

Tranzistor polopatě

Ing. Jiří Bezstarosti

Úlohou toho článku není vysvětlit fyzikální činnost tranzistoru, ale spíše naznačit způsoby jeho použití. Zároveň se tento článek bude snažit vysvětlit problematiku tak, aby ji byl schopen pochopit i začátečník. Budeme se v něm zabývat spínáním zátěže tranzistorem, naučíme se rozsvěcet LED, spínat relé a převádět napěťové úrovně.

Tranzistor jako spínač

V praxi elektronika se velmi často setkáte se situací, kdy potřebujete výstupem MCU (Micro Controller Unit – jednočipový mikropočítač) nebo logickým obvodem spínat výkonovou svítivou diodu (LED), přitom ale je maximální povolený proud, dodávaný výstupem výše zmíněných obvodů menší, než je proud potřebný pro dostatečný svit této LED. Stejně často potřebujeme pomocí logických výstupů spínat relé, elektrický motorek, reproduktor atd. Ve všech těchto případech použijeme pro spínání připojených zařízení tranzistor, zapojený se společným emitorem.

Výstup z logického obvodu či MCU může mít napěťové úrovně blízké 0 V (0,1 – 0,4 V) pro nízkou úroveň (L), a 2,4 až 4 V pro vysokou úroveň (H). Moderní součástky ale již poskytují v úrovni H napětí, blízké se napětí napájecímu, takže například při napájecím napětí obvodu 5 V můžeme počítat s napětím v úrovni H asi 4,9 V. Protože ale, jak již bylo zmíněno, potřebujeme často spínat větší proudy, než může poskytnout výstup logického obvodu nebo MCU a také často potřebujeme spínat napětí vyšší, než je napájecí napětí logických obvodů, pro spínání připojené zátěže použijeme tranzistor s vodivostí typu NPN. Jeho elektrické parametry volíme především podle velikosti proudu, který pro svou činnost potřebuje připojené zařízení a který tedy také poteče spínacím tranzistorem. Postup návrhu si předvedeme na konkrétním příkladu.

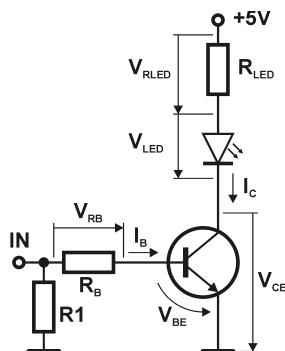
Spínaným zařízením bude v tomto případě žlutá Auto LED, kterou může téci maximální proud 70 mA a úbytek napětí na LED bude při tomto proudu 2,3 V. Protože celé zapojení budeme napájet v tomto příkladu ze stabilizovaného napětí 5 V a proud tranzistorem nepřekročí 70 mA, postačí nám ke spínání běžný tranzistor NPN.

Zvolme typ BC548B. Nahlédnutím do katalogového listu zjistíme nejdůležitější parametry tohoto tranzistoru, které se označují jako „Absolute maximum ratings“ nebo jen „Maximum ratings“. Zde se dozvíme, že maximální napětí kolektor-emitor (V_{CE}) je pro tranzistor BC548B rovno 30 V a že maximální povolený proud kolektorem tranzistoru (I_C) je 100 mA. Nebudme překvapeni, že v katalogových listech různých výrobců můžeme najít poněkud odlišné technické údaje. Protože ale většina čtenářů bude nakupovat v maloobchodech, kde si není možné tranzistor vybrat podle výrobce, musíme při návrhu brát v úvahu nejnižší možné hodnoty.

Dalšími technickými údaji, které musíme znát, je proudový zesilovací činitel (anglicky DC current gain), označovaný h_{FE} . U námi zvoleného tranzistoru BC548B je jeho minimální udávaná hodnota $h_{FE} = 200$. Dále pak musíme znát saturační napětí mezi kolektorem a emitorem (anglicky Collector-Emitter Saturation Voltage), označované V_{CEsat} . Velikost V_{CEsat} se mění podle proudu kolektorem I_C a je pravděpodobné, že v katalogovém listu naleznete jeho velikost jen pro vybrané hodnoty kolektorového proudu. Navíc uvedené hodnoty budou mít u jednotlivých tranzistorů značný rozptyl. Řekněme si tedy, že pro proud 70 mA, který může maximálně téct zvolenou LED, bude napětí V_{CEsat} přibližně 0,4 V. Poslední hodnotou, důležitou pro náš účel, je saturační napětí mezi bází a emitorem (anglicky Base-Emitter Saturation Voltage), označované V_{BEsat} , tedy napětí mezi bází a emitorem při plně otevřeném tranzistoru. Tato hodnota je typická pro křemíkový

polovodičový přechod (tedy pro všechny běžné bipolární tranzistory) a je přibližně 0,65 V.

Nyní máme dostatek údajů k výpočtu hodnot rezistorů v celém zapojení (obr. 1).



obr. 1

Stanovme si, že LED poteče proud 50 mA. Nejprve tedy vypočteme hodnotu rezistoru R_{LED} , který je zapojený v sérii s LED a který omezí jí protékající proud na požadovanou velikost. Od napájecího napětí (5 V) odečteme úbytek napětí na LED (2,3 V) a úbytek napětí V_{CE} na sepnutém tranzistoru (0,4 V):

$$U_{RLED} = U_N - U_{LED} - V_{Cesat}$$

tedy

$$5V - 2,3 V - 0,4 V = 2,3 V$$

Po odečtení všech úbytků nám zbylo napětí 2,3 V, které musí být ztraceno na rezistoru R_{LED} . Protože jsme si zvolili, že LED poteče proud 50 mA, který pochopitelně poteče také rezistorem R_{LED} , zjistíme z Ohmova zákona ($R=U / I$), že hodnota rezistoru R_{LED} je 2,3 V / 0,050 A, tedy $R = 46$ ohmů. Nejbližší běžně vyráběná hodnota rezistorů je 47R (písmeno R se používá v označení rezistorů do hodnoty 1 000 ohmů místo znaku omega – ohm).

V jednoduchých elektronických zapojeních, které zde popisujeme, je dost obtížné a i zbytečné být naprosto přesný, protože i hodnota V_{CEsat} byla jen odhadnuta z katalogových údajů, a má značný rozptyl mezi jednotlivými kusy tranzistorů. Spokojíme se tedy s tím, že LED poteče proud:

$$2,3 V / 47R = 0,049 A$$

tedy zhruba požadovaných 50 mA. Ztrátou napětí 2,3 V na rezistoru R_{LED} vznikne výkonová ztráta, která přemění elektrickou energii v teplo. Musíme tedy zjistit, zda rezistor nebude vzniklým teplem poškozen. Úbytek napětí na rezistoru jsme vypočetli na 2,3 V, proud rezistorem 50 mA, tedy výkonová ztráta P na něm je rovna:

$$P = U_{RLED} * I_{LED}, \text{ tedy } 2,3V * 0,05A = 0,115W$$

Z uvedeného výpočtu je jasné, že rezistor R_{LED} s hodnotou 47R nám bude stačit v běžném provedení s povoleným zatížením 0,6 W.

Nyní určíme hodnotu báze rezistoru R_B . Víme, že proud I_C , což je z našeho příkladu našim příkladu proud tekoucí LED, může být maximálně h_{FE} krát větší, než proud I_B . Pokud se tranzistor používá jako spínač, volí se hodnota proudu báze I_B alespoň trojnásobně větší, než jaká je potřeba pro plné otevření

tranzistoru. Proud bází tedy stanovíme na:

$$I_B = (I_C / h_{FE}) * 3, \text{ tj. } (0,05 \text{ A} / 200) * 3 = 0,00075 \text{ A}$$

Dále předpokládejme, že vysoká výstupní úroveň (H) z logiky, kterou spínáme tranzistor, dosahuje téměř napájecího napětí, tj. 5 V. Vypočteme potřebný úbytek napětí na rezistoru R_B .

$$\begin{aligned} U_{RB} &= V_{IN} - V_{BE} \\ &\text{tedy} \\ 5 \text{ V} - 0,7 \text{ V} &= 4,3 \text{ V} \end{aligned}$$

Rezistorem R_B má téct proud 0,00075 A, tedy 0,75 mA a vytvořit na něm úbytek napětí 4,3 V. Výpočtem pomocí Ohmova zákona zjistíme, stejně jako výše, že hodnota je:

$$R_B = 4,3 \text{ V} / 0,00075 \text{ A}, R_B = 5 \text{ 733}\Omega$$

Nejbližší nižší běžně vyráběnou hodnotou je 5 600 ohmů, označovaná 5k6, kterou v zapojení použijeme.

Měli bychom také ověřit výkonovou ztrátu na tranzistoru. V tomto případě bude zanedbatelná, ale nemusí tak tomu být vždy, zvláště v případech spínání větších proudů v řádu jednotek ampér. V našem případě je výkonová ztráta na sepnutém tranzistoru zhruba:

$$\begin{aligned} P &= V_{CE} * I_C + V_{BE} * I_B \\ &\text{tedy} \\ 0,4\text{V} * 0,05\text{A} + 0,65\text{V} * 0,00075\text{A} &= 0,0204875\text{W} \end{aligned}$$

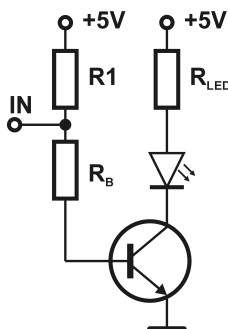
což je hluboko pod povolenou hodnotou, povolenou pro tranzistor BC548B.

A nyní už zbývá jediné: vysvětlit si, k čemu slouží rezistor, na obrázku 1 označený R1?

Pokud budeme tranzistor spínat výstupem logického obvodu, není třeba ho zapojovat, protože výstupní obvod logického členu má vždy definovanou logickou úroveň (buď L nebo H). Pokud ale tranzistor připojíme k výstupu MCU, (příkladem budiž třeba Microchip PIC), zjistíme, že tyto obvody mají po připojení napájení všechny vstupně výstupní vývody nastaveny ve vysoké impedanci, tedy zjednodušeně řečeno, odpojeny. A protože samozřejmě chceme, aby byl tranzistor v době, než se rozběhne program v MCU, zaručeně uzavřen, přidržíme ho v uzavřeném stavu rezistorem R1. Jeho hodnota není kritická, běžně se používá hodnota 10k, můžeme však použít i stejnou hodnotu jako pro R_B , tedy 5k6, čímž také minimalizujeme počet rozdílných hodnot rezistorů v zapojení.

Celé zapojení můžete snadno vyzkoušet zapojením v nepájivém poli a měřením se přesvědčit, že zvolený proud LED odpovídá skutečnosti a že přivedením napětí 5 V na bázi tranzistoru se LED rozsvítí a odpojením napětí, nebo připojením báze tranzistoru k zemi, LED zhasne.

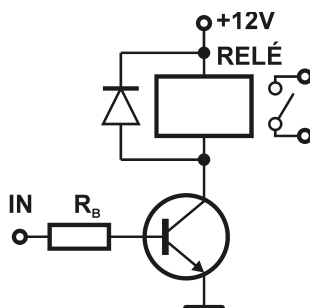
V některých případech se nám ovšem naopak může hodit, aby v době, kdy je řídicí vstup odpojen, LED svítila. Pak použijeme zapojení podle obrázku 2, kde ale budou jiné hodnoty rezistorů R_1 a R_B . V tomto případě by měl součet hodnot rezistorů R_1 a R_B odpovídat hodnotě R_B z obrázku 1. Pro zapojení v obrázku 2 zvolíme hodnoty R_1 a $R_2 = 2k7$, kdy jejich součet ($5k4$) je přibližně stejný, jako byla původní hodnota R_B ($5k6$). Opět se přesvědčíme že v takto jednoduchém zapojení drobné odchylky hodnot nehrají roli.



obr. 2

Spínání indukční zátěže

V některých případech je potřebné spínat indukční zátěž, tedy cívku, relé, reproduktorek atd. Jako příklad uvedeme spínání relé, u kterého teče vinutím tak velký proud, že už zcela mimo spínací možnosti výstupů logických obvodů a MCU. V tom případě použijeme zapojení z obrázku 3. Jak vidíte, zapojení je stejné, jako zapojení s LED, kterou ale v tomto případě nahradila cívka relé a zmizel předřadný rezistor, který byl zapojen v sérii s LED, protože pro relé není potřebný.

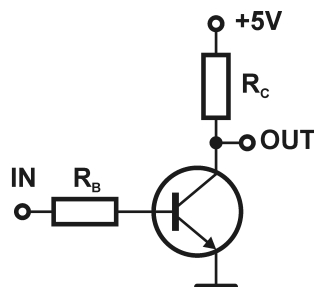


obr. 3

V tomto příkladu je použito relé s cívkou na napětí 12 V, u kterého je jeden vývod cívky spojen přímo s napájecím napětím a druhý vývod cívky je spojován tranzistorem s 0 V. Relé má ve svých katalogových údajích uveden odpor vinutí; tímto údajem je dán i proud, který vinutím relé při tomto napětí poteče. Příkladem může být relé RAS1215, které má odpor vinutí 400 ohmů. Při 12 V jeho vinutím podle Ohmova zákona teče proud:

$$12 \text{ V} / 400\text{R} = 0,03 \text{ A, tedy } 30 \text{ mA}$$

Potřebnou hodnotu rezistoru v bázi tranzistoru pak už dopočítáme stejným způsobem, jak bylo uvedeno výše. Protože ale hodnoty nemusí být nijak přesné, dá se říci, že pokud u tohoto relé a při 5 V logice použijete do báze BC548B stejný rezistor jako v předchozím případě, tedy 5k6, bude zapojení korektní. Na obrázku 3 si ještě povšimněme diody, zapojené paralelně k cívce relé. Cívka relé má totiž kromě elektrického odporu také indukčnost a tak rozpojením obvodu při zavření tranzistoru vznikne značně velká napěťová špička. Dioda, přemostňující cívku relé ochrání tranzistor před proražením vyšším napětím, než na jaké je dimenzován. V našem případě dobře vyhoví i běžná usměrňovací dioda 1N4007.



obr. 4

Převod napěťových úrovní

Dalším využitím tranzistoru může být převod napěťových úrovní (obrázek 4). Představme si, že máme zapojení, ze kterého dostáváme 3 V logické úrovně (tedy napětí ve stavu H je 3V nebo mírně menší) ale na výstupu je požadováno v úrovni H plné napětí 5 V. Z obrázku 4 je patrné, že pokud je na vstupu nízká logická úroveň (napětí blízké 0 V), pak je tranzistor rozepnut a na výstupu zapojení je napětí 5 V, protože přes tranzistor neteče proud. V okamžiku, kdy přivedeme vysokou logickou úroveň na vstup, tranzistor se sepne, tedy výstup spojí z 0 V a na výstupu je napětí (vzpomeňme na V_{CE}) blízké 0 V. Jistě už není třeba dodávat, že zapojení, které jsme si právě popsali, logickou úroveň H nejen převádí ze 3 V na 5 V, ale zároveň také invertuje, takže pokud je na vstupu logická úroveň H, na výstupu je úroveň L a opačně.

A jak vypočteme hodnoty rezistorů? Hodnotu R_C si zvolíme podle vlastností připojeného zařízení, protože ta určuje, jak můžeme výstup ve vysoké úrovni zatížit. Uvažujme, že R_C zvolíme 1k, tedy I_C (proud kolektorem tranzistoru) bude, při zanedbání úbytku napětí mezi kolektorem a emitorem tranzistoru, roven 5mA. Hodnota rezistoru R_B tak bude:

$$(3V - 0,65V) / ((0,005A / 200) * 3) = 31\,333 \text{ ohmů}$$

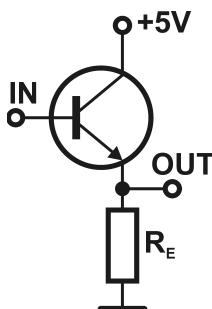
Tato hodnota odporu je už dosti velká, neuděláme tedy chybu, když použijeme rezistor s hodnotou nižší, například 10k. U tranzistoru, který je zapojen jako spínač se volí proud bází (I_B) 3x až 10x větší, než vychází z výpočtu I_C / h_{FE} . V každém zapojení a u každé součástky, se projevují různé parazitní kapacity, dané jejich konstrukcí, které se při průchodu proudem součástkou nabíjejí a vybíjejí. Používáním příliš vysokých hodnot rezistorů se pak stane, že spínání a rozpínání tranzistoru trvá delší dobu než je potřebné, což je pravým opakem toho co očekáváme, tedy co nejrychlejší sepnutí a rozepnutí. Při frekvenci spínání jedenkrát za sekundu jsou i delší časy sepnutí a rozepnutí nepodstatné, ale při vyšších frekvencích spínání se už mohou projevit tak, že nikdy nedojde k úplnému sepnutí nebo rozepnutí tranzistoru, napětí U_{CE} se zvýší a tím se začnou na tranzistoru zvyšovat výkonové ztráty. Čím vyšší frekvence pro spínání tranzistoru požadujeme, tím lépe bychom si měli rozvážit hodnoty rezistorů v obvodu tranzistoru.

Zbývá se zmínit ještě o jedné možnosti. Protože zapojení tranzistoru jako spínače je velice často používané, je jasné, že se výrobci snaží zjednodušit konstruktérům práci tím, že vytvořili celý obvod v integrovaném

provedení. Jedním z nejpoužívanějších obvodů je ULN2803A. Obsahuje uvnitř své struktury 8 tranzistorů i s rezistory v bázi a ke kolektorům připojenými ochrannými diodami pro spínání indukční zátěže. K dispozici máme tedy 8 vstupů a k nim 8 výstupů s otevřeným kolektorem. Otevřeným kolektorem je myšleno, že k výstupním pinu obvodu je připojen jen kolektor tranzistoru. K tomuto pinu obvodu můžeme připojit například relé tak, že jeden vývod vinutí relé připojíme ke kladné větvi napájecího napětí a druhý vývod k výstupu z ULN2803A. Protože, jak již bylo zmíněno, obvod ULN2803A ve vnitřní struktuře obsahuje i ochranné diody, můžeme připojit relé bez diody, která je zakreslena v obrázku 3, ale vývod COM obvodu ULN2803A musíme propojit s napájecím napětím. Tím spojíme katody ochranných diod s napájecím napětím a tedy paralelně k cívice relé. Obvod ULN2803A může spínat každým z osmi výstupů proud až 500 mA. Obvod ULN2803A ve skutečnosti neobsahuje jen samostatné tranzistory, ale v jeho vnitřní struktuře jsou zapojeny další tranzistory do takzvaného darlingtonova zapojení. To je ale pro základní popis činnosti nepodstatné, jen s tím rozdílem, že musíme při výpočtu uvažovat napětí U_{CE} přibližně 1,6 V proti desetinám voltu u jednoduchého tranzistoru. V katalogovém listu je uvedeno napětí U_{CE} až 1,6 V při 350 mA, tekoucím výstupem.

Zapojení se společným kolektorem

Všechna výše uvedená zapojení se nazývají zapojení tranzistoru se společným emitorem. Nyní si ukážeme ještě jedno zapojení – se společným kolektorem – obrázek 5.



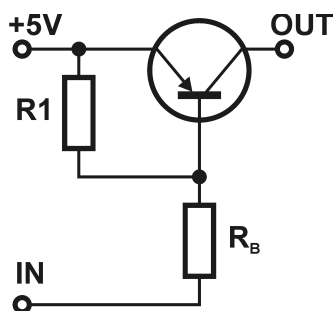
obr. 5

V zapojení se společným emitorem tranzistor zesiloval jak napětí, tak proud. V zapojení se společným kolektorem tranzistor zesiluje jen proud. Protože napětí V_{be} (napětí mezi bází a emitorem) je konstantní (pro přesnost – téměř konstantní), bude v zapojení z obrázku 5 na výstupu obvodu vždy stejné napětí, jako je napětí mezi bází a zemí, jen snížené o zhruba 0,65 V. Někdy se můžete setkat s názvem tohoto zapojení „emitorový sledovač“, protože napětí na emitoru proti zemi sleduje napětí na bázi proti zemi, s rozdílem uvedených 0,65 V.

Toto zapojení pro účely spínání už není tak praktické jako zapojení předchozí, a používá se většinou k jiným účelům. Uvedeno zde je především proto, aby si každý dobře uvědomil, že není totéž zapojit zátěž do kolektoru a nebo emitoru tranzistoru, a proč se tedy tranzistor, kterému připojíte malý elektromotor do emitoru, značně ohřívá.

Tranzistor s vodivostí PNP

Ve všech zde uvedených zapojeních jsou použity tranzistory vodivosti NPN. Jistě není žádnou novinkou, že existují také tranzistory vodivosti PNP. PNP tranzistory pracují stejně jako NPN, jen s opačnou polaritou. V zapojení se společným emitorem je u nich emitor připojen ke kladnému pólu napájecího napětí a tranzistor se otevírá proudem báze, tekoucím k zápornému pólu napájecího napětí. Protože tranzistor PNP se otevírá při napětí U_{BE} zhruba 0,65V pod úrovní napájecího napětí, je jeho přímé použití jako spínače problematické, protože výstupy některých logických obvodů takového napětí ani nedosáhnou (příkladem TTL úrovně) a nejsou tedy schopny přímo tranzistor PNP zavřít. Někdy se proto využívá kombinované zapojení s NPN tranzistorem, který teprve spíná PNP tranzistor. Většinou se takovéto komplikovanější zapojení používá v případech, kdy je potřeba připojit k zátěži kladný pól napájecího napětí a nikoli připojovat zátěž k zemi.



obr. 6

Na obrázku 6 je typické zapojení PNP tranzistoru. Na vstup IN se pak připojí otevřený kolektor NPN tranzistoru, nebo otevřený kolektor logického integrovaného obvodu, například 74LS07.