

# Tyristory

## Úvod

Tyristor je čtyřvrstvý polovodičový spínací prvek. Struktura tří PN přechodů zapojených v sérii způsobuje, že tyristor je v neprůchozím stavu ať je anodové napětí kladné nebo záporné, pokud nepřesáhne určitou hodnotu.

Pro přechod tyristoru do sepnutého stavu, je potřebné odstranit blokovací schopnost řídicího přechodu. To je možné uskutečnit třemi způsoby, z nichž se ale v praxi využívá pouze jeden:

1. Zvýšením anodového napětí  $U_a$  nad průraznou hodnotu  $U_{BO}$ . To vyvolá lavinové násobení počtu minoritních nosičů na obou stranách přechodu. Tento způsob spínání se nedoporučuje.
2. Injekci majoritních nosičů řídicí elektrody do řídicí vrstvy. Tento způsob spínání je pro tyristor typický.
3. Kapacitním proudem při rychlých změnách anodového napětí tyristoru. Ve většině aplikací je tento způsob spínání nežádoucí.

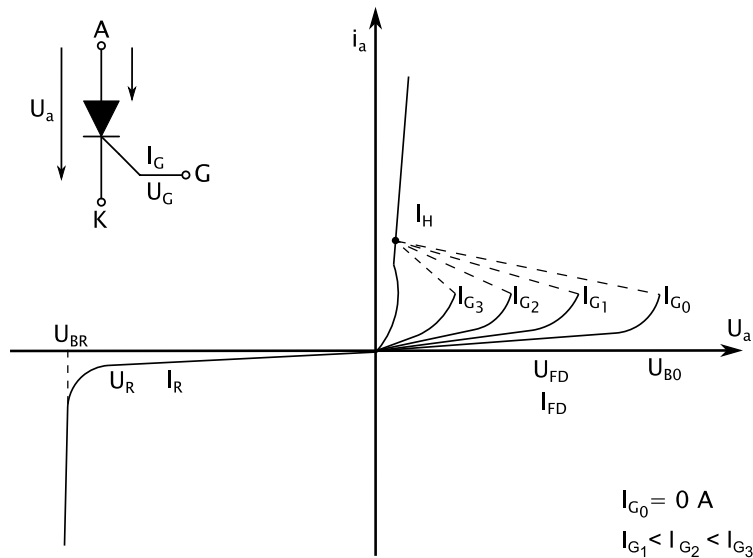


Figure 1: VA charakteristika tyristoru

Pokud je tyristor v sepnutém stavu, zůstává v sepnutém stavu i když je proud řídicí elektrodou nulový. Při vypínání tyristoru je tedy nutné obnovit blokovací schopnost řídicího přechodu odstraněním volných nosičů náboje z oblasti řídicí a blokovací vrstvy. Toho lze dosáhnout vypnutím anodového proudu (i na velmi krátkou dobu), nebo jeho snížením pod hodnotu tzv. přídržného proudu  $I_H$ .

Charakteristiky tyristor jsou na obrázku (obr 1). Ve vypnutém stavu je závěrná i propustná část charakteristiky podobná závěrné části charakteristiky běžné diody. Závěrná větev charakteristiky určuje závěrné napětí  $U_{BR}$ , o něco menší je typové závěrné napětí  $U_R$ . Při tomto napětí protéká tyristorem závěrný klidový proud  $I_R$ . Obdobně v propustné části charakteristiky je důležité spínací napětí  $U_{BO}$  a přední klidový proud  $I_{FD}$  pro napětí  $U_{FD}$ , pro které platí  $U_{FD} < U_{BO}$ .

Při porovnání průběhu blokovacích charakteristik na obrázku 1 je patrné, že napětí  $U_a$  potřebné pro sepnutí tyristoru, klesá s rostoucím proudem řídicí elektrodou  $I_G$ .

V této úloze změříme vlastnosti daného tyristoru a vyzkoušíme si jeho funkci jako regulátoru výkonu.

1. Změřte spínací napětí a spínací proud tyristoru
2. Změřte blokovací charakteristiku tyristoru
3. Změřte propustnou charakteristiku tyristoru
4. Změřte závěrnou charakteristiku tyristoru pro proudy větší, než je spínací proud tyristoru
5. Změřte propustnou charakteristiku tyristoru
6. Ověřte funkci tyristoru jako regulátoru výkonu a spočítejte úhel otevření

Pro tuto úlohu jsou v praxi připraveny dvě pracovní desky. Na obrázku 2 je popis desky, kterou budete používat pro měření prvních pěti úkolů. Jednotlivé úkoly vyžadují různé zapojení, proto je nutné před začátkem měření provést potřebné úpravy v zapojení. Dbejte především na správnou volbu ochranného odporu  $R_1$  a na správnou polaritu napájecího zdroje. Před začátkem měření také zkontrolujte, zda jsou spínače  $S_1$  a  $S_2$  ve správné poloze.  $S_1$  musí být vždy na začátku měření sepnutý.  $S_2$  přepíná mezi střídavým a stejnosměrným napájecím zdrojem řídicí elektrody. Pro úkoly 1-4 se používá pouze stejnosměrný napájecí zdroj. Pro 5. úkol se používá střídavý napájecí zdroj.

Napájecí zdroj stejnosměrného napětí, který je v této úloze používán, má dva nezávislé výstupy s rozsahem 0- 32 V. Jejich sériovým zapojením získáte výsledné napětí, které bude součtem dílčích napětí obou zdrojů. Řídicí elektroda tyristoru má vlastní napájecí zdroje. Stejnosměrný zdroj je napájen 9 V baterií, ke které se připojí spínačem v zadní části desky. Střídavý zdroj je napájen přímo ze sítě.

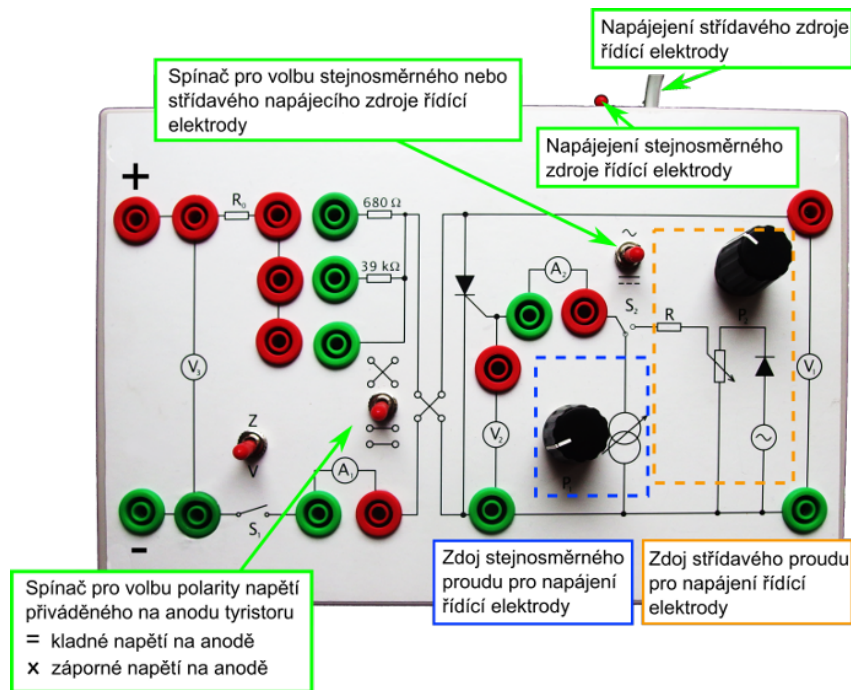


Figure 2: Pracovní deska pro úkoly 1-5

## 1 Měření spínacího proudu a napětí tyristoru

Spínací proud a spínací napětí můžeme měřit v jednoduchém zapojení zobrazeném na obrázku 3a. Na anodu tyristoru přivedeme přes ochranný odpor  $R_p$ <sup>1</sup> konstantní stejnosměrné napětí  $U_Z$  o velikosti 20 V.

Pro sepnutí tyristoru zvyšujeme pomocí potenciometru  $P_1$  proud řídicí elektrodou  $I_G$ , dokud nedojde k sepnutí tyristoru. To je indikováno poklesem napětí na tyristoru  $U_a$  (voltmetr  $V_1$ ) a zvýšením proudu tyristorem  $I_a$  (ampérmetr  $A_1$ <sup>2</sup>). Hodnoty spínacího proudu  $I_{GT}$  a napětí  $U_{GT}$  odečteme těsně před sepnutím tyristoru. Je důležité, aby hodnota  $I_{GT}$  byla určena přesně, protože s ní budeme pracovat i v následujících úlohách.

$$U_Z = 20 \text{ V}$$

$$R_1 = 680 \text{ } \Omega$$

<sup>1</sup>Odpor  $R_p$  chrání tyristor a ampérmetr  $A_1$  před zničením. Napětí stejnosměrného zdroje  $U_Z$  a odpor  $R_p$  musí být zvoleny tak, aby proud  $I = U_Z / R$  byl vždy menší než přípustný proud tyristorem, případně nesmí být větší než maximální proud, který je schopen dodávat použitý zdroj stejnosměrného napětí. V našem případě je odpor  $R$  realizován odporem  $R_0$  o hodnotě  $220 \Omega$ , ke kterému je sériově připojen odpor proměnlivý  $R_1$ . Hodnota odporu  $R$  je tedy  $R_p = R_0 + R_1$ .

<sup>2</sup>Pozor, rozsah ampérmetru  $A_1$  při všech měření v této úloze musí být větší než proud  $I_a = U_Z / R_p$ .

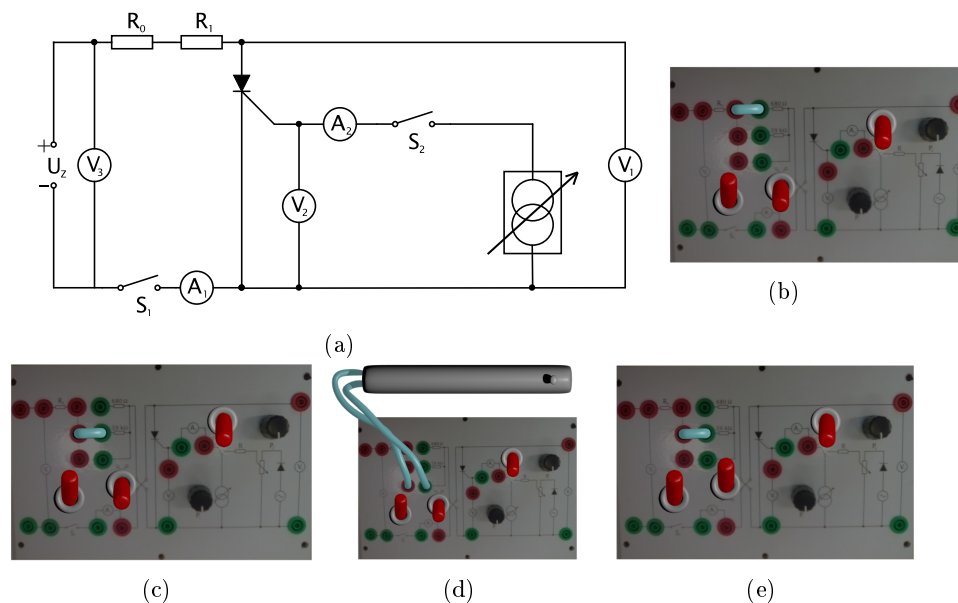


Figure 3: Schéma zapojení (a), polohy spínaču a použití odporů v úkolu 1 (b), úkolu 2 (c), úkolu 3 (d), úkolu 4 (e)

## 2 Měření blokovací charakteristiky

Pro toto měření rovněž použijeme zapojení z obr. 3a. Proud řídicí elektrodou  $I_G$  nastavíme tak, aby byl  $0,01 \text{ mA}$  menší než spínací proud  $I_{GT}$  naměřený v prvním úkolu.

Odpor  $R_1$  bude  $39 \text{ k}\Omega$ . Plynule budeme zvyšovat velikost stejnosměrného napětí přiváděného na anodu tyristoru dokud nedojde k jeho sepnutí. Zaznamenáme závislost  $I_a$  na  $U_a$ . Proud řídicí elektrodou budeme dále zmenšovat s krokem  $0,01 \text{ mA}$ , dokud nedojdeme k proudu  $I_G$ , při kterém zůstane tyristor v celém měřeném rozsahu napětí  $U_Z$  v nesepnutém stavu. Jednou sepnutý tyristor zůstává v sepnutý i při nulovém  $I_G$ . Proto je v této úloze nutné po každém měření obnovit blokovací schopnost řídicího přechodu tyristoru. Toho dosáhnete krátkým vypnutím spínače  $S_1$ .

- $U_Z = 0 - 100 \text{ V}$
- $R_1 = 39 \text{ k}\Omega$
- $I_G = I_{GT} - 0,01 \text{ mA}$

### 3 Měření propustné charakteristiky tyristoru

Propustné charakteristiky tyristoru měříme v zapojení podle obr. 3a. Proud řídicí elektrodou musí být větší než spínací proud pro celý rozsah měření. Ochranný odpor  $R_1$  v této úloze realizujeme reostatem o odporu  $300 \Omega$ .

Plynule zvyšujeme napětí  $U_Z$  a měříme závislost  $I_a$  na  $U_a$  pro proudy tyristorem menší než  $50 \text{ mA}$ .

- $I_a < 50 \text{ mA}$
- $R_1 = 300 \Omega$  (reostat)

### 4 Měření závěrné charakteristiky tyristoru

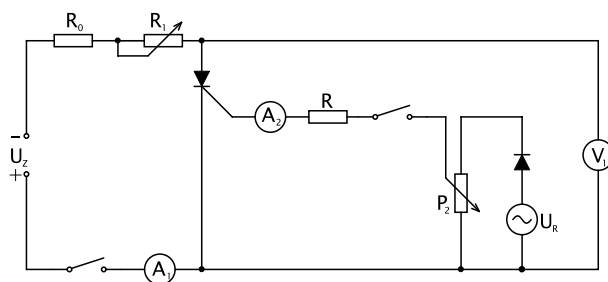
Rovněž tato charakteristika je měřena v zapojení podle obr. 3, ale tyristor je touto případě zapojen v závěrném směru. Na anodu tyristoru je přivedeme záporné napětí přepnutím spínače z polohy = do polohy X. Vzhledem ke změně polarity je nutné přepólovat voltmetr  $V_1$ . Proud řídicí elektrodou zvolíme vyšší než byla hodnota  $I_{GT}$  v prvním úkolu.

Plynule zvyšujeme napětí  $U_Z$  až do hodnoty  $100 \text{ V}$  a zaznamenáme závislost  $I_a$  na  $U_a$  pro dva různé proudy řídicí elektrodou.

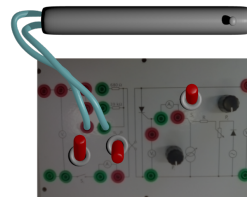
- $U_Z = 0 - 100 \text{ V}$
- $R_1 = 39 \text{ k}\Omega$

### 5 Měření přídržného proudu

Zapojení obvodu pro měření přídržného proudu tyristoru je na obrázku 4a. Aby bylo možné změřit přídržný proud, je nutné přerušovat proud řídicí elektrodou. To je v této úloze realizováno přivedením střídavého proudu ze sítě přes transformátor. Díky usměrňovací diodě teče proud řídicí elektrodou pouze v kladné půlperiodě napětí  $U_R$ .



(a) Schéma zapojení pro měření 5. úkolu



(b) Polohy spínačů a odpor v úkole 5

Figure 4: Schémata zapojení

Jako odpor  $R_1$  je v této úloze použijeme reostat o odporu  $10\text{ k}\Omega$ , který před začátkem měření nastavíme na maximální hodnotu. Proud řídicí elektrodou nastavíme potenciometrem  $P_2$  tak, aby jeho střední hodnota byla větší než proud  $I_{GT}$ . Poté na anodu tyristoru přivedeme kladné stejnosměrné napětí  $U_Z$  o velikosti  $20\text{ V}$ .

Pomalou zmenšujeme odporu reostatu ( $R_1$ ), dokud nedojde k sepnutí tyristoru. Poté dalším snižováním odporu  $R_1$  nastavíme proud tyristorem na hodnotu okolo  $10\text{ mA}$ . Potom zmenšujeme reostatem proud tyristorem (odpor  $R_1$  zvyšujeme) až do okamžiku, kdy se tyristor vypne. Velikost proudu tyristorem  $I_a$  těsně před vypnutím je hodnota přídržného proudu tyristoru  $I_H$ . Hodnotu přídržného proudu změříme pro tři různé proudy řídicí elektrodou.

- $U_Z = 20\text{ V}$
- $R_1 = 10\text{ k}\Omega$  (reostat)
- $I_a < 20\text{ mA}$
- $I_G > I_{GT}$

## 6 Regulace výkonu tyristorem

Spínací prvky jako tyristory a triaky mají rozsáhlé praktické použití zejména jako regulátory výkonu. Své uplatnění mají také jako proudové a napěťové pojistky. Tyristorem je možné regulovat výkonu spotřebičů napájených usměrněným proudem. Jak je zobrazeno na obrázku 5, při regulaci výkonu protéká usměrněný nevyhlazený proud spotřebičem jen určitou část púlperiody.

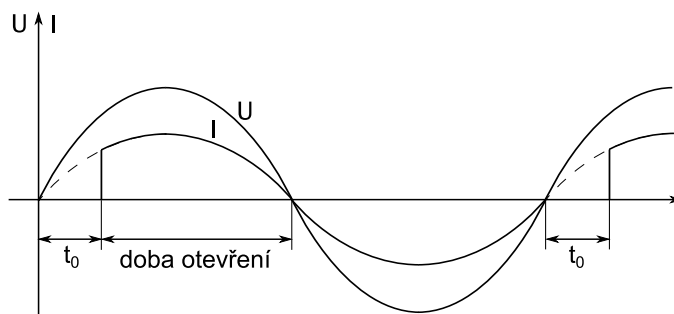


Figure 5: Vizualizace doby otevření

Tyristor se spíná na začátku kladné púlperiody a to vždy až po uplynutí doby  $t_0$ . Hodnotu  $t_0$  je v námi používaném obvodu možné měnit proměnným odporem  $R_5$ , který je realizován odporovou kaskádou. Činnost tohoto obvodu je následující. V každé kladné púlperiodě napájecího napětí se kondenzátor  $C$  nabíjí tak dlouho, dokud na něm není větší napětí než na odporu  $R_4$ . Jakmile je tato podmínka splněna, začne obvodem emitor - báze tranzistoru  $T_1$

procházet proud, tranzistor  $T_1$  se otevírá a spolu s ním se otevírá i tranzistor  $T_2$ . Díky tomu může dojít k vybití kondenzátoru  $C$  přes řídicí elektrodu tyristoru, což způsobí sepnutí tyristoru. Velikost odporu  $R_5$  určuje nabíjecí časovou konstantu kondenzátoru  $C$  a tím i okamžik sepnutí v kladné půlperiodě. (Řídicí obvod je v podstatě generátor napětí pilovitého průběhu jako v úloze o klopných obvodech.)

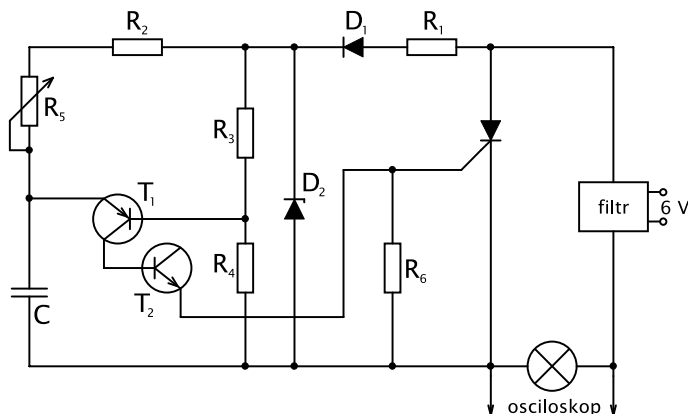


Figure 6: Schéma zapojení pro měření 6. úkolu

Obvod budeme napájet střídavým proudem o velikosti 6 V a velikost doby otevření a času  $t_0$  změříme pomocí osciloskopu. Odporovou dekádou budeme měnit hodnotu odporu  $R_5$ . Změříme závislost úhlu otevření tyristoru na hodnotě odporu  $R_5$ .

- $U_Z = 6 \text{ V}$
- $R_5$  (odporová dekáda)

## Seznam zkratk

- A - anoda tyristoru
- K - katoda tyristoru
- G - řídicí elektroda tyristoru, hradlo, gate
- $U_{B0}$  – spínací napětí, při které dojde k sepnutí tyristoru i při nulovém proudu řídicí elektrodou
- $I_{FD}$  – přední klidový proud protékající tyristorem při napětí  $U_{FD}$
- $U_{FD}$  - typové provozní napětí tyristoru připojeného v propustném směru (tyristor není sepnutý)

- $I_H$  – přídržný proud je nejmenší proud který musí téct tyristorem, aby tyristor zůstal v sepnutém stavu i při nulovém proudu řídicí elektrodou
- $I_R$  – závěrný klidový proud protékající tyristorem při napětí  $U_R$
- $U_R$  – typové provozní napětí tyristoru připojeného v závěrném směru (tyristor není sepnutý)
- $U_{BR}$  – napětí, při kterém dochází k průrazu tyristoru v připojeného v závěrném směru
- $I_G$  – proud řídicí elektrodou
- $U_G$  - napětí mezi řídicí elektrodou a katodou tyristoru
- $I_{GT}$  – spínací proud řídicí elektrodou
- $U_{GT}$  – spínací napětí řídicí elektrody
- $U_a$  – napětí mezi katodou a anodou tyristoru
- $I_a$  – proud protékající tyristorem
- $U_Z$  – napájecí napětí tyristoru