

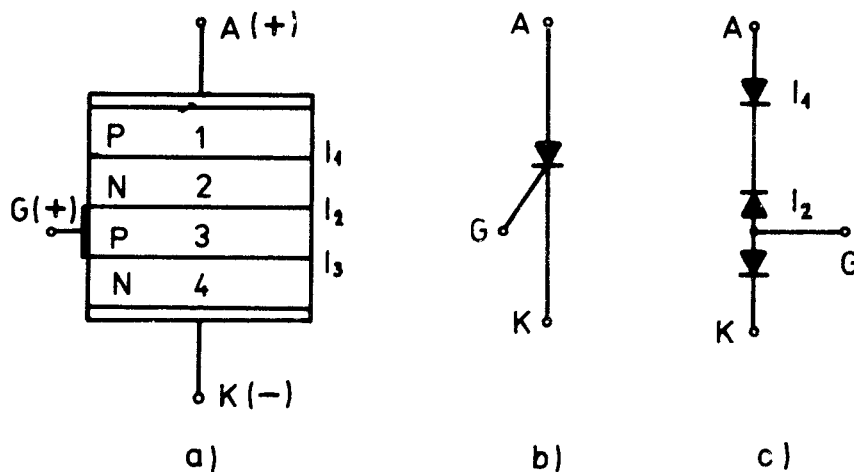
## 17. STUDIUM TYRISTORU

### Pracovní úkol

1. Stanovte hodnoty minimálního spínacího proudu  $I_{GO}$ , napětí  $U_{GO}$  a přídržného proudu  $I_T$  a zjistěte jejich závislost na anodovém napětí tyristoru.
2. Změřte závislost saturačního napětí  $U_T$  na propustném proudu tyristoru. Výsledky měření zpracujte graficky.
3. Změřte závislost proudu tyristorem na fázovém posunu mezi napětím řídicí elektrody a anody. Výsledek měření zpracujte graficky a porovnejte jej s průběhem vypočítaným podle rovnic (2) a (3).
4. Během měření úkolu 3 sledujte na vícestopém osciloskopu průběhy napětí na sekundáru transformátoru, anodě tyristoru a fázovacím členu. Sledujte též časový průběh proudu tyristorem. Pozorované průběhy schématicky zakreslete pro vybrané hodnoty fázových posunů.

### Princip činnosti tyristoru

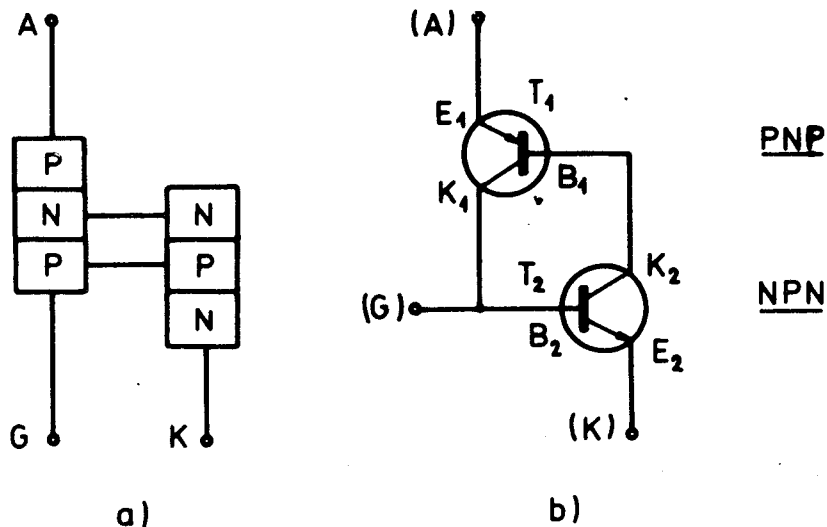
Tyristor je polovodičový spínací prvek se čtyřmi vrstvami polovodiče s vodivostí typu P a typu N, které jsou uspořádány podle obr. 1a. Ve schématech se označuje tyristor značkou zakreslenou na obr. 1b. V obvodech zastává tyristor v podstatě funkci dříve používané plynem plněné mřížkové elektronky - tyatronu. Analogicky s tyatronem nazýváme elektrody tyristoru anoda (A), katoda (K) a mřížka nebo též řídicí elektroda G.



Obr. 1

Je-li mezi anodou a katodou tyristoru připojeno napětí polarity naznačené na obr. 1a, jsou přechody  $I_1$  a  $I_3$  polarizovány v propustném směru a přechod  $I_2$  mezi vrstvou 2 a 3 je namáhán v závěrném směru. Pokud nezvýšíme dostatečně potenciál vrstvy 3 vůči katodě, neotevře se přechod

$I_2$  a tyristorem nemůže protékat anodový proud. Tomuto stavu odpovídá náhradní schéma z diod zakrelené na obr. 1c. Protéká-li však přechodem  $I_3$  silnější proud v propustném směru, dostává se část elektronů z vrstvy 4 přes vrstvu 3 do oblasti přechodu  $I_2$ , takže tímto přechodem rovněž začne protékat proud. K vysvětlení funkce tyristoru lze užít náhradního schématu z tranzistorů. Myšlenkově si můžeme uspořádání vrstev představit též podle obr. 2a. Vrstvy 2 a 3 z obr. 1 jsou rozděleny na dvě paralelně zapojené části. Tomuto uspořádání vrstev odpovídá zapojení dvou tranzistorů (PNP a NPN) podle obr. 2b. V tomto zapojení je kolektorový proud jednoho tranzistoru zesilován druhým tranzistorem v uzavřené smyčce kladné zpětné vazby.



Obr. 2

Označíme si proudové zesilovací činitele tranzistorů  $\beta_1$  a  $\beta_2$ . Náhodná změna proudu báze  $B_1$  ( $\Delta i_{B1}$ ) je po zesílení tranzistoru převáděna ve stejné fázi do téže báze jako změna proudu kolektorem  $K_2$  tranzistoru  $T_2$ . Pro změnu proudu  $\Delta i_{K2}$  kolektorem  $K_2$  způsobenou změnou proudu  $\Delta i_{B1}$  bude platit

$$\Delta i_{K2} = \Delta i_{B1} \cdot \beta_1 \cdot \beta_2$$

Tato dodatečná změna proudu bází  $B_1$  se ovšem znovu zesiluje. Je-li  $\beta_1 \beta_2 > 1$ , je  $\Delta i_{K2} > \Delta i_{B1}$  a dojde k lavinovitému vzrůstu proudu. Celá soustava (tyristor) přejde do vodivého (sepnutého) stavu. Aby nedošlo ke zničení tyristoru, musí být do série zařazen vhodný odpor, např. zatěžovací odpor. Tento odpor omezí proud procházející obvodem. Napětí na tyristoru poklesne na poměrně nízkou hodnotu cca 2 V. Toto napětí se nazývá saturačním a jeho hodnota může poněkud záviset na protékajícím proudu.

Zesilovací činitele  $\beta_1$ ,  $\beta_2$  závisí na kolektorových proudech. Podmínka  $\beta_1 \cdot \beta_2 > 1$  je splněna až po překročení jistého minimálního proudu  $I_G$  přiváděného do řídicí elektrody G. Je-li řídicí elektroda odpojena, je zbytkový proud tyristorem tak malý, že  $\beta_1 \cdot \beta_2 \ll 1$  a vypnutý stav je stabilní.

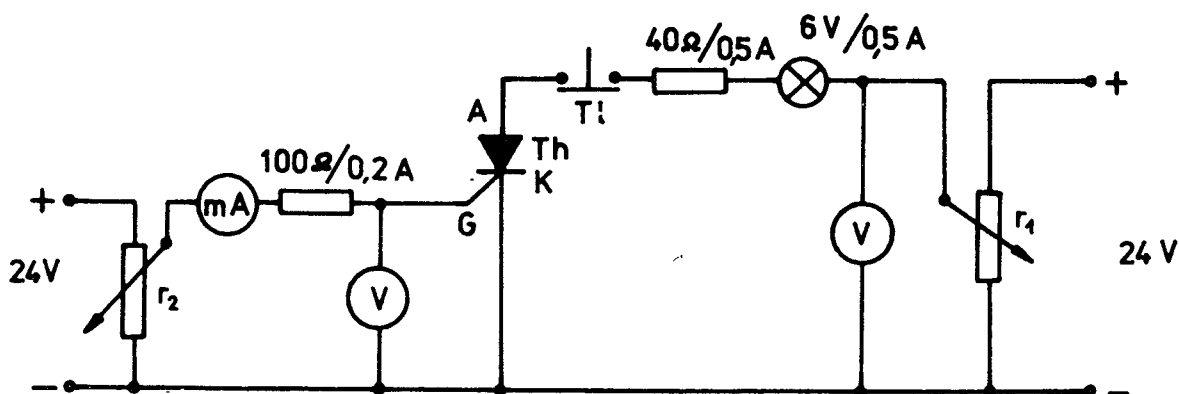
V praxi můžeme přivést tyristor do vodivého stavu dvěma způsoby :

1. Do řídicí elektrody G přivedeme kladný proudový impuls dostatečné velikosti  $I_G \geq I_{G0}$  po dobu potřebnou k výkompenzování prostorových nábojů a ustavení vodivého stavu (obvykle  $\approx 10^{-4}$  s) .
2. Zvýšením napětí na tyristoru, což má za následek vzrůst zpětného proudu přechodu  $I_2$  do vrstvy 3 a vede tedy k sepnutí. Tento případ sepnutí tyristoru se vyskytuje obvykle jako nežádoucí jev.

Je-li tyristor v sepnutém stavu, setrvává v něm tak dlouho, dokud jím protéká proud větší než tzv. přídržný proud  $I_r$  . Vypínací doba tyristoru, během níž dochází k rekombinaci nadbytečných nositelů proudu a tedy přechodu do nevodivého stavu, bývá cca  $10^{-4}$  s .

### Měření charakteristik tyristoru

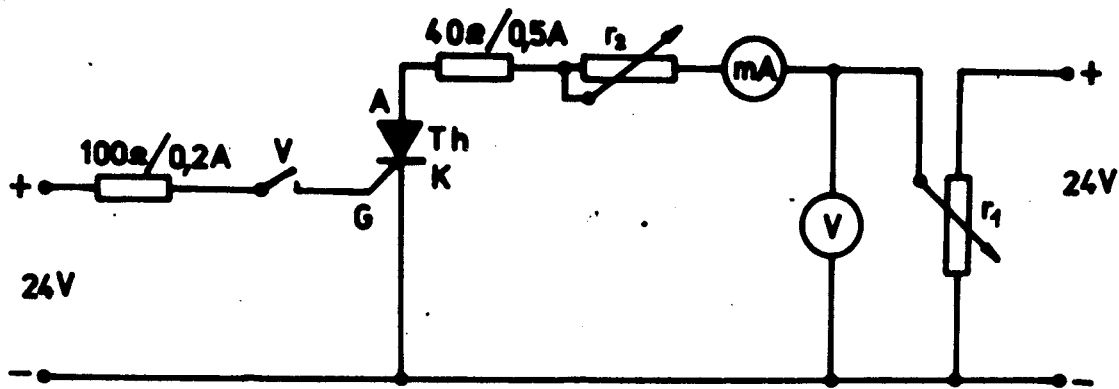
Měření provádíme v zapojeních podle schémat 3, 4 a 5 . Všechny prvky obvodu s výjimkou měřících přístrojů, posuvných odporů a zdrojů jsou zabudovány v jednom z přípravků u úlohy. Prvky nejsou propojeny, ale jsou vyvedeny uzlové body a propojení si uděláte sami vně skříňky co nejkratšími spojovacími vodiči s banánky.



Obr. 3

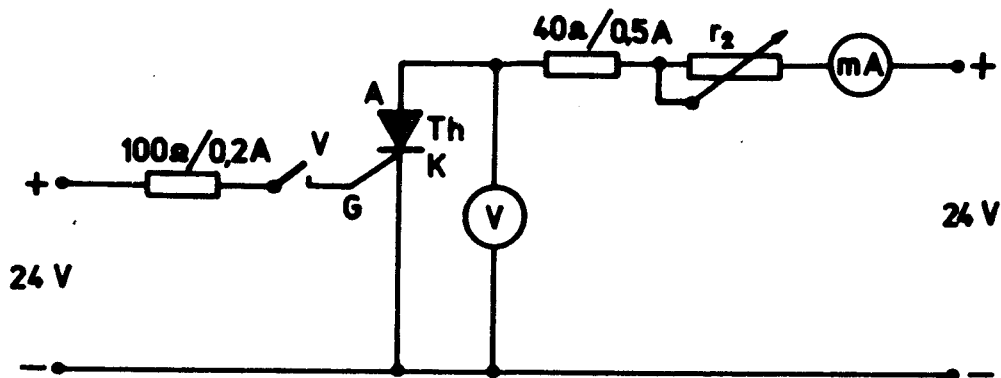
Při měření úkolu 1 si nastavíte pomocí potenciometru  $r_1$  (10 až 30  $\Omega$ ) zvolenou hodnotu anodového napětí. Druhým potenciometrem  $r_2$  (1 - 2 k  $\Omega$ ) zvyšujete napětí řídicí elektrody, až dojde k zapnutí tyristoru. Zapnutí tyristoru se indikuje buď rozsvícením žárovky zakreslené na schématu 3 nebo místo žárovky zapojíme ampérmetr a zjišťujeme, při jakém napětí řídicí elektrody jím začne téci proud. Použití ampérmetru je vhodnější zejména při malých anodových napětích. Odečteme hodnotu proudu a napětí řídicí elektrody v okamžiku sepnutí. Pak snížíme její napětí na nulu a tyristor vypneme stisknutím tlačítka  $T_1$  (tj. krátkodobým odpojením anodového napětí). Měření opakujeme při další hodnotě anodového napětí.

Přídržný proud měříme v zapojení podle obr.4.: potenciometrem  $r_1$  nastavíme zvolenou hodnotu anodového napětí. Při malé hodnotě odporu  $r_2$  uvedeme tyristor krátkodobým zapnutím vypínače  $V$  do sepnutého stavu. Zvyšujeme



Obr. 4

hodnotu odporu  $r_2$ , čímž zmenšujeme proud  $I$  tekoucí tyristorem do té doby, až z hodnoty  $I_r$  (přidržený proud) klesne na nulu.

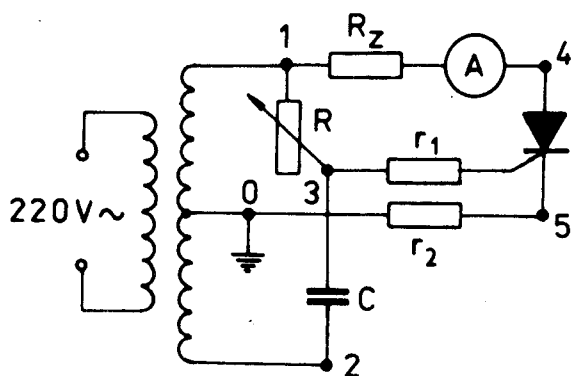


Obr. 5

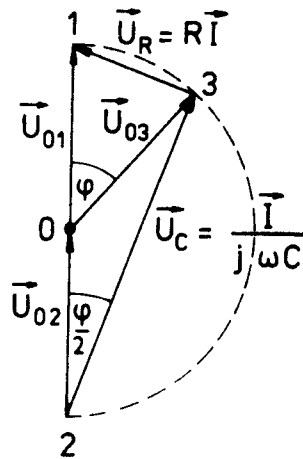
V zapojení podle obr.5 měříme závislost saturačního napětí na proudu tyristoru. Při připojeném anodovém napětí krátkodobým zapnutím vypínače V uvedeme tyristor do sepnutého stavu. Odpor  $r_2$  měníme proud tekoucí tyristorem a odečítáme na voltmetru anodové napětí (saturační napětí).

### Fázové řízení tyristoru

Jedna z technických aplikací tyristoru spočívá v jeho použití k řízení výkonu ve spotřebiči, kterým může být například motor na stejnosměrný proud, topný odpor apod. Je-li tyristor zapojen v obvodu napájeném střídavým nebo pulzujícím proudem, můžeme v každé kladné půlperiodě řídit okamžik nového sepnutí napětím větším než spínací napětí  $U_{GO}$  přiváděným z pomocného obvodu na řídicí elektrodu. V technických zařízeních se zpravidla okamžik sepnutí řídí napěťovým pulsem. U této úlohy se seznámíme s možností řízení tyristoru fázově posunutým střídavým napětím. Schéma obvodu je zakresleno na obr.6. Tyristor je zapojen mezi střed a jeden z konců sekundárního vinutí transformátoru. K řídicí elektrodě je přiváděno napětí ze středu fázovacího členu tvořeného kondenzátorem  $C$  a odporem  $R$ , z bodu 3 na obr. 6.



Obr. 6



Obr. 7

Činnost fázovacího členu můžeme nejlépe demonstrovat na grafickém znázornění vektorů napětí na sekcích sekundáru transformátoru a na prvcích fázového RC členu. Příslušný graf je zakreslen na obr.7 . Jako referenční bod, vůči němuž měříme napětí, bereme střed sekundárního vinutí - svorku 0 . Pokud obě sekundární vinutí mají stejný počet závitů, jsou napětí  $U_{01}$  a  $U_{02}$  na obou sekcích stejně velká, ovšem opačné fáze. Napětí  $U_{12}$  na celém sekundárním vinutí je rovno součtu napětí na sekcích a toto napětí musí být rovno i součtu napětí na odporu  $R$  a kapacitě  $C$  . Oběma těmito prvky teče stejný proud  $I$  a napětí  $RI$  a  $I / (j\omega C)$  jsou fázově posunuta o  $\pi/2$  , takže vektory znázorňující tato napětí musí svírat pravý úhel. Vrchol 3 pravouhlého trojúhelníka, jehož odvěsny mají velikost  $RI$  a  $I / (\omega C)$  leží na Thaletově kružnici se středem v bodě 0 . Napětí v bodě 3 charakterizované vektorem  $U_{03}$  je vůči napětí  $U_{01}$  fázově posunuto o úhel  $\varphi$  . Napětí v bodě 4 ve schématu na obr.6 (anodové napětí tyristoru) má stejnou fázi jako napětí  $U_{01}$  . Úhel  $\varphi$  tedy určuje i fázový posun mezi anodovým napětím a napětím řídicí elektrody, které je fázově shodné s napětím  $U_{03}$  .

Měníme-li odpor  $R$  v intervalu  $(0, \infty)$ , může koncový bod 3 vektoru napětí  $U_{03}$  ležet v libovolném bodě zakreslené půlkružnice. Pro  $R = 0 \Omega$  bude  $U_R = 0 V$  a napětí  $U_{03}$  bude mít stejnou fázi jako napětí  $U_{01}$  a tedy i anodové napětí. K otevření tyristoru je třeba, aby anodové napětí bylo větší než saturační napětí  $U_T$  a napětí řídicí elektrody větší než spínací napětí  $U_{G0}$  . Pokud je amplituda napětí  $U_{01}$  podstatně větší než napětí  $U_T$  a  $U_{G0}$  , otevře se tyristor při  $R = 0 \Omega$  prakticky na začátku kladné půlperrody napětí  $U_{01}$  a povede po celou tuto půlperiodu. Vypne, bude-li napětí  $U_{01} = 0 V$  .

Při  $R = (\omega C)^{-1}$  bude fázový posuv  $\varphi$  anodového napětí a napětí řídicí elektrody roven  $\pi/2$  . Tyristor sepne přibližně v maximu napětí  $U_{01}$  a povede po dobu jedné čtvrtperrody. Při  $R \rightarrow \infty$  bude fázový posuv  $\varphi = \pi$  . Napětí řídicí elektrody začne být kladné v okamžiku, kdy  $U_{01}$  přechází do záporných hodnot. Tyristor v tomto případě vůbec nesepe.

Přístroje s otočnou cívkou měříme střední hodnotu stejnosměrného proudu, pro kterou přibližně platí

$$y = \frac{1}{T} \frac{U_{01}}{R_z} \int_{\frac{\varphi T}{2\pi}}^{\frac{T}{2}} \sin\left(\frac{2\pi}{T} t\right) dt, \quad (1)$$

znamená-li  $T$  periodu a  $U_{01}$  amplitudu přiloženého napětí. Po integraci a odmocnění dostaneme

$$y = \frac{U_{01}}{2\pi R_z} (1 + \cos \varphi) . \quad (2)$$

Řešením trojúhelníku z obr.7, jehož vrcholy jsou označeny číslicemi 1, 2 a 3, snadno odvodíme vztah pro fázový posuv

$$\operatorname{tg}(\varphi / 2) = \omega R C . \quad (3)$$

V obvodu používaném v praxi je kapacita  $C$  neproměnná a rovná přibližně  $2 \mu\text{F}$ , takže fázový posuv by měl být roven hodnotě  $\varphi = \pi/2$  při  $R \approx 1,6 \text{ k}\Omega$ . Jako odpor  $R$  používáme odporovou dekádu s rozsahem do  $1,11 \cdot 10^5 \Omega$ . Zatěžovací odpor volíme přibližně  $R_z = 100 \Omega$ . Odpor  $r_1$  slouží jako ochranný odpor řídicí elektrody tyristoru. V daném případě je  $r_1 \approx 1 \text{ k}\Omega$ . Na odporu  $r_2$  sledujeme průběh proudu tyristorem. Tento odpor  $r_2$  musí být podstatně menší než odpor  $R_z$ . Jeho hodnotu volíme  $r_2 \approx 1 \Omega$ . Naměřený proud bude menší než hodnota vypočítaná podle (3), neboť není v tomto vztahu uvažován vnitřní odpor tyristoru.

#### Literatura

- [1] Heřman J.: Bezkontaktní spínání, SNTL/Alfa, Praha 1975
- [2] Holub P., Zíka J.: Praktická zapojení polovodičových diod a tyristorů, SNTL/Alfa, Praha 1971
- [3] Brož J. a kol.: Základy fyzikálních měření I, SPN, Praha 1983