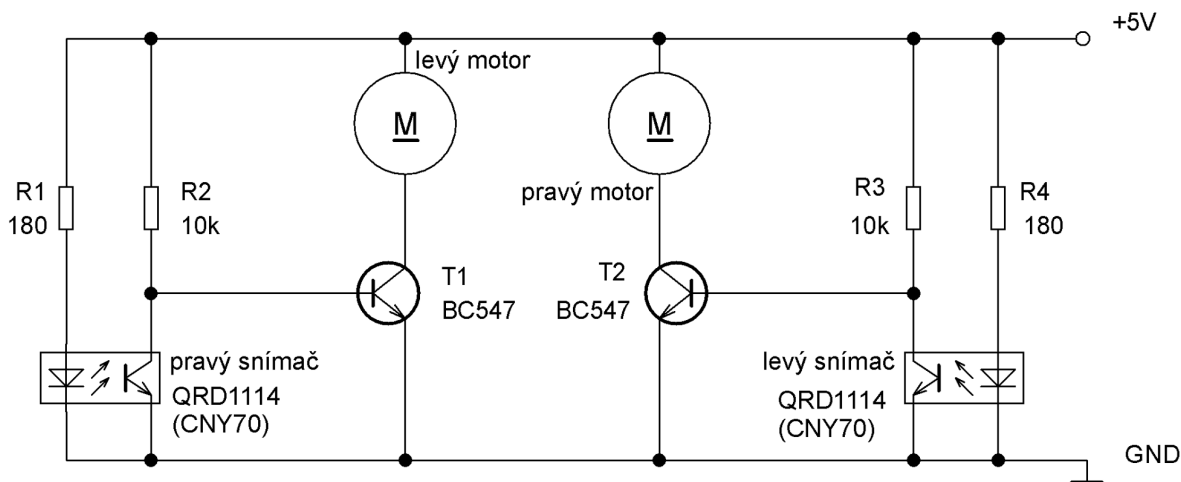


# Stopař pro začátečníky

## Miroslav Sámel

Před nějakou dobou se na <http://letsmakerobots.com/node/8396> objevilo zajímavé a jednoduché zapojení elektroniky sledovače čáry.

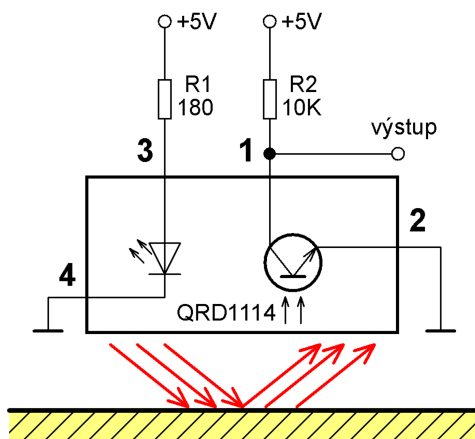
Zejména začínající robotáři mají problémy s integrovanými obvody a mikrokontroléry. Není jim jasná funkce obvodu, jsou nejistí při zapojování. Po zkušenostech s původním zapojením jsme obvod upravili s tranzistory NPN, které jsou pro začátečníky srozumitelnější. Takto upravený obvod je konstrukčně jednoduchý a jeho stavbu zvládne určitě i naprostý začátečník.



Zapojení vychází z IR (infračervených, Infra Red) snímačů **QRD 1114**, které tvoří dvojice IR LED a fototranzistor v jednom pouzdře. Tranzistory pro spínání motorů mohou být prakticky libovolné NPN, důležité je pouze aby vydržely proud, který ze zdroje odebírá motor. Pro naprostou většinu motorů postačí tranzistory **BC 547C**, které snesou proud 100 mA. Snímače **QRD 1114** lze nahradit snímači **CNY 70** bez dalších úprav obvodu.

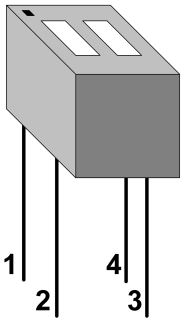
## Zapojení sledovače

### Popis snímače QRD 1114



Rezistory **R<sub>1</sub>** a **R<sub>4</sub>** omezují proud IR LED asi na 30 mA. LED osvětluje fototranzistor snímače odrazem od podkladu. Pokud se IR záření odráží od podkladu na fototranzistor, je fototranzistor osvětlený, jeho odpor je malý – tranzistor je otevřený, teče jím proud. Pokud se záření od podkladu neodráží, fototranzistor není osvětlený – je zavřený, proud jím neprochází.

Podle katalogových údajů reaguje snímač **QRD 1114** na vzdálenost menší než 6 mm, optimum je v rozmezí 0,25 až 1,5 mm. Na to je potřeba myslet při řešení mechanického upevnění snímačů.



Snímač je umístěn v pouzdře o rozměrech 6,10 x 4,39 mm, rozteč vývodů je 2,54 mm.

Technické parametry snímače:

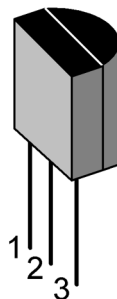
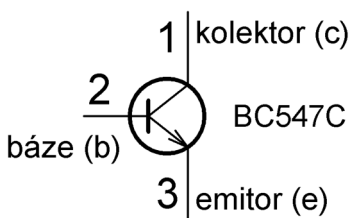
[www.hobbyrobot.cz](http://www.hobbyrobot.cz), nebo [www.fairchildsemi.com/ds/QR/QRD1114.pdf](http://www.fairchildsemi.com/ds/QR/QRD1114.pdf)

### Tranzistor BC 547C

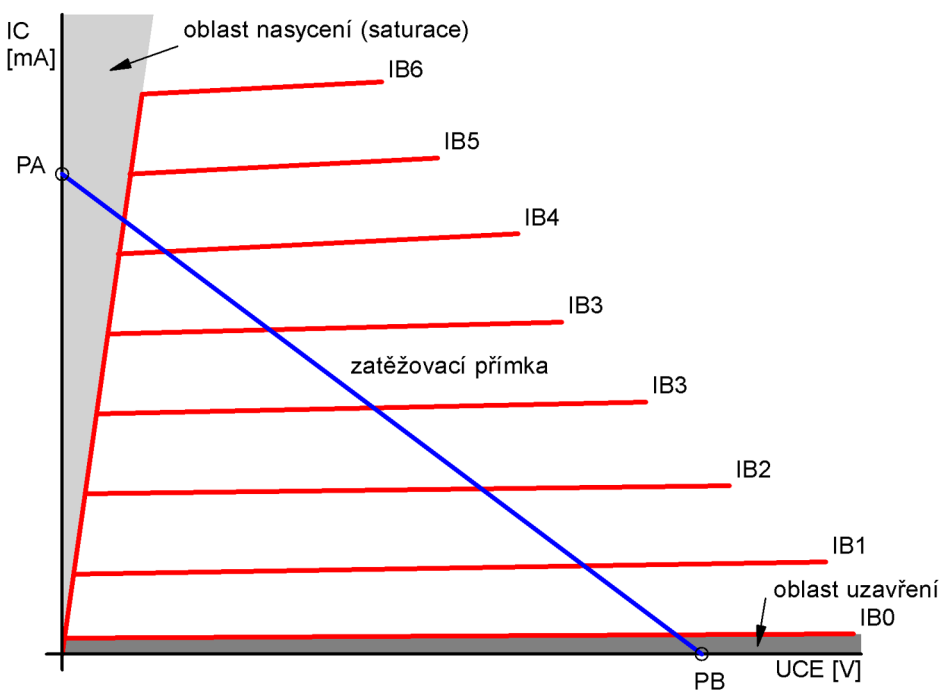
Jedná se o zesilovací nízkofrekvenční tranzistor NPN, který my použijeme jako spínací prvek. Základní katalogové údaje: Napětí kolektor – emitor  $U_{CE0} = 45 \text{ V}$ , trvalý proud kolektorem  $I_C = 100 \text{ mA}$ . Další údaje naleznete na

[http://www.gme.cz/\\_dokumentace/dokumenty/210/210-027/dsh.210-027.1.pdf](http://www.gme.cz/_dokumentace/dokumenty/210/210-027/dsh.210-027.1.pdf).

### Pouzdro a vývody



### Činnost tranzistorového spínače



Pro popis tranzistorového spínače využijeme zjednodušené výstupní charakteristiky tranzistoru NPN v zapojení se společným emitorem. Dalším zjednodušením bude, že motor budeme považovat za ohmickou zátěž (rezistor), ne indukční (cívku) kterou ve skutečnosti je.

Výstupní charakteristiky tranzistoru vyjadřují vztah mezi napětím  $U_{CE}$  (napětí kolektor – emitor) a proudem  $I_C$  (proud kolektorem) při různých hodnotách  $I_B$  (proud báze). Matematicky tuto závislost zapisujeme jako  $I_C = f(U_{CE})$  při  $I_B = \text{konst.}$  (proud kolektorem je funkcí (závisí na) napětí kolektor – emitor, při konstantních hodnotách bázevého proudu). V praxi to znamená, že tranzistor může pracovat kdekoli v rozmezí  $U_{CE} = 0V$  až  $U_{CC}$  (napájecí napětí) a  $I_C = 0 \text{ mA}$  až  $U_{CC}/R_C$  ( $R_C$  – zatěžovací rezistor (motor)) při různých hodnotách bázevého proudu  $I_B$  (oblast vymezená červenými čarami).

Pokud jste teď totálně zmateni, nezoufejte, hned si to zjednodušíme:

Protože tranzistorem spínáme, budou nás zajímat pouze dva body **PA** a **PB**. V bodě **PA** je tranzistor zcela otevřený až na mez saturace (už jím nemůže protékat větší proud  $I_C$ ). Napětí  $U_{CE}$  se blíží  $0V$  a proud  $I_C$  je omezený pouze odporem zátěže (motoru). Je zřejmé, že tranzistor jsme otevřeli příslušným bázevým proudem  $I_B$ .

V bodě **PB** je tranzistor zcela uzavřený, napětí  $U_{CE}$  se blíží napájecímu napětí obvodu a proud  $I_C = 0$ . Do báze neteče žádný proud  $I_B$ .

Když je tranzistor otevřený (**PA**), motorem protéká proud a motor běží, pokud je uzavřený (**PB**), motorem proud neteče a stojí... Při spínání tranzistoru přecházíme skokem z bodu **PA** do bodu **PB** a pohybujeme se přitom po zatěžovací přímce  $R_Z = U_{CE}/I_C$ .

### Jak to funguje dohromady

Popišme si nyní činnost snímače **QRD1114** a tranzistoru **BC547C** spojených do jednoho bloku.

Rezistor  $R_1$  slouží pouze pro nastavení proudu IR diodou, pro činnost obvodu nemá žádný další význam.

Naopak, neobyčejně zajímavé je pro nás sériové spojení rezistoru  $R_2$  a fototranzistoru snímače **QRD1114**. Toto zapojení tvoří napěťový dělič, který přímo určuje poměry v bázi tranzistoru **BC547C**.

### Činnost napěťového děliče

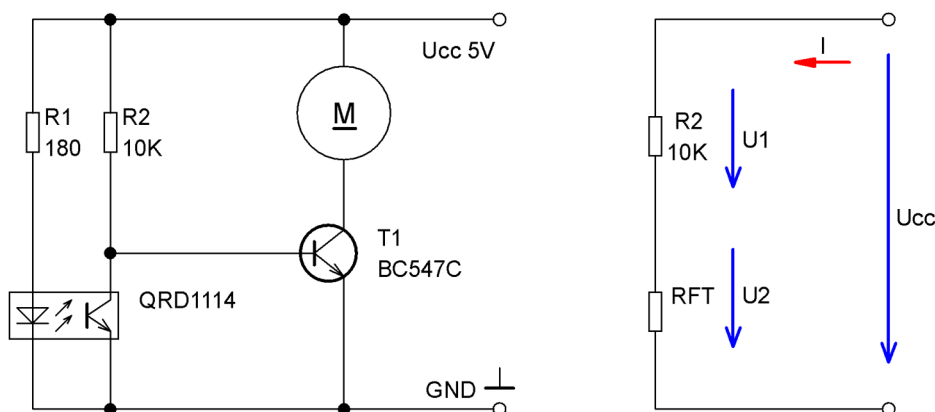


Schéma v pravé části obrázku představuje zjednodušené zapojení rezistoru  $R_2$  a fototranzistoru snímače **QRD1114**. Fototranzistor jsme redukovali na rezistor  $R_{FT}$ , který představuje odpor přechodu tranzistoru. V úvodu jsme řekli, že osvětlený fototranzistor má malý odpor – předpokládejme např., že 100x menší než  $R_2$ . Neosvětlený fototranzistor má odpor velký – např. 10x větší než  $R_2$ . Napěťový dělič je připojený k napětí  $U_{CC} = 5V$  a teče jím proud  $I$ .

Rezistory  $R_2$  a  $R_{FT}$  jsou zapojeny do série, jejich výsledný odpor tedy bude:

$$R = R_2 + R_{FT}$$

Předpokládejme nyní, že fototranzistor je osvětlený. Rezistor  $R_2$  nemůže změnit svoji velikost,  $R_{FT}$  mění velikost v závislosti na osvětlení. Osvětlený fototranzistor bude  $R_{FT} = 100 \Omega$  (viz. úvaha v předchozím odstavci). Výsledný odpor děliče tedy bude:

$$R = R_2 + R_{FT} = 10000 \Omega + 100 \Omega = 10100 \Omega$$

Z Ohmova zákona víme, že proud protékající obvodem je přímo úměrný napětí na svorkách obvodu a nepřímo úměrný odporu obvodu:

$$I = U/R, \text{ v našem případě } I = U_{CC}/R = 5V/10100 \Omega = 4,95 \cdot 10^{-4} A = 0,495 mA$$

Děličem napětí teče při osvětleném fototranzistoru proud  $I = 0,495 mA$ . Napětí  $U_1$  na rezistoru  $R_2$  je závislé na proudu, který rezistorem protéká a velikosti odporu:

$$U_1 = I \cdot R_2 = 4,95 \cdot 10^{-4} A \cdot 10000 \Omega = 4,95 V$$

Obdobně, napětí  $U_2$  na  $R_{FT}$  bude:

$$U_2 = I \cdot R_{FT} = 4,95 \cdot 10^{-4} A \cdot 100 \Omega = 0,0495 V$$

Vidíme, že na  $R_{FT}$  a tedy na bázi tranzistoru **BC547C** je napětí necelých 0,05V, které nepostačuje na otevření tranzistoru.

Pro neosvětlený fototranzistor bude analogicky platit:

$$R = R_2 + R_{FT} = 10000 \Omega + 100000 \Omega = 110000 \Omega$$

$$I = U_{CC}/R = 5V/110000 \Omega = 4,545 \cdot 10^{-5} A = 0,04545 mA$$

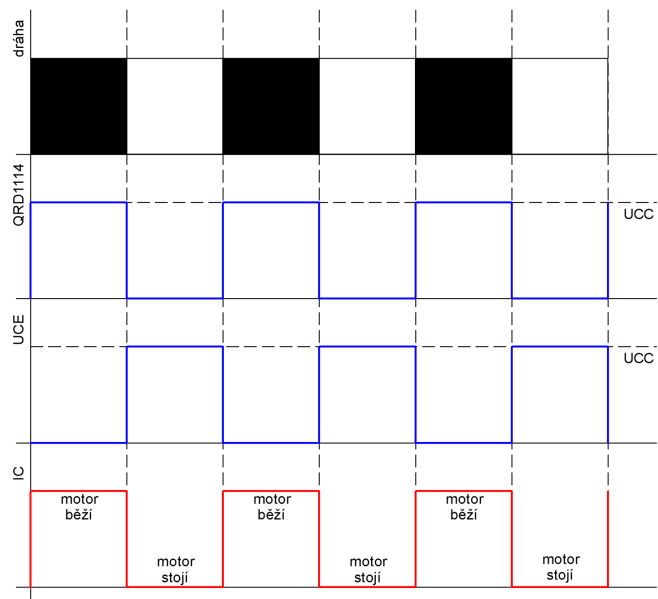
$$U_1 = I \cdot R_2 = 4,545 \cdot 10^{-5} A \cdot 10000 \Omega = 0,4545 V$$

$$U_2 = I \cdot R_{FT} = 4,545 \cdot 10^{-5} A \cdot 100000 \Omega = 4,545 V$$

Vidíme, že se poměry otočily a na bázi **BC547C** je nyní napětí 4,5V, které postačuje na otevření tranzistoru.

Při neosvětleném snímači **QRD1114** je tedy na bázi tranzistoru **BC547C** napětí blízké napájecímu napětí  $U_{CC}$ , při osvětleném snímači je na bázi **BC547C** napětí blízké 0V.

Pokud tedy budeme měnit osvětlení snímače **QRD1114**, budou napěťové a proudové poměry v obvodu vypadat následovně:



Průběh „**dráha**“ znázorňuje změny osvětlení snímače – černé pole je neosvětlený snímač, bílé pole osvětlený snímač.

Průběh „**QRD1114**“ představuje napětí na výstupu snímače (na bázi tranzistoru BC547C). Pokud je snímač zatemněný, je na jeho výstupu napájecí napětí  $U_{CC}$ , pokud je osvětlený, je na výstupu 0V.

Průběh „**UCE**“ je napětí mezi kolektorem a emitorem tranzistoru BC547C. Pokud je napětí  $U_{CE}$  na nule, je tranzistor otevřený, pokud je blízké napájecímu napětí  $U_{CC}$ , je uzavřený.

Proud může protékat pouze otevřeným tranzistorem, jak znázorňuje průběh „**IC**“. Pokud tranzistorem protéká proud, musí protékat i motorem. Pokud motorem protéká proud – běží...

Roboty většinou používají takzvaný **diferenciální pohon**. Mají dva motory, které pohánějí hnací kola. Pokud oba motory běží, robot jede přímo, pokud pravý motor stojí, robot zatáčí doprava, pokud stojí levý motor, zatáčí doleva. Je to podobné jako u tanku.

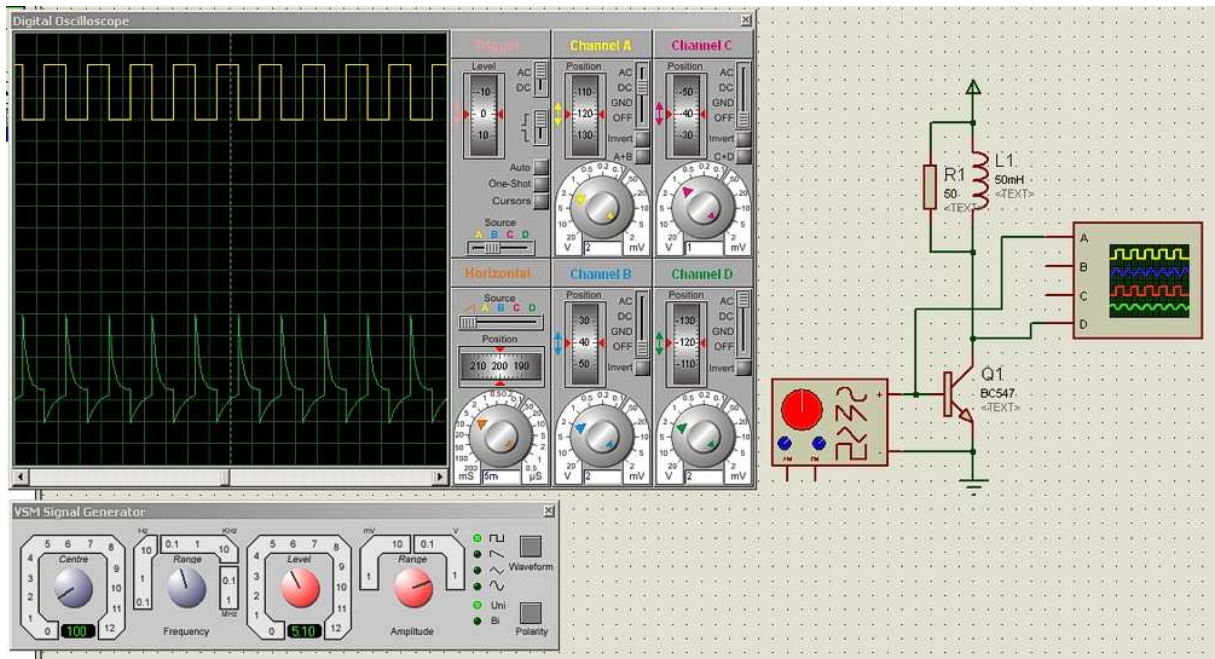
Náš robot se v tuto chvíli umí pohybovat nad černým podkladem – nad bílým stojí. Předpokládejme dráhu tvořenou černým pruhem na bílém podkladu. Dokud jsou oba snímače nad černým povrchem, odráží se méně IR záření na fototranzistor a motory běží. Pokud robot vybočí doleva (nebo dráha zatočí doprava), levé čidlo se ocitne nad bílou plochou, fototranzistor je osvětlený, poklesne na něm napětí, uzavře se tranzistor BC547C a pravý motor se zastaví. To znamená, že motory a čidla musí být zapojeny „do kříže“ – levý snímač ovládá pravý motor a pravý snímač levý motor.

## Jak je to ve skutečnosti

Až do této chvíle jsme vycházeli ze zjednodušení, že motor představuje ohmickou (odporovou) zátěž. Každý, kdo někdy rozebral elektromotorek z hračky, však ví, že obsahuje magnet a hlavně rotor s vinutím – tedy cívkou.

**Motor je pro tranzistor indukční zátěž a představuje zdroj možných potíží.**

**Pokud skokem změním velikost proudu protékajícího cívkou, bude se v ní indukovat napětí, které svojí polaritou působí proti změně, která toto vyvolala.** Při vypnutí proudu motorem se bude na cívkě indukovat napětí, které se bude snažit udržet protékání proudu. Toto napětí dosahuje běžně 3 až 5ti násobku napájecího napětí a závisí na indukčnosti vinutí motoru a rychlosti změny proudu. Při vypínání motoru se proto na tranzistoru objeví napěťové špičky až kolem 15 V.



V simulaci na obrázku je motor nahrazený paralelní kombinací indukčnosti a rezistoru. Místo snímače je motor napájený signálním generátorem, který do báze tranzistoru dodává pravoúhlé impulsy s napětím asi 5 V a o frekvenci 100 Hz. Kanál A (žlutý) osciloskopu je připojený na výstup generátoru, kanál D (zelený) na kolektor tranzistoru. Zřetelně jsou vidět kladné napěťové špičky při vypínání tranzistoru (vstupní napětí klesá k 0 V) a záporné špičky při zapínání tranzistoru (vstupní napětí roste k 5 V).

Při napájení robota napětím 5 V a při použití tranzistoru BC547C není pravděpodobné, že by ho tyto napěťové špičky mohly poškodit, přesto bude „techničtější“ pokud k motoru zapojíme antiparalelně obyčejnou usměrňovací diodu (např. 1N4007). Antiparalelně znamená, že diodu připojíme katodou (označena zpravidla proužkem na pouzdru) na plus pól napájení a anodou na kolektor tranzistoru. Dioda svede napěťové špičky a výrazně omezí jejich velikost, jak je vidět na simulaci.

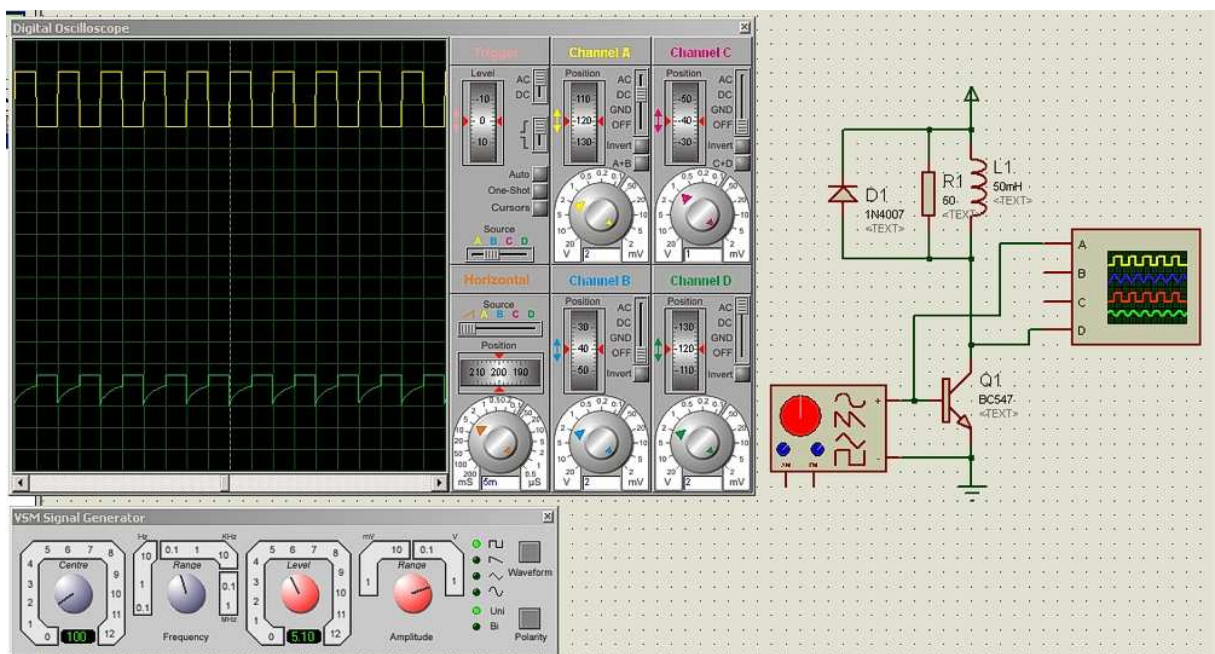
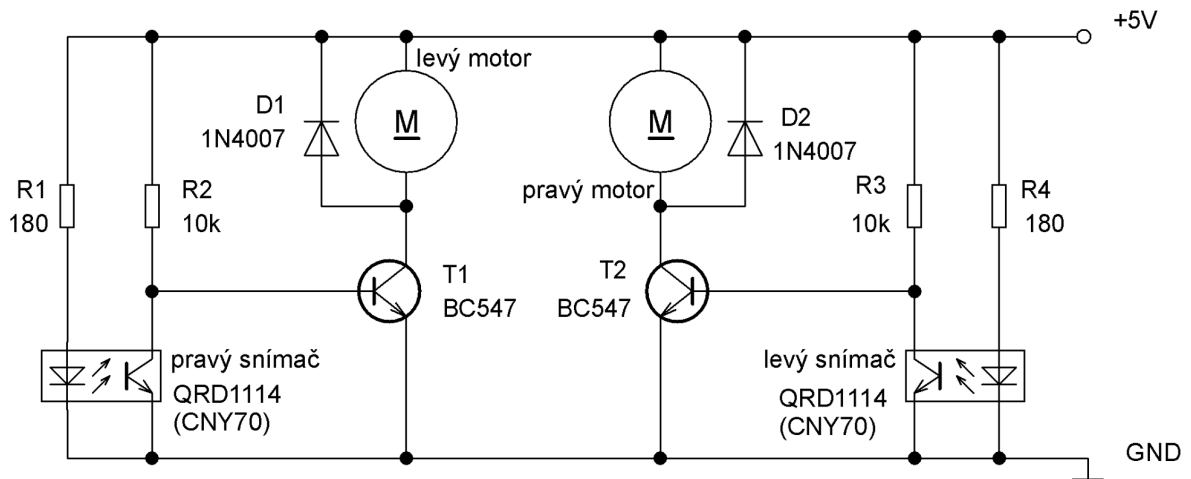
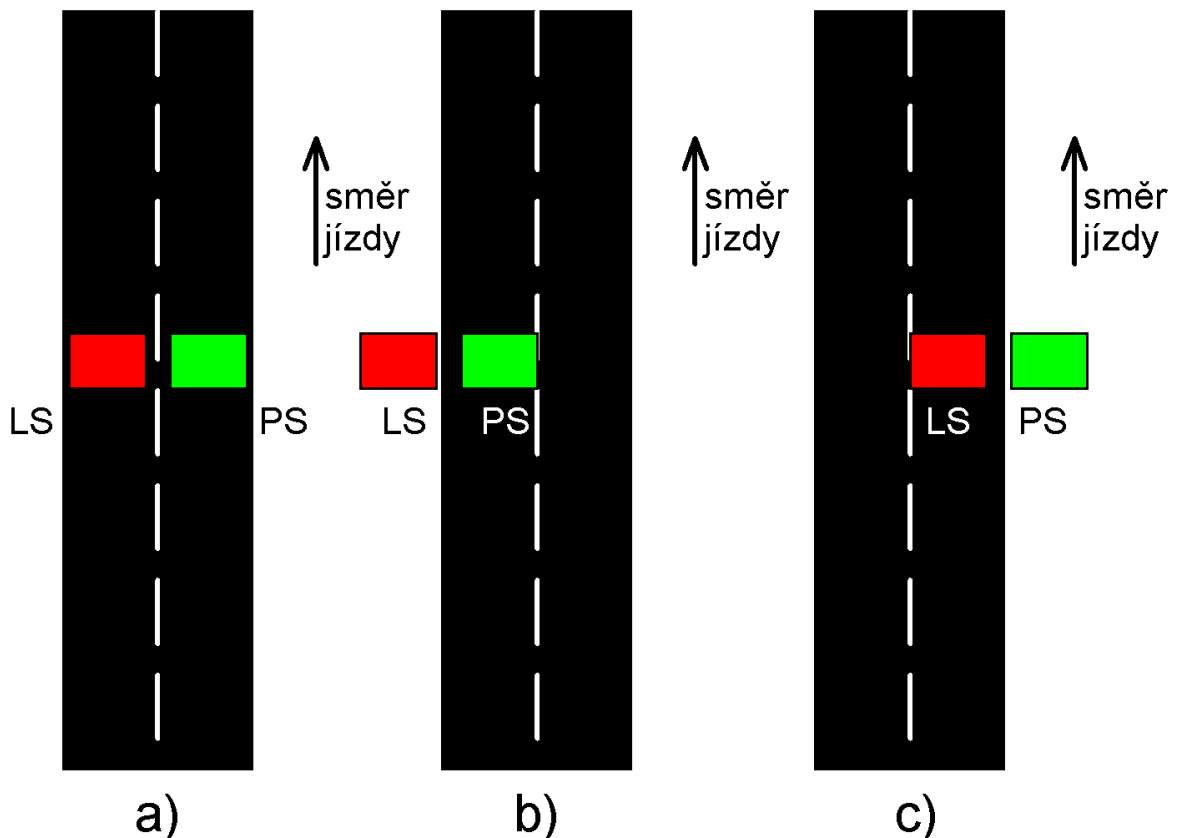


Schéma našeho sledovače čáry bude tedy po úpravě vypadat následovně:



V tuto chvíli se tedy náš robotek umí pohybovat nad černou dráhou a dovede ji sledovat. Nad bílým povrchem se zastaví.



Levý snímač (LS) ovládá pravý motor robota (PM), pravý snímač (PS) ovládá levý motor (LM). Pokud je snímač nad dráhou, černá čára odráží méně infračerveného záření z LED než bílý podklad. Fototranzistor není osvětlený, je zavřený a jeho odpor je velmi velký. Napětíový dělič rezistor R2 (R3) – fototranzistor je svým výstupem připojený do báze tranzistoru BC547C. Napájecí napětí se vždy rozdělí na dělič v závislosti na velikosti rezistorů, které dělič tvoří. Neosvětlený fototranzistor má podstatně větší odpor než rezistor R2 (resp. R3), proto se na vstupu tranzistoru objeví napětí blízké napájecímu napětí. Tranzistor sepne a motory běží (obr. a).

Předpokládejme, že robot vybočí doleva z přímého směru. Levý snímač (LS) se ocitne mimo dráhu, na bílém podkladu a jeho fototranzistor je osvětlený. Osvětlený fototranzistor se otevře, jeho odpor se významně zmenší, což má za následek změnu poměrů na napětíovém dělič. Odpor rezistoru R2 je nyní podstatně větší než odpor

fototranzistoru a na výstupu děliče (báze BC547C) se objeví napětí blízké 0V. Tranzistor odpojí pravý motor (**PM**) od napájecího napětí, ten se zastaví a robot zatáčí doprava, protože **PS** je na dráze a **LM** je připojený k napětí (**obr. b**). Analogicky, při vybočení doprava se zastaví **LM**, protože je **PS** mimo dráhu, **PM** běží (**obr. c**).

Pokud robot ztratí dráhu (oba snímače jsou na bílém podkladu), zastaví se.

Je zřejmé, že vzhledem k tomu, že oba snímače jsou umístěny blízko u sebe nad dráhou, je řízení sledovače poměrně citlivé a robot se pohybuje „cik cak“ nad čarou.

Tento druh řízení robota je poměrně efektivní, pokud je čára široká několik centimetrů. Při soutěžích robotů se ovšem používá černý pruh široký 15mm. To znamená, že robot bude měnit směr prakticky nepřetržitě. Pro rychlejší a plynulejší pohyb bude proto potřeba najít jiný způsob řízení.