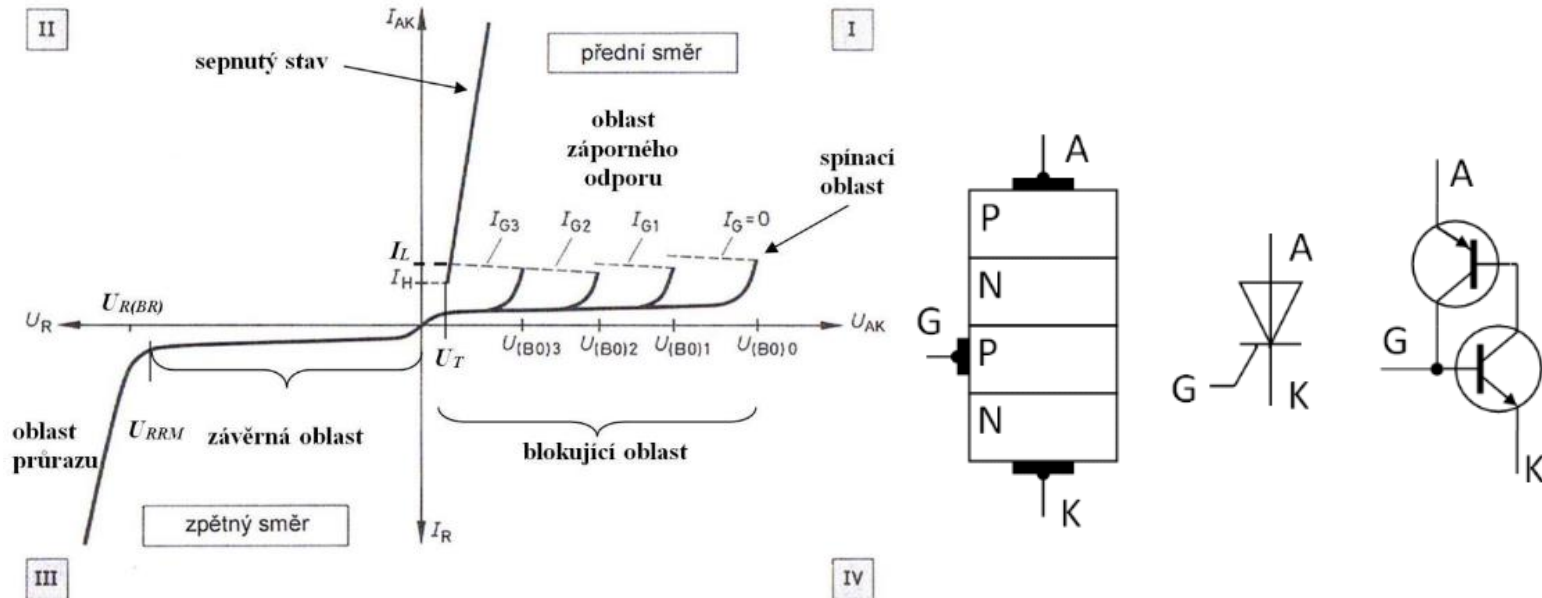


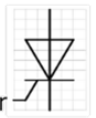
19. Polovodičové spínací prvky – tyristor, triak, IGBT tranzistor, vlastnosti, použití, princip řízení výkonu

Zásadní rozdíl mezi Tyristorem a Tranzistorem – u tranzistoru musíme držet proud báze tak dlouho, dokud cheme aby byl sepnutý. U tyristoru stačí nasadit krátký impuls, tyristor sepne a zůstane zapnutý sám



Důležité parametry

Tyristor

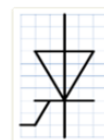


- U_{RBR} je napětí v závěrném směru, při kterém přechází závěrná oblast do oblasti průrazu (zničí tyristor);
- U_{RSM} je nejvyšší otestovaná hodnota napětí v závěrném směru, při které nedojde k průrazu
- U_{RRM} je opakovatelné špičkové napětí v závěrném směru, kdy nedojde k průrazu
- U_{RWM} (**U max**) je typové provozní napětí, při kterém je možné tyristor v závěrném směru trvale zatěžovat;
- I_R je závěrný klidový proud, který protéká tyristorem, je-li mezi katodou a anodou tyristoru provozní závěrné napětí U_R ;
- U_{B0} spínací napětí v propustném směru, po jehož dosažení přejde tyristor do vodivého stavu, proud hradla je nulový, $I_G = 0$ (stovky V až kV);
- U_T je stejnosměrné napětí mezi anodou a katodou sepnutého tyristoru;
- I_{B0} spínací stejnosměrný proud (při $I_G=0$)
- I_D stejnosměrný proud tekoucí tyristorem v blokovacím režimu;
- I_L přidržný proud (latching current) je proud při sepnutí tyristoru, který musí téci tyristorem v okamžiku jeho sepnutí, aby tyristor zůstal v sepnutém stavu, když neteče proud hradlem;
- I_H vratný proud (holding current) je minimální požadovaný proud tyristoru, když je tyristor plně otevřen a neteče proud hradlem. Tento proud je menší než I_L ($I_H < I_L$). Po sepnutí musí tyristorem nejprve téci proud I_L , teprve potom může klesnout na hodnotu I_H ;

Tyristor

Při připojení vnějšího napětí **v závěrném směru** se tyristor chová jako usměrňovací dioda (dva krajní přechody jsou v závěrném směru) a nevede proud, nesmí se ovšem překročit maximální závěrné napětí. Při připojení napětí **v propustném směru** je pouze jeden prostřední přechod v závěrném směru a pokud je napětí U_{AK} menší než U_{B0} , tyristor je **v blokujícím stavu – má velký vnitřní odpor**.

Tyristor



Sepnutí tyristoru

Při sepnutí skokově klesne napětí na jeho svorkách a protéká proud, který s rostoucím napětím prudce roste. To nastane,

- pokud napětí U_{AK} překročí hodnotu U_{B0}
- pokud při napětí $U_{AK} = \text{např. } U_1$ přivedeme **proudový impuls do řídicí elektrody** $I_G > 0$
- Protože je spínací napětí U_{B0} **silně teplotně závislé** (s rostoucí teplotou rychle klesá), **spínání napětím se nepoužívá**.
- Další **nežádoucí zapnutí** tyristoru může nastat příliš **strmým nárůstem napětí** U_{AK} , kdy kapacitou uzavřeného přechodu proteče nabíjecí proud a tyristor se **samovolně zapne**.

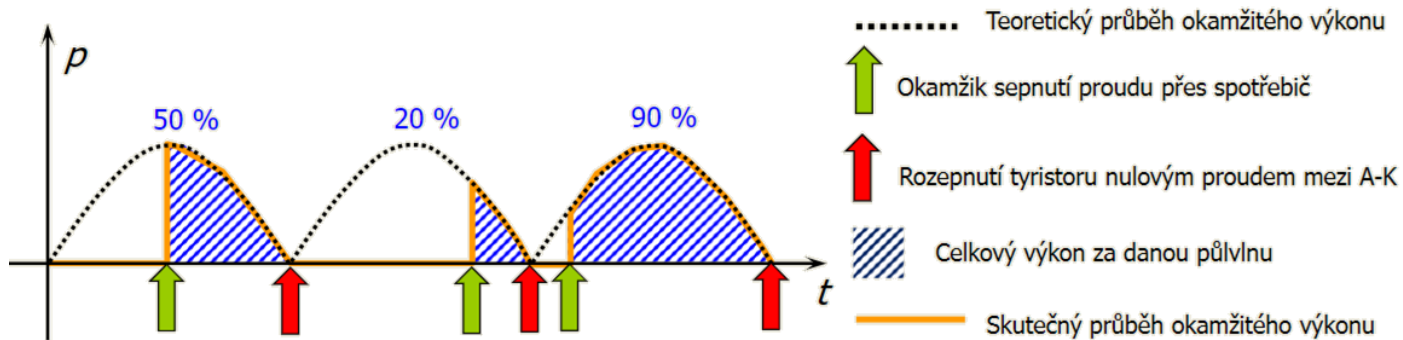
Vypnutí tyristoru

- Ve **střídavých obvodech**, pokud proud I_{AK} klesne pod hodnotu I_H , tyristor se sám přepne zpět do **blokujícího stavu** (nejpozději při průchodu sinusového napětí nulou).
- Ve **stejnoseměrných obvodech** je nutné vyvolat vypnutí tyristoru například krátkodobým přivedením napětí U_{AK} v opačné polaritě dopředu nabitým kondenzátorem.
- **Vypnutí tyristoru řídicí elektrodou není možné**.

TYRISTOR - použití

Tyristorová regulace výkonu – oproti dříve používané reostatové regulaci má tyristorová regulace jednu velkou přednost – úsporu elektrické energie (odpadá problém se ztrátovou přeměnou elektrické energie na teplo – **spotřebič je buď sepnut nebo vypnut**, nikoliv „škrčen“ regulačním prvkem)

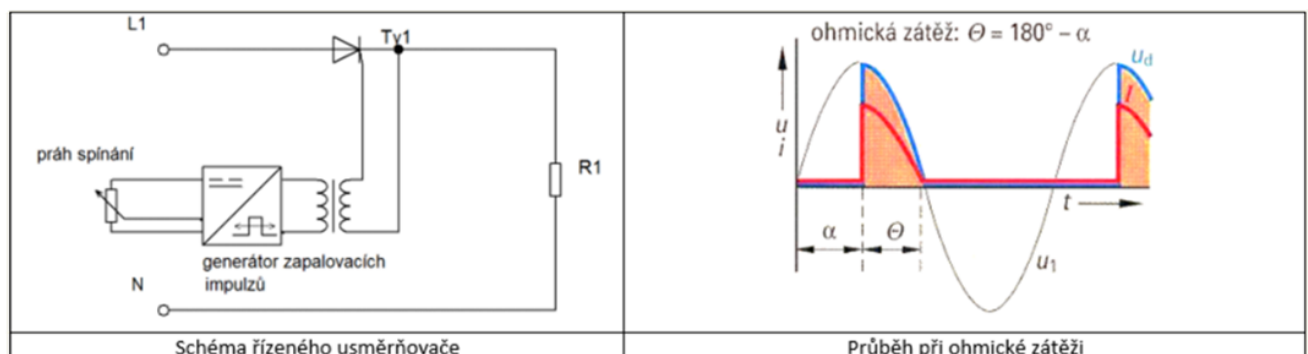
Použití při řízení výkonu např. lokomotiv, tramvají, vrtaček, stmívačů světel...



Spínání odporové zátěže

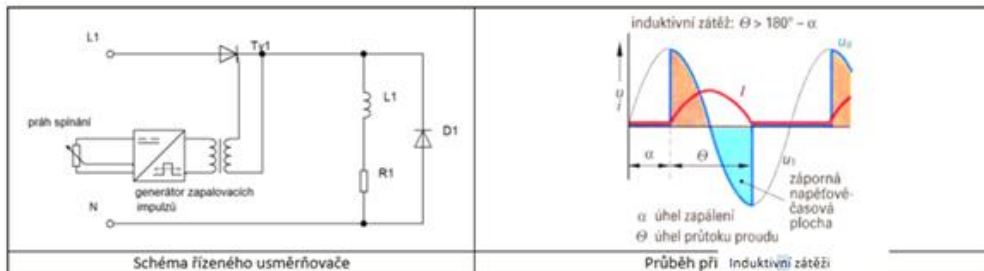
Při fázovém řízení je tyristor sepnut v určitém okamžiku kladné půlplny a vypnut při poklesu napětí k nule (poklesu proudu pod úroveň vratného proudu). Zapalovací úhel α udává o kolik je úhel zapálení posunut oproti začátku kladné půlplny.

Při čistě ohmické zátěži protéká zátěží proud od otevření do uzavření tyristoru. Doba průtoku proudu je dána úhlem Θ .



Spínání indukční zátěže

Při indukční zátěži dochází k fázovému posunu mezi proudem a napětím. Proud se zpožďuje za napětím. Při průchodu napětí nulou protéká ještě kladný proud a tyristor je ještě otevřený po dobu poloviny záporné půlčiny. Indukčnost v tuto dobu pracuje jako generátor napětí (napětí a proud mají různou polaritu). Má-li být toto záporné napětí potlačeno přiřazuje se k indukčnosti paralelně zkratovací dioda.

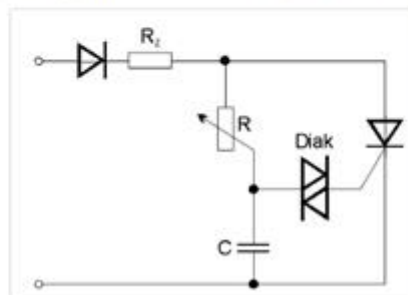


Tyristor

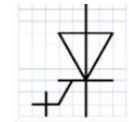


Spínání řídicím proudem pomocí diaku a kondenzátoru

- Spínaná zátěž je na obrázku označena R_z .
- Rezistor R slouží pro nastavení rychlosti nabíjení kondenzátoru C a okamžiku, kdy dojde k sepnutí tyristoru.
- Až napětí U_c na kondenzátoru dosáhne součtu spínacího napětí diaku a spínacího napětí řídicí elektrody G tyristoru, diak sepne a vybijí kondenzátor do elektrody G. Tím vznikne proudový spínací impuls a tyristor sepne.
- S otevřením tyristoru dojde zároveň k poklesu napětí na konci rezistoru R, který je spojen s anodou, a tím k ukončení proudového impulsu do hradla.
- Následující zápornou půlčinou střídavého napájecího napětí se tyristor vypne a na začátku další kladné půlčiny se proces s nabíjením kondenzátoru opakuje.
- Dioda na vstupu do zapojení slouží k ochraně hradla a celého obvodu v závěrném směru při záporných hodnotách vstupního napětí U, protože závěrné napětí hradla U_{RGM} má velmi malou hodnotu – jednotky voltů.

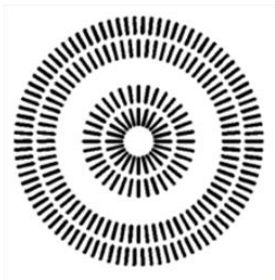


Tyristor



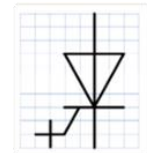
Vypínací tyristor GTO (Gate Turn Thyristor Off)

- Nevýhodou klasických tyristorů je skutečnost, že je nelze pomocí signálu přivedeného na řídicí elektrodu vypnout. Tyristor GTO je možné sepnout i vypnout proudem řídicí elektrody.
- Při spínání se GTO tyristor chová stejně jako klasický tyristor. Je zapínán kladným proudem do řídicí elektrody (hradla) $+I_{GT}$.
- **Vypínání je uskutečňováno ve stejném zapojení, ale přivedením záporného proudu $-I_{RG}$ do řídicí elektrody (hradla).**
- Na rozdíl od klasického tyristoru má velmi složitý přechod PN u katody, řídicí elektroda je rozdělena do mnoha paprskovitě uspořádaných elementů. Vypínání probíhá postupně od vnějšího obvodu a způsobuje výrazné oteplení.



Výkonová součástka vzniká paralelním spojením několika set elementárních GTO v jedné monokrystalické destičce.

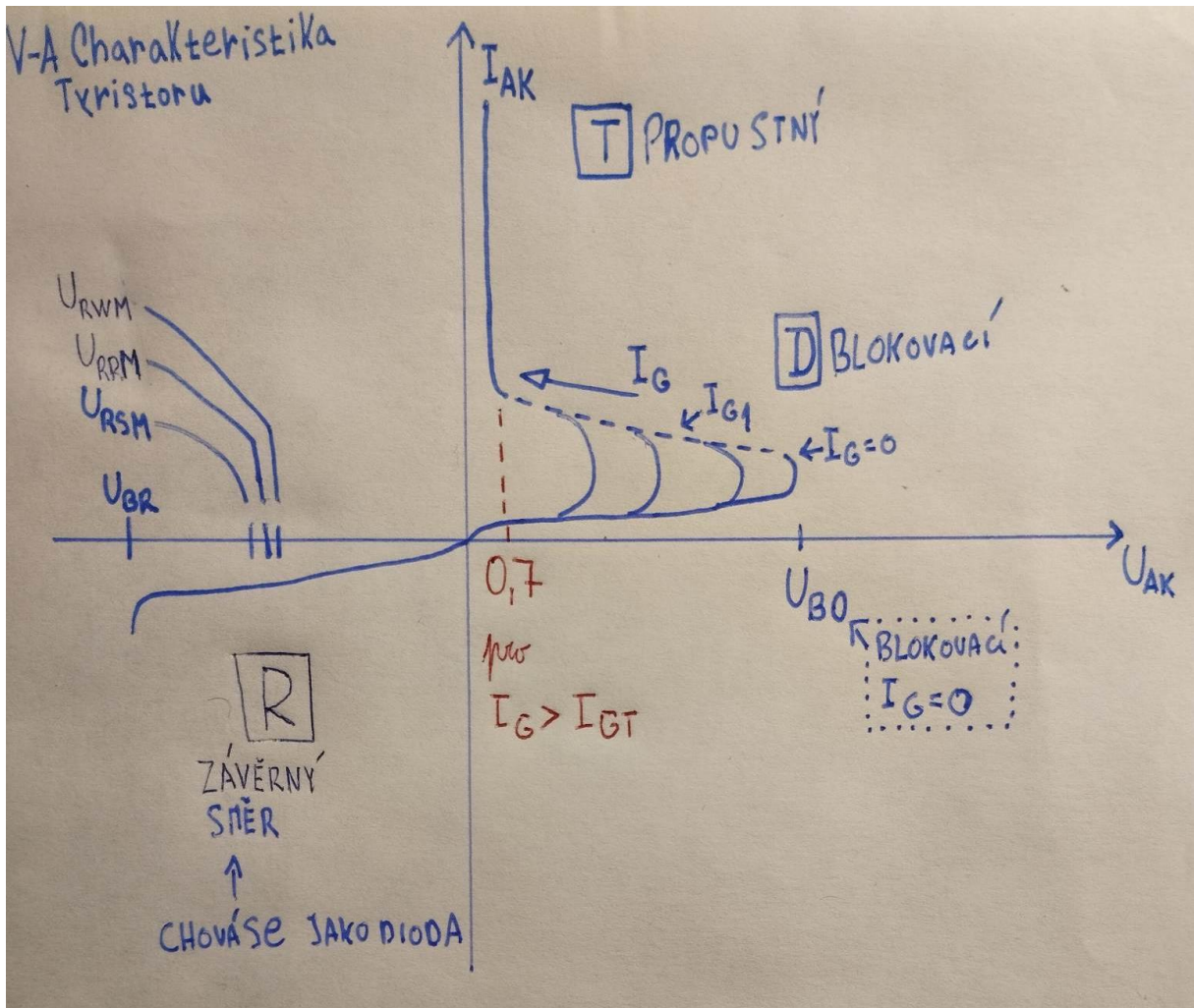
Tyristor



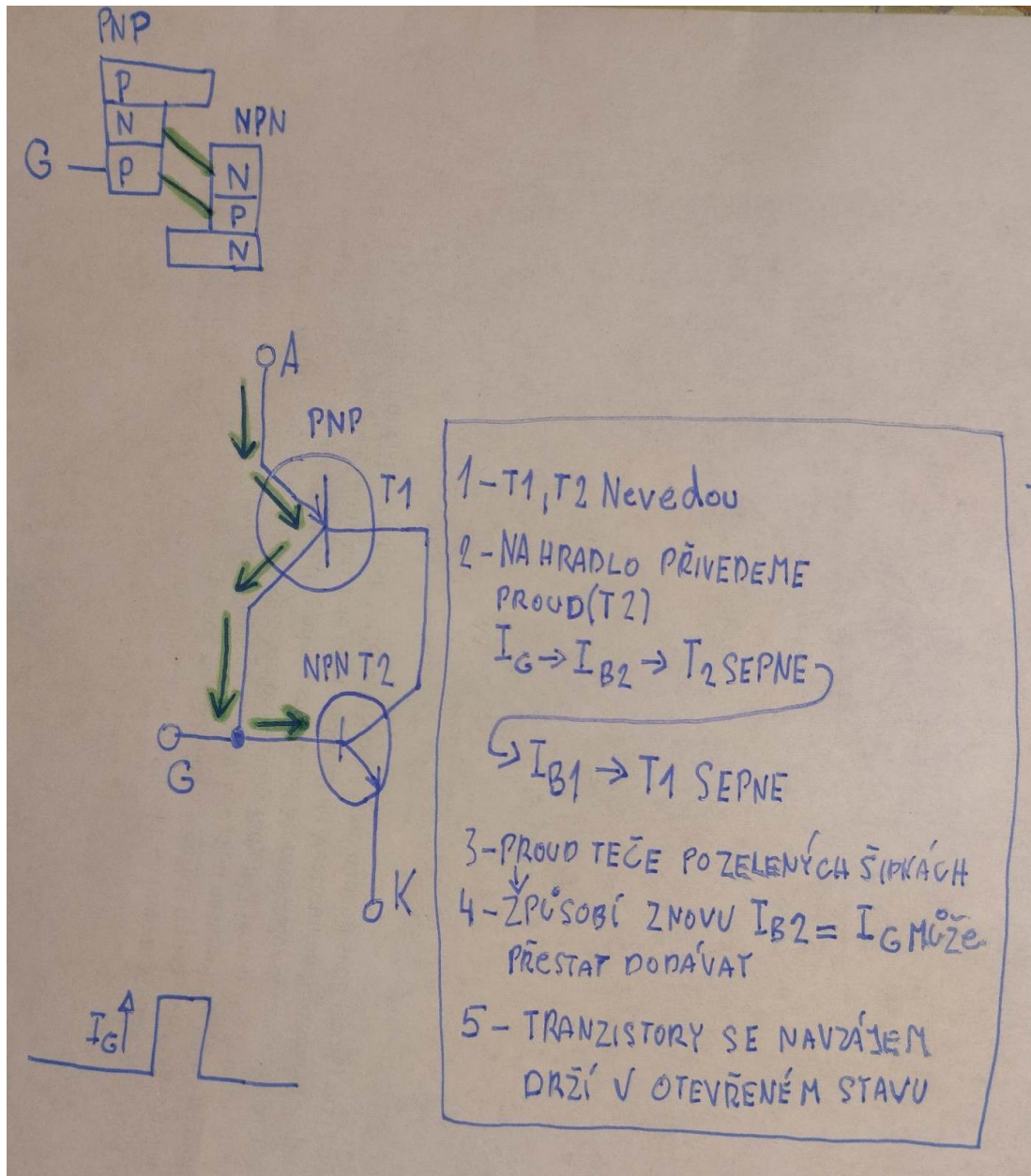
Vypínací tyristor GTO (Gate Turn Thyristor Off)

- U běžných tyristorů GTO je strmost nárůstu řídicího proudu pro vypnutí I_{RG} omezena indukčností zapojenou v sérii s napájecím zdrojem U_{RG} . Tyristor je potom schopen vypínat proudy do jednotek kA (je-li pro takové proudy vyroben) s vypínací dobou přibližně 100 μ s.
- Napěťové a proudové parametry vypínacích tyristorů běžně dosahují hodnot U_{FD} (napětí v propustném směru) = 4,5 kV, I_{TAV} (průměrný propustný proud) = 3 kA.
- Vypínací GTO tyristory jsou určeny především pro trakční aplikace a těžké průmyslové pohony, kde instalované výkony přesahují 500kW.
- **Aktuálně jsou využity např. ve vlakových soupravách "Pendolino", kde jsou v trakčních měničích použity chladicím médiem chlazené výkonové GTO tyristory od firmy Westcode.**

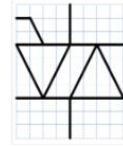
VA-Charakteristika Tyristoru



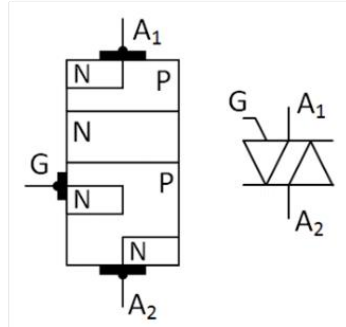
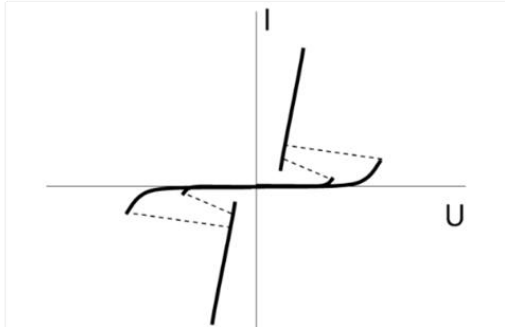
Chování tyristoru - princip



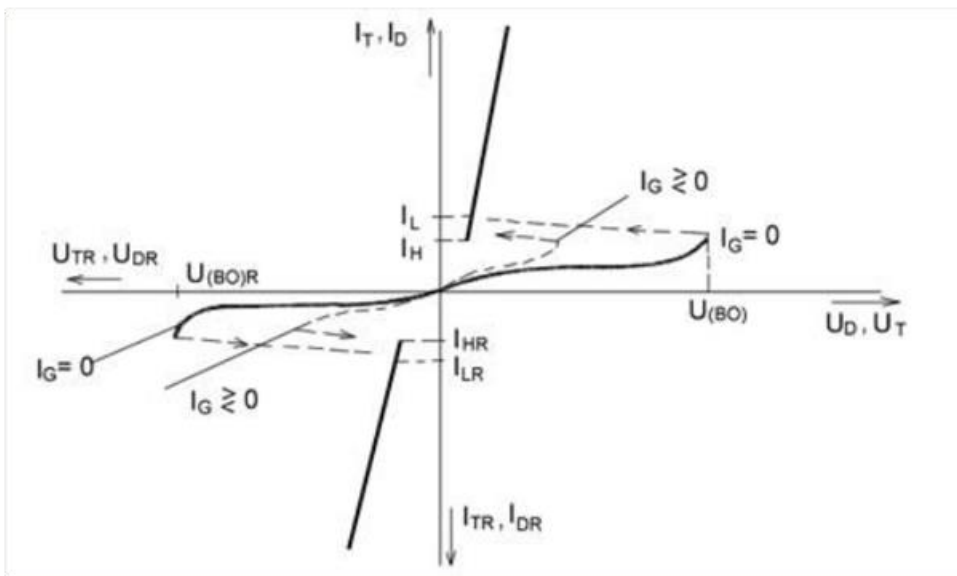
Triak



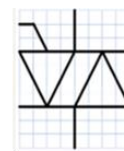
- Je speciální varianta obousměrného tyristoru pro spínání obou polarit napětí ("**střídavý spínač**"), zvládá ovšem jenom menší výkony.
- Triak se využívá **pro regulaci výkonu střídavých motorů nižších výkonů**, například ve vysavačích nebo vrtačkách.
- Hlavní katalogové hodnoty pro výběr triaku jsou maximální napětí U_{RRM} a maximální proud I_F .



záleží, jestli bude chtít VA charakteristiku pospat dopodrobna



Triak



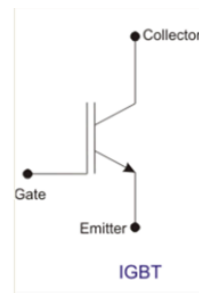
Spínání triaků

- Spínání triaků se uskutečňuje stejnými způsoby jako spínání tyristorů.
- Nejčastěji je spínání uskutečňováno pomocí řídicí elektrody. Vliv velikosti proudu hradla I_G na spínání je stejný jako u tyristoru. Jako u tyristoru je okamžik sepnutí triaku závislý nejen na hodnotách U_G i I_G , ale také na teplotě přechodů θ_j .
- Struktura triaku umožňuje spínání při obou polaritách anodového napětí U_{A1A2} i řídicího napětí U_G , tedy ve všech čtyřech kvadrantech.
- Kombinace polarit napětí U_{A1A2} a proudů I_G umožňuje čtyři možnosti. Pro jakoukoliv polaritu napětí U_{A1A2} je vždy jeden tyristor v závěrném směru a druhý v blokující oblasti V-A charakteristiky.

Vypínání triaků

- Protože jsou triaky používány téměř výhradně pro spínání střídavých proudů, je jejich vypínání zajišťováno stejně jako u tyristorů přirozenou komutací střídavého napětí.
- Vzhledem k poměrně složité struktuře má triak oproti tyristoru menší odolnost proti rychlému nárůstu spínaného napětí du/dt a strmosti zmenšení proudu di/dt , ke kterému dochází při vypínání. Čím je rychlejší změna proudu, tím více zůstává v okamžiku vypnutí triaku nerekombinovaných elektrických nábojů. Čím je větší du/dt , tím je větší pravděpodobnost, že budou některé z těchto nosičů náboje vytvářet proud hradla.
- Při odporové zátěži je proud procházející triakem ve fázi s napětím a při vypnutí triaku prochází napětí nulou zároveň s proudem.
- Při indukční zátěži, kdy dochází k fázovému zpoždění proudu za napětím, vzniká nebezpečí samozapnutí. Při průchodu proudu nulou je napětí maximální, proto při vypnutí triaku v okamžiku, kdy proud je nulový, dojde k prudké změně napětí na triaku, takže rychlost změny du_{A1A2}/dt je velká a dojde ke spínání kapacitním proudem. Přitom může dojít k jeho zničení.
- **Kmitočtový rozsah, ve kterém může triak pracovat, je mnohem menší než u tyristorů** a omezuje se prakticky na oblast kmitočtů elektrorozvodné **napájecí sítě 50 Hz**. Nejvyšší provozní kmitočet se pohybuje ve stovkách hertzů (např. 400Hz).

IGBT tranzistor

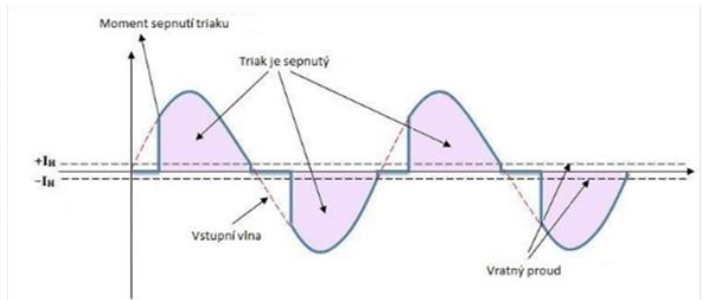
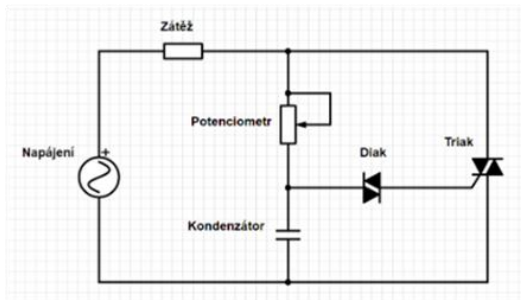


IGBT – Insulated Gate Bipolar Transistor

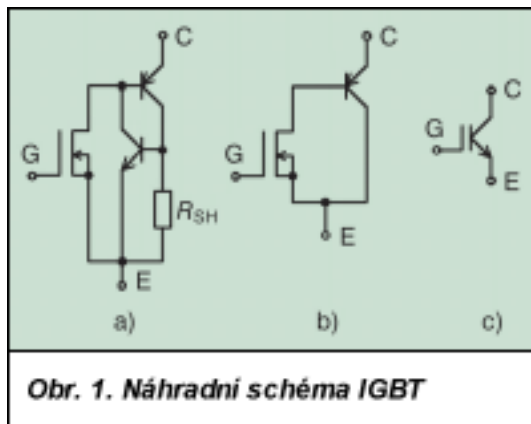
- speciální polovodičová struktura
- IGBT se používá jako spínací tranzistor, nepoužívá se k zesilování
- chová se jako bipolární tranzistor řízený unipolárním tranzistorem, tedy napětím
- hlavní výhody: velké závěrné napětí, malý úbytek napětí (a ztráty) ve vodivém stavu
- mezní parametry: jednotky kA, jednotky kV, spínací f desítky kHz
- Použití: běžně v trakčních pohonech vozidel MHD, ale i v trakčních pohonech drážních vozidel s napětím 3 000 V. Díky výborným frekvenčním vlastnostem IGBT a díky neustálému vývoji směřujícímu ke zvyšování proudových a napěťových hladin lze v současnosti tento prvek považovat za velmi perspektivní pro výkonovou elektroniku.
- Předností prvků IGBT je možnost dosáhnout poměrně velké spínací frekvence díky krátkým spínacím časům.
- **Rychlost sepnutí** je velká – **řádově desítky μs až 1 μs** a je ovlivněna rychlostí nabíjení kapacity řídicí elektrody.
- **Rychlost vypínání je asi 3x nižší** než rychlost zapínání, neboť vysoké hodnoty du/dt při vypínání vedou ke vzniku posuvných proudů, které mohou ovlivnit již zmíněnou parazitní tyristorovou strukturu. Aby nedošlo k nežádoucímu sepnutí vlivem velkému du/dt ve vypnutém stavu, je zpravidla v tomto stavu připojena řídicí elektroda k zápornému napětí.

Využití triaků

Při regulaci výkonu triakem dochází k „osekávání“ sinusové vlny. Z toho důvodu je triak nevhodný pro aplikace kde bude docházet k usměrňování na stejnosměrný proud, jelikož výstup z triaku nelze dobře vyhladit a navíc obsahuje napěťové (i proudové) špičky původní vlny.

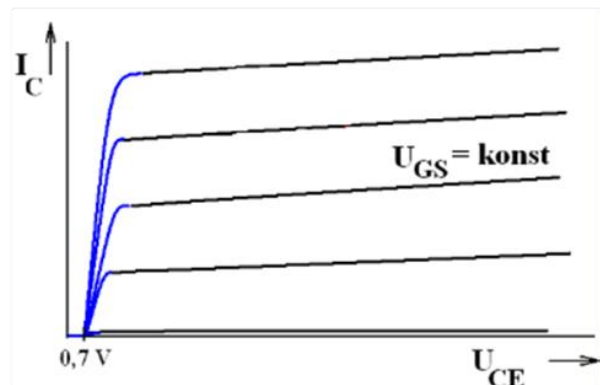


- **Kondenzátor** se postupně nabíjí přes **potenciometr**, kterým lze regulovat rychlost tohoto nabíjení (malý odpor - rychlé nabíjení, velký odpor – pomalé nabíjení)
- Jakmile dosáhne napětí na kondenzátoru hodnoty spínacího napětí **diaku a řídicí elektrody triaku**, začne **diak** propouštět proud do řídicí elektrody **triaku**.
- Příchodem proudu do řídicí elektrody triak sepne a je sepnutý, dokud půlvlna neklesne do okolí nuly - potom se celý proces opakuje.

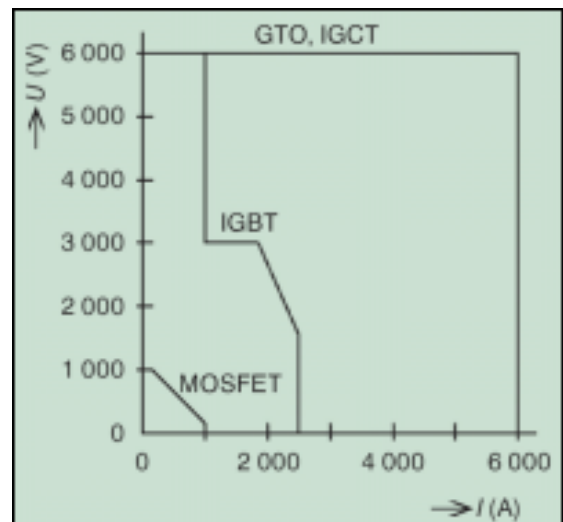
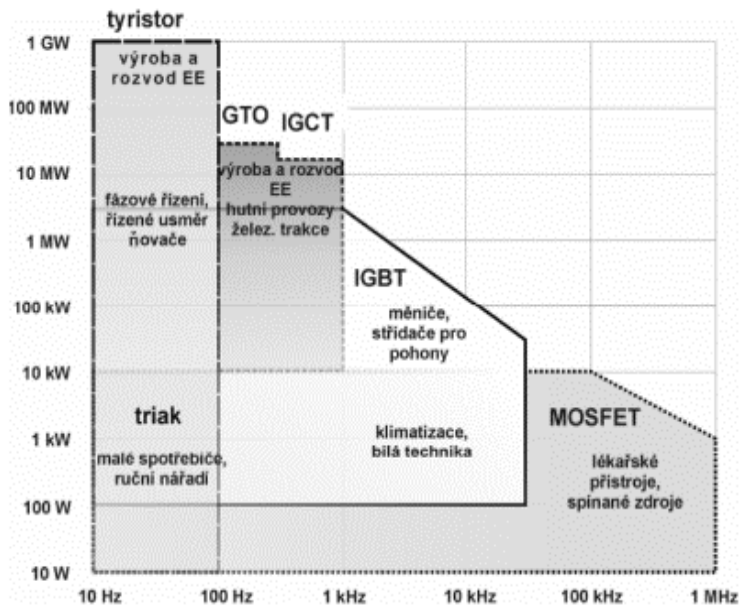


Obr. 1. Náhradní schéma IGBT

Výstupní voltampérové charakteristiky IGBT odpovídají charakteristikám FET. IGBT pracuje ve spínacím režimu, ve stavu sepnutí se tedy jedná o saturaci.



- oblast využití výkonových spínacích součástek z hlediska výkonu a frekvence



Obr. 4. Oblast využití výkonových polovodičových součástek

