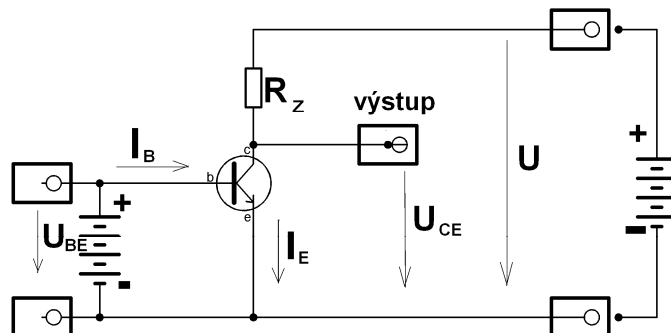


Tranzistor jako spínač

Použití tranzistoru jako spínače působí dojmem nejjednodušší technické aplikace této polovodičové součástky. Přesto přináší spínací provoz některé problémy, související s napětovým, proudovým či tepelným přetěžováním tranzistoru v různých spínacích obvodech.

1. Tranzistory v zapojení se společným emitorem:

Na obr.1 je naznačeno zapojení tranzistoru se společným emitorem. Aby přechodem báze-emitor procházel řídicí proud I_B , je zapotřebí poměrně malého potenciálního rozdílu mezi oběma elektrodami. Úbytek U_{BE} lze odhadnout na hodnotu asi 0,5V, takže je podstatně menší než napájecí napětí zdroje U , jež bývá 10 až 100V.



obr.1 Tranzistor jako spínač

V zapojení tranzistoru se společným emitorem lze tedy malým vstupním proudem I_B a napětím U_{BE} řídit na výstupu tranzistoru velký proud I_C a měnit výstupní napětí (úbytek $R_Z I_C$ na zatěžovacím odporu R_Z). Z tohoto důvodu se ve spínacích obvodech používá téměř výhradně právě zapojení se společným emitorem.

2. Zbytkový proud I_{CE0} :

Pro provoz tranzistoru jsou nejdůležitější jeho mezní stavy, kdy je buď **vypnut**, tzn. **uzavřen** analogicky – kontakty spínače jsou rozpojeny), nebo **sepnut**, tzn. **plně otevřen** (analogicky – kontakty spínače jsou sepnuty) a dále přechodové děje, jež probíhají, jestliže tranzistor přechází z jednoho stavu do druhého.

Nejprve si popíšeme stav **rozepnutí** tranzistoru. Zatím co spínačem žádný proud neprochází, tranzistorem prochází zbytkový proud I_{CE0} , když na vstup tranzistoru nepřivádíme žádný řídicí signál. Je vyvolán nepravidelností polovodičové struktury, z níž byl tranzistor vyroben. Zbytkový proud označujeme I_{CB0} , přičemž číslice **0** udává, že třetí elektroda, jejíž písmeno v indexu chybí, tedy báze, je **odpojená**.

3. Zbytkový proud I_{CER} :

Provozní stav, popsáný v bodě 2, se v praxi vyskytuje velmi zřídka. Daleko častěji bývá na vstupu tranzistoru zapojen odpor R_B . Příslušný zbytkový proud, procházející kolektorem, se v tomto případě označuje podle normy jako I_{CER} a je podstatně menší než proud v případě odpojené báze I_{CE0} . Důvod poklesu zbytkového proudu je, že jeho část je svedena odporem R_B , zapojeným mezi bází a emitorem a nemůže se podílet na zesilovacím ději.

Čím je odpor R_B menší, tím více klesá hodnota zbytkového proudu, protože větší část proudu, vstupujícího do kolektoru, prochází přechodem kolektor-báze přímo zpět do kolektorového obvodu.

4. Zbytkový proud I_{CES} :

Z obrázku můžeme soudit, že nejmenší zbytkový proud prochází kolektorem v případě, že odpor R_B má nulovou hodnotu, to znamená báze a emitor (vstup tranzistoru je ve zkratu. Příslušný zbytkový proud se označuje jako I_{CER} daného tranzistoru.

5. Zbytkový proud I_{CB0} :

Zbytkový proud I_{CB0} můžeme dále potlačit přivedením napětí hodnoty asi 0,5 až 1V (odpovídá zhruba logické nule – 0), působícím mezi bází a emitorem. Jeho polarita musí být opačná než polarita napětí, jímž tranzistor otevíráme, tzn. řídíme. V případě tranzistoru NPN musí být tedy potenciál báze záporný oproti potenciálu emitoru. Příslušný zbytkový proud kolektoru se přibližně rovná proudu I_{CB0} , to je zbytkovému proudu kolektor-báze, emitor naprázdno. Závěrné napětí právě způsobuje, že emitorem neprochází žádný proud, takže emitor je jakoby odpojen.

6. Závislost zbytkového proudu na napětí emitor-kolektor:

Velikost zbytkového proudu závisí jednak na hodnotě odporu, zapojeného mezi bází a emitorem, ale kromě toho i na velikosti napětí, přiloženého na tranzistor (napájecím napětí). Po dosažení kritické hodnoty tohoto napětí se zbytkový proud výrazně zvětšuje. Kritickou hodnotu napětí označujeme jako **průrazné napětí**. Pokud je v provozu překročíme, dojde ke zničení tranzistoru.

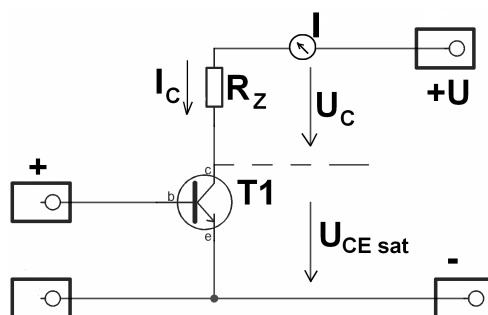
7. Tranzistor ve vodivém stavu:

Jestliže na vstup tranzistoru přivedeme dostatečně velké napětí, přejde tranzistor do vodivého stavu, otevře se, **sepne**.

Tranzistorem a zatěžovacím odporem R_Z prochází kolektorový proud I_C , určený napájecím napětím U a hodnotou zatěžovacího odporu R_Z .

8. Zbytkové (saturační) napětí:

V předchozích případech jsme zanedbatelný odpor sepnutého (plně otevřeného) tranzistoru. Tento předpoklad není ve skutečnosti přesně splněn. I plně otevřený tranzistor vykazuje jistý odpor dráhy kolektor – emitor, na němž se při průchodu proudu objevuje zbytkové **saturační napětí $U_{CE sat}$** (sat je z anglického **saturation** – **nasycení**).

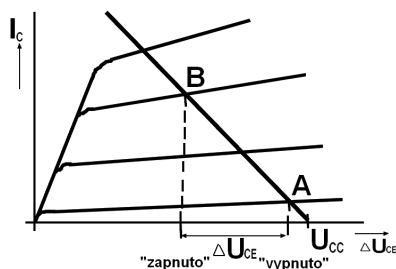


obr.2 Saturační napětí $U_{CE sat}$

9. Určení saturačního napětí tranzistoru:

Běžné hodnoty saturačního napětí se pohybují podle druhu tranzistoru mezi 0,2 až 1V. V mnoha technických aplikacích tento nepatrný úbytek nevadí. Pokud jej nemůžeme připustit, což se týká hlavně spínání větších výkonů, lze jej poměrně jednoduše zmenšit.

Na obr.3 jsou naznačeny výstupní charakteristiky tranzistoru v oblasti malých napětí mezi kolektorem a emitorem a dále odporová přímka pro zvolenou hodnotu odporu R_Z . Z průběhů zjistíme, že již při poměrně malém řídícím proudu $I_B = 1\text{mA}$ dosahujeme téměř největšího možného kolektorového proudu $I_C = 100\text{mA}$, přičemž saturační napětí má hodnotu 0,4V. Vzroste-li proud báze z hodnoty 1mA na $I_B = 2\text{mA}$, sníží se hodnota saturačního napětí z 0,4 na 0,2V. Potřebný řídící příkon je přibližně dvojnásobný ve srovnání s prvním případem, protože napětí U_{BE} se téměř nezměnilo.



Obr.3 Výstupní charakteristiky tranzistoru

10. Aktivní pracovní oblast tranzistoru:

Přechod tranzistoru z nevodivého do vodivého stavu nebo obráceně neprobíhá s nekonečnou rychlostí. Během přechodového děje se postupně mění velikost proudu a napětí na tranzistoru. Během zapínací doby vzrůstá proud z malých hodnot na konečnou hodnotu ustáleného stavu a napětí klesá z velké hodnoty postupně na malou hodnotu $U_{CE\text{ sat}}$. Během vypínání tranzistoru je tomu naopak. Mimo oba krajní stavy se na tranzistoru objevuje jisté napětí vyšší než saturační a nižší než napětí zdroje, všemi elektrodami tranzistoru procházejí proudy a tranzistor se chová tak, jako zesilovč. Říkáme, že se chová jako **aktivní prvek**.

11. Zapínací doba tranzistoru:

Jakmile přivedeme na řídicí přechod kladné napětí báze proti emitoru (tranzistor NPN) (záporné předpětí u PNP), začíná procházet tímto přechodem proud báze a pracovní bod na charakteristice se posouvá z bodu A k bodu B. Tranzistor přechází ze stavu, kdy se na něm objevilo napětí zdroje U a kolektorem procházel zbytkový proud, do stavu, kdy mezi kolektorem a emitorem působí saturační napětí a kolektorem prochází velký proud zatěžovacího odporu.

Na počátku i na konci tohoto děje lze zjistit pomalejší pohyb bodu po charakteristice. Pro přesnější určení **zapínací dobu** t_{on} **definujeme** jako součet **doby zpoždění impulsu** t_d a **doby náběhu impulsu** t_r , což je časový interval mezi okamžiky, kdy proud nabyl 10% a 90% konečné hodnoty, příslušné ustálenému stavu.

$$t_{on} = t_d + t_r$$

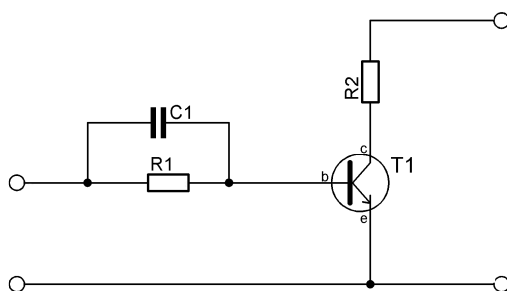
12. Činitel nasycení:

Zapínací dobu tranzistoru můžeme zkrátit tím, že zvětšíme amplitudu řídicího signálu. Bází tedy prochází větší proud, než jak je zapotřebí k tomu, aby se tranzistor plně otevřel. Poměr proudu I_B , který prochází bází, ku proudu $I_{B(s)}$, který je zapotřebí k tomu, aby se tranzistor dostal na mez nasycení, tzn. sepnul, nazýváme **činitel nasycení**.

$$k_s = I_B / I_{B(s)}$$

13. Přesycení tranzistoru v období spínacího pochodu:

Později se dovíme, že zvětšení proudu báze nad hodnotu, potřebnou k sepnutí (tzv. přesycení tranzistoru) působí nepříznivě na vypínací děj tranzistoru. Z tohoto důvodu je výhodné zvětšit proud báze pouze během přechodného děje, probíhajícího při spínání tranzistoru. Vhodné zapojení je na obr.4.



Obr.4 Zlepšení přesycení

Připojíme-li řídicí napětí na vstupní svorky obvodu, chová se v první chvíli nenabitý kondenzátor jako zkrat, takže velký nabíjecí proud kondenzátoru, procházející současně řídicím přechodem tranzistoru, urychlí značně spínací děj. Proud, potřebný k trvalému sepnutí tranzistoru, se nastaví odporem R1 (též značený jako R_B).

14. Komutační poměr:

Doba přesahu t_s je tím delší, čím větší jsme zvolili činitel nasycení při spínání tranzistoru. Tento jev vysvětlíme snadno. Báze je zaplaven nadbytečným počtem nosičů nábojů, které je nejprve nutno z prostoru přechodu PN odvést, než začne klesat kolektorový proud. K odčerpání nosičů nábojů dochází tím, že přechodem projde proud v opačném směru (od emitoru k bázi tranzistoru NPN), nazývaný **proud komutační**. Doba přesahu je tím kratší, čím je komutační proud větší. Poměr komutačního proudu I_{Bk} k proudu, který přivádí tranzistor právě na mez nasycení $I_{B(s)}$ (článek 12) označujeme jako **komutační poměr k_k**

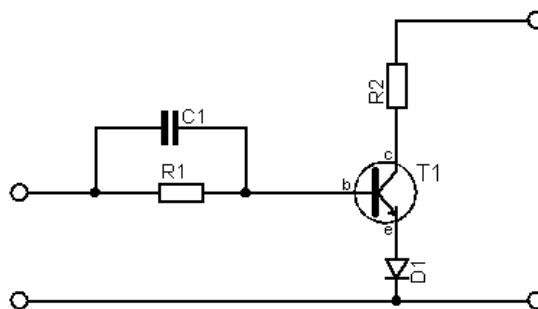
$$k_k = I_{Bk} / I_{B(s)}$$

15. Vliv komutačního proudu na vypínání tranzistoru:

Velký komutační proud zkracuje jak dobu přesahu t_s , tak i dobu týlu t_t . K odčerpání volných nosičů nábojů z prostoru báze dochází i během doby týlu. Doba týla však neovlivňuje stupeň přesycení tranzistoru v době, kdy byl sepnut (tedy hodnota činitele nasycení k_s), protože přebytečné nosiče nábojů, vyvolávající přesycení tranzistoru, byly odčerpány z báze již během doby přesahu.

16. Zvětšení komutačního poměru:

Velký komutační proud můžeme získat např. tak, že na bázi tranzistoru NPN přivedeme pomocné záporné napětí oproti emitoru. Uvedený způsob ovšem komplikuje a zdražuje celý spínací obvod, proto se zpravidla užívá jednodušší opatření. Často nacházíme řešení, uvedené na obr.5.

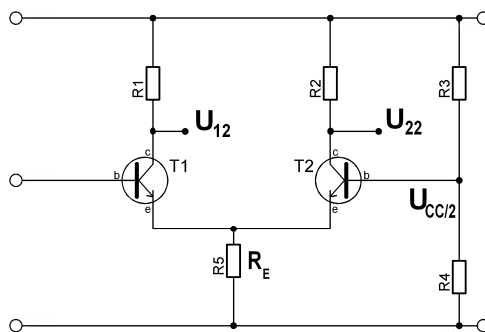


Obr.5 Zvětšení komutačního poměru

V přívodu k emitoru je zapojena propustně polarizovaná křemíková dioda, na níž se vytváří úbytek napětí hodnoty 0,5 až 0,7 V. Vypínáme-li tranzistor (např. zkratováním jeho vstupních svorek), je potenciál báze zápornější o 0,5 až 0,7 V než potenciál emitoru. Ke zvětšení komutačního proudu přispívá i kondenzátor C_1 , užívaný k přechodnému zvýšení činitele nasycení (článek 12). Na počátku vypínacího děje je nabit na vyznačenou polaritu a dodává tak přídatné napětí, jak se sčítá s úbytkem na křemíkové diodě během vybíjení tranzistoru.

Spínání proudu:

Je-li třeba zabránit nasycení, použijeme **tranzistorový rozdílový zesilovací spínač**, který pracuje na **principu spínání proudu**. (obr.6)



Obr.6 Princip spínání proudu

Je-li napětí báze tranzistoru T_1 blízké nule, je T_1 uzavřen. Protože napětí báze tranzistoru T_2 je $U_{CC}/2$, T_2 bude otevřen. Tím může být na diodě báze-emitor T_2 jen malé napětí U_{BE} , což znamená, že úbytek napětí na R_E musí být přibližně $U_{CC}/2$. Rezistorem R_E prochází proud, ačkoliv emitorový proud T_1 je blízký nule. Tomu odpovídá v obr.3 stav „vypnuto“, tj. napětí U_{21} se přibližně rovná U_{CC} .

Je-li U_1 kladné napětí, které je větší než $U_{CC}/2$, tranzistor T_1 se otevře a napětí emitorů obou tranzistorů stoupne směrem k potenciálu $+U_{CC}$, takže předpětí pro tranzistor T_2 klesne a T_2 se uzavře (stav „zapnuto“ na obr.3). Proud rezistorem R_E bude nyní procházet přes T_1 a napětí U_{22} bude přibližně $U_{CC}/2$. Zapojení se tedy chová podobně jako mechanický spínač proudu.

Obzvláště důležité je, že volbou odporů kolektorových rezistorů lze dosáhnout jen malé změny ΔC_{CE} (viz charakteristiky na obr.3). Volíme tedy odpory tak, že při běžném napětí $U_{CC} = 5,2V$ je na nich úbytek 1 až 2 V. Odporová přímka probíhá potom tak strmě, že bod zapnutí (otevření) tranzistoru T_1 již neleží v oblasti nasycení, ale v normální pracovní oblasti charakteristik. Protože zde není nutné přenášet přebytečné náboje, mají tyto tranzistorové spínače vysokou spínací rychlost. Nedostatkem je, že nelze v důsledku malé změny výstupního napětí měnit napájecí napětí a že je nutné předpokládat zvýšenou spotřebu energie, protože obvodem vždy prochází proud.

Stav nasycení můžeme zcela odstranit metodou spínání proudu. Uvedený způsob se často používá v technice integrovaných obvodů. Převažuje ve výpočetních prostředcích, kde je kladen důraz na rychlost sepnutí, zatímco tam, kde je vyžadována velká spolehlivost, se dává přednost spínačům využívajícím oblast nasycení.