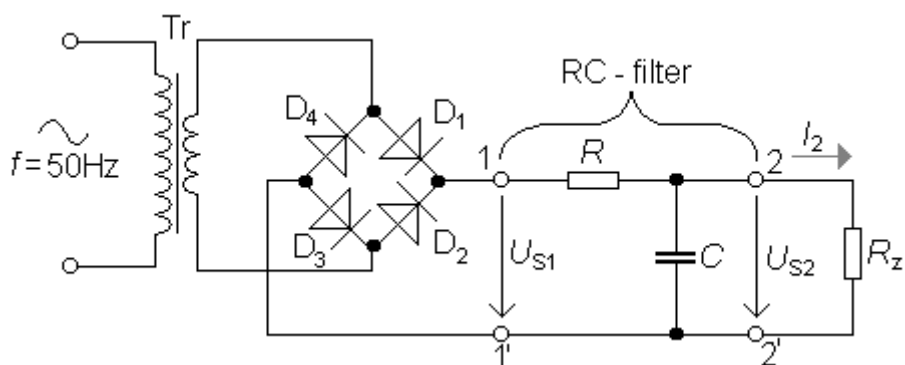
( $C = 6\,738 \mu\text{F} = 6,738 \text{ mF}$ ;  $R_{z \min} = 400 \Omega$ )



Obr. 9.13

**Úloha 9.3.10.** Navrhňte RC-filter pre dvojimpulzný usmerňovač na obr. 9.14, pričom amplitúda prvej harmonickej zvlneného napätia na záťaži je  $U_1 \leq 0,2 \text{ V}$ , maximálny prúdový odber  $I_{2 \max} = 100 \text{ mA}$ , stredná hodnota napätia za usmerňovačom  $U_{S1} = 160 \text{ V}$  a stredná hodnota napätia za filtrom je  $U_{S2} \geq 100 \text{ V}$ .

( $R = 600 \Omega$ ;  $C = 884 \mu\text{F}$ )



Obr. 9.14