

Úkoly

- 3.1** Změřit proudový zesilovací činitel NPN tranzistoru h_{21E} . +2 body
3.2 Rozsvítit LED pomocí NPN tranzistoru (změřit U_{BE} , U_{CE} , orientační výpočet R_b , R_c) +2 body
3.3 Rozsvítit LED pomocí PNP tranzistoru (změřit U_{BE} , U_{CE}) +1 bod
3.4 Rozsvítit LED pomocí N-MOSFET tranzistoru (změřit U_{GS} , U_{DS} , $R_{DS(on)}$) +1 bod

Nepovinné, pokud Vám zbude čas (a bude se Vám chtít :-)

- 3.5** Sestavte tranzistorový zesilovač s LED indikací (+3 body), můžete doplnit o program v MCU, který na tlesknutí rozsvítí další LED a na další tlesknutí ji zhasne (toto již bez bodů, ale zase s tím můžete někoho oslnit :-)

Pouze pokud máte nebo si koupíte patřičné součástky (od nás jste je nedostali)

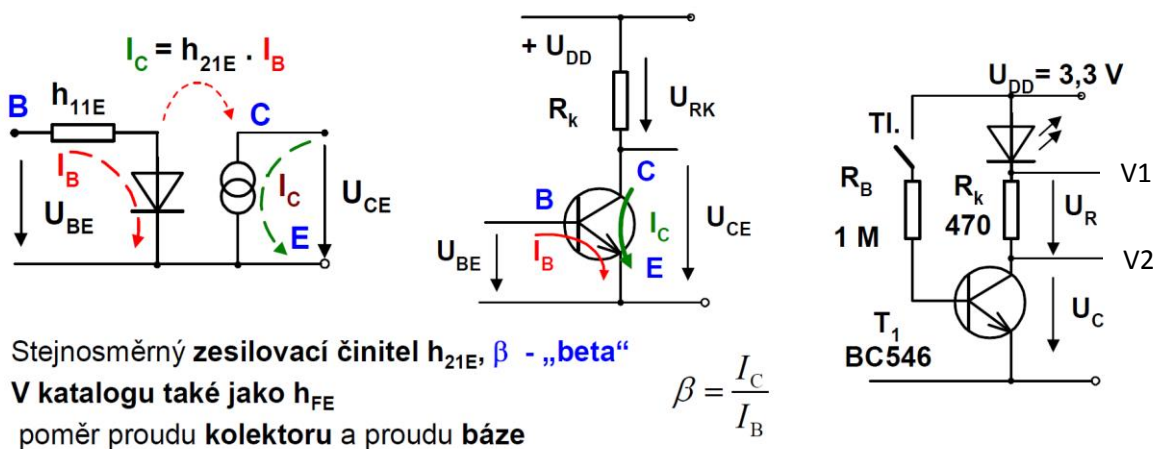
- 3.6** Určete přibližně, jako jaká kapacita se jeví výkonový N-MOSFET tranzistor (vstup Gate-Source) +2 body
3.7 Změřit $R_{DS(on)}$ pro výkonový P-MOSFET tranzistor +1 bod

3.1 Změřit proudový zesilovací činitel NPN tranzistoru h_{21E}

Tranzistor můžeme provozovat typicky ve dvou režimech – lineární (jako zesilovač signálu), spínač (tranzistor je satureován). Režim se volí nastavením velikosti proudu do báze. Proud do báze je zesílen proudovým zesilovacím činitelem tranzistoru (h_{21E} , typicky 10-1000, BC546C například 400). Proud báze nastavíme rezistorem 1M mezi bází a 3.3 V. Jaký je pak proud báze, když na přechodu báze-emitor vznikne úbytek napětí typicky 0.6 V? V kolektoru je zapojena LED dioda spolu se sériovým rezistorem 470 Ohm. Proud kolektorem změříme jako úbytek napětí na rezistoru 470 Ohm. $h_{21E} = I_C / I_B$

Vyzkoušejte jestli LED rozsvítíte, když rezistor 1M nahradíte Vašimi prsty (jedné nebo obou ruk...)

POZOR – i když třeba multimetrem naměříte odpor mezi prsty v řádu desítek kOhm – 1M Ohm, tak pokud byste totéž vyzkoušeli s napětím 230 V_{AC} (síťové napětí) dojde k průrazu kůže a odpor velmi výrazně poklesne (proud poteče krevním řečištěm s nízkým odporem...) a dojde k úrazu elektrickým proudem. **Takže to prosím rozhodně nezkoušejte!**



Obr 3.1 Zapojení pro měření proudového zesilovacího činitele tranzistoru

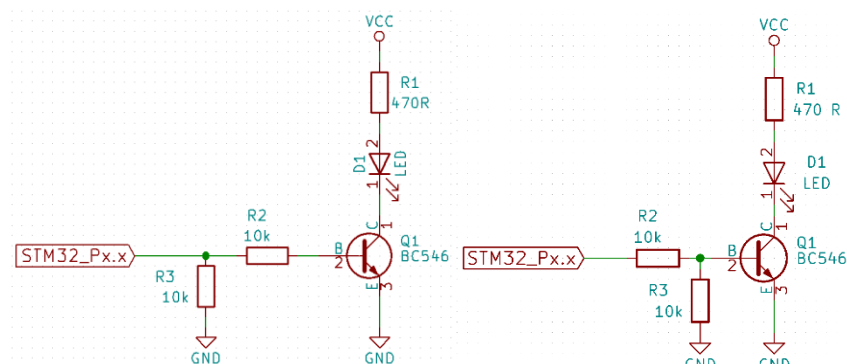
3.2 Rozsvítit LED pomocí NPN tranzistoru (změřit U_{BE} , U_{CE} , orientační výpočet R_b , R_c)

Tranzistory se používají pro ovládání různých prvků, které potřebují ke své činnosti proud větší než několik mA (relé, výkonové LED, motory...). Z výstupů mikrokontroléru není rozumné odebírat proud větší než 5-20 mA (dle požadovaných výstupních napěťových úrovní - při větším proudu napětí na výstupu roste, je-li výstup v log.0, nebo naopak klesá, je-li výstup v log. 1). Někdy je vhodné použít tranzistor i pro řízení například indikační LED s odběrem třeba 5 mA – LED se tak „oddělí“ od mikrokontroléru a zapojení lze udělat odolnější z hlediska EMC (například elektrostatické výboje apod. – pokud je LED na čelním panelu přístroje).

Pokud chceme tranzistorem spínat LED ($I_{LED}=20\text{ mA}$) a máme tranzistor BC546C s $h_{21E} = 500$ (typická hodnota), potřebujeme proud do báze alespoň $40\text{ }\mu\text{A}$. V praxi ale volíme proud do báze 5-20 větší než je nutné, zajistíme tak, že tranzistor bude pracovat za všech podmínek (např. širší rozsah teplot) jako spínač (tranzistor bude v saturaci) a saturační napětí kolektor-emitor bude minimální (řádově 0.05-0.2 V).

Takže R_b (R_2) = ???

NPN tranzistor použijeme, pokud je možné zátěž připojit jedním vývodem na kladné napájecí napětí a druhým na kolektor tranzistoru. Můžeme tak z mikrokontroléru ovládat „spotřebič“ s mnohem vyšším napájecím napětím (třeba relé s řídicí cívkou na 24 V), než je napájecí napětí mikrokontroléru (3.3 V).



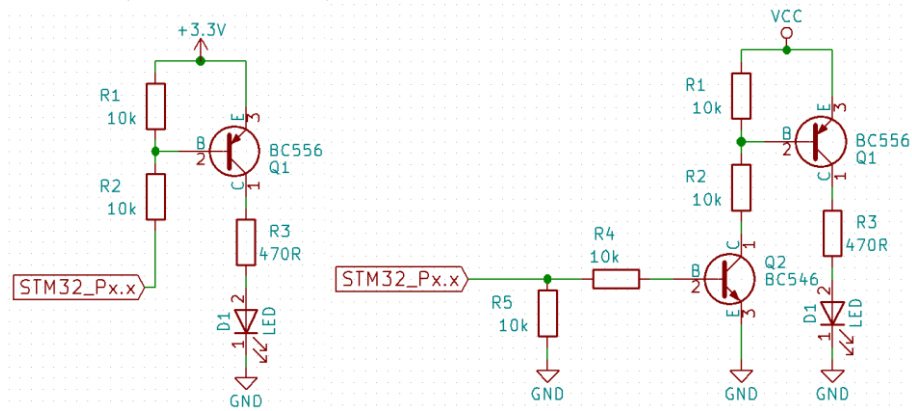
Obr. 3.2 Spínač s tranzistorem NPN, zátěž jednou stranou připojená k napájecímu napětí

Pozn. rezistor R_3 není pro funkci nutný, ale pokud je výstup mikrokontroléru například při resetu ve vysoké impedanci, zajistí R_3 , že bude tranzistor spolehlivě (a rychleji) zavřený, třeba i v přítomnosti rušení. Na obrázku výše jsou dvě možnosti jeho zapojení (napravo častější), pozor, výpočet vhodné hodnoty se liší.

3.3 Rozsvítit LED pomocí PNP tranzistoru (změřit U_{BE} , U_{CE})

PNP tranzistor se naopak hodí, pokud potřebujeme, aby spínaná zátěž byla jedním svým pólem připojená na zem (GND). Tranzistor pak bude mezi kladným napájecím napětím (emitor) a zátěží (kolektor). Takto jednoduše s jedním PNP tranzistorem lze ale spínat jen zátěž, která má napájecí napětí maximálně rovné napájecímu napětí mikrokontroléru (obrázek vlevo). Vysvětlete proč?!

Pokud potřebujeme spínat vyšší napětí, je nutné přidat do zapojení ještě další tranzistor (NPN), viz obrázek napravo. Pro R_1 a R_5 platí to samé co pro R_3 z předchozího bodu (pro základní funkci zapojení není nutný).



Obr. 3.3 Spínač s PNP tranzistorem, zátěž jedním vývodem připojená ke GND

Výhody bipolárních tranzistorů: robustní, levné, řídí se proudem do báze – k vytvoření dostatečného proudu stačí napětí řádově 0.8 V (a libovolné větší...) Nebo řádově 1.4V+ v případě „darlingtonova“ zapojení tranzistorů).

*poskytuje vyšší hodnoty h_{21E} (až 10000)

Nevýhody bipolárních tranzistorů: saturační napětí kolektor/emitor typicky 0.1-0.3 V * procházející proud = výkon zmařený na tranzistoru – to může být velmi mnoho při spínání velkých proudů => velký ohřev, malá účinnost

Pozn. Bipolární tranzistory nelze jednoduše spojovat paralelně pro spínání větších proudů – teplotní koeficient přechodu PN je záporný (-2mV/K), jakmile se jeden tranzistor začne více zahřívat (tranzistory nejsou nikdy absolutně stejné) bude na něm menší úbytek napětí a tím více proudu bude mít tendenci přes něj téct...což povede k ještě většímu ohřevu, ... a posléze k tepelné destrukci tranzistoru. Aby toto nenastalo, lze zapojit do emitoru malé vyrovnávací rezistory, ale to zhoršuje spínací vlastnosti...

3.4 Rozsvítit LED pomocí N-MOSFET tranzistoru (změřit U_{GS} , U_{DS} , $R_{DS(on)}$)

Unipolární tranzistory se řídí napětím Gate-Source. Stejně jako v případě bipolárních tranzistorů, N-MOSFET použijeme, pokud je možné zátěž (třeba LED se sériovým rezistorem) připojit jedním pólem na kladné napájecí napětí, a spínat ji tranzistorem k zemi.

Gate lze připojit i přímo na výstup mikrokontroléru. Maximální kolektorový proud bude omezen napětím přivedeným na gate, viz charakteristika tranzistoru BS170 v datasheetu

Pozor, nízko-výkonový MOSFET BS170 je relativně velmi citlivá součástka, která se snadno zničí nadproudem, nebo třeba nechtěným elektrostatickým výbojem při doteku. Před manipulací se „vybijte“ dotekem na uzemněnou část zapojení (tělo USB konektoru) a při práci s ním netřete příliš liščími ohonem o ebonitovou tyč (svetrem o lakovaný stůl...).

U_{GS} změřte jako napětí potřebné pro znatelné rozsvícení LED. $R_{DS(on)}$ (odpor mezi drain a source ve stavu sepnuto) změřte při maximálním napětí U_{GS} (3.3V).

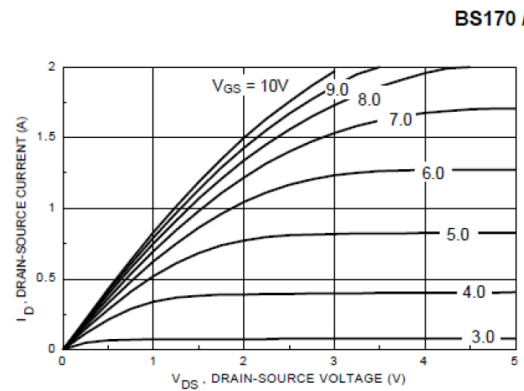
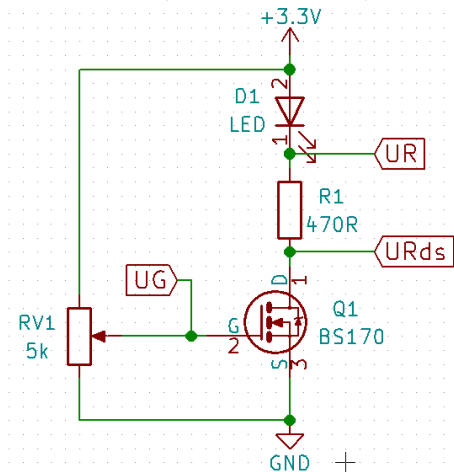


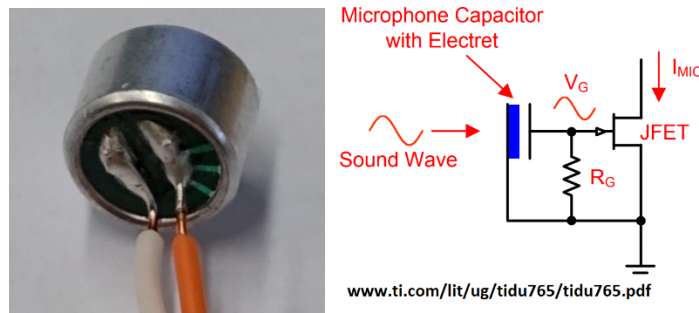
Figure 1. On-Region Characteristics.

Obr. 3.4 Zapojení pro testování N-MOSFET tranzistoru

Nepovinné

3.5 Tranzistorový zesilovač pro mikrofon s LED indikací, tleskáč lampička (+3 body)

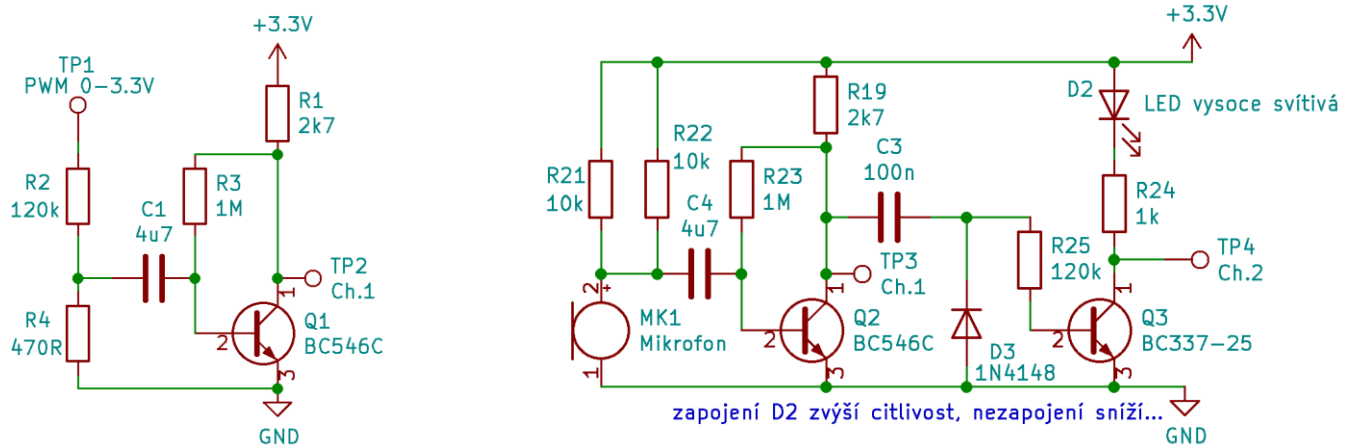
V sadě součástek naleznete tzv. elektretový mikrofon - součástku, která dokáže přeměnit akustický signál na elektrický. Můžete si vyzkoušet postavit jednoduchý tranzistorový zesilovač, kde LED připojená v kolektoru druhého tranzistoru bude reagovat na zvuk. Pokud připojíte i MCU můžete realizovat jednoduchou LED lampičku aktivovanou zvukem, viz video pod návodem.



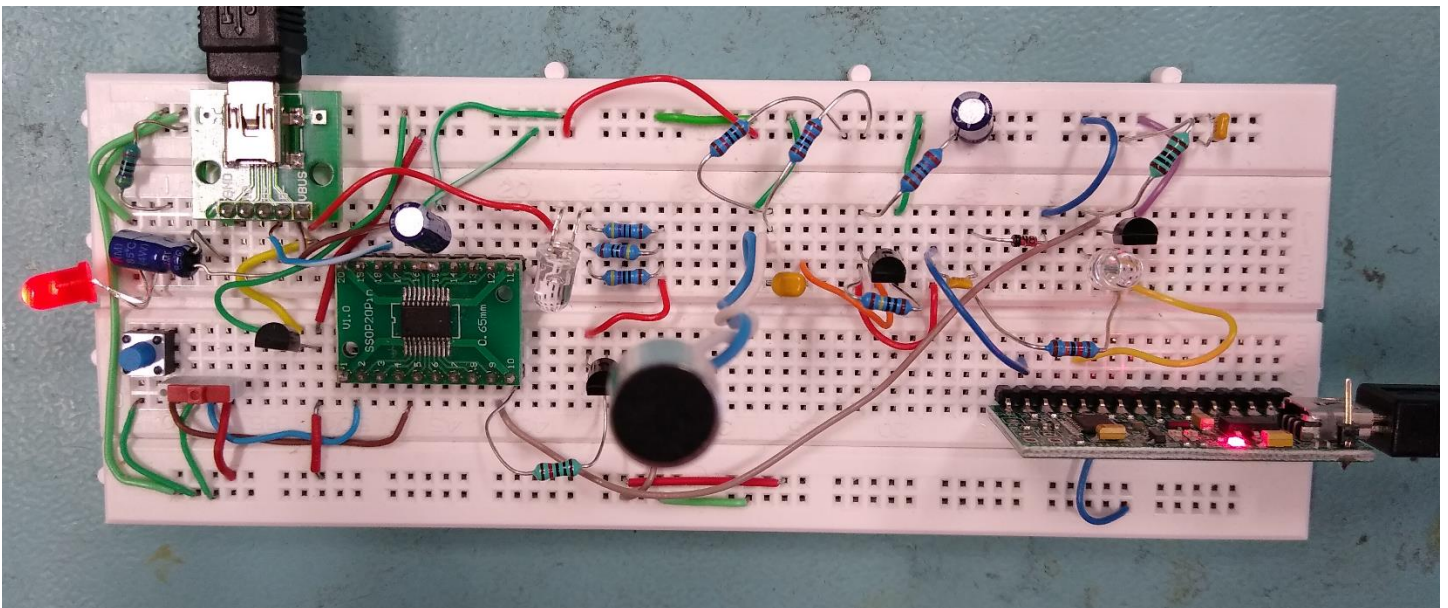
Obr. 3.5 Elektretový mikrofon

Pozor - mikrofon má vestavěný zesilovač a je tedy třeba **dodržet polaritu** - zemní nožička je spojena s pouzdem mikrofonu, třemi spoji viz obrázek, měl by to být vždy ten barevný drát. Bílý drát pak bude +.

Zapojte dle schématu níže - R2 a R3 poskytují napájení pro mikrofon, na vývodu 2 mikrofonu bude stejnosměrné napětí asi 2V. Signál z mikrofonu má amplitudu řádově 20-100mVpp. Pro zesílení slouží střídavě (C2) vázaný zesilovač s Q1. Ten má nastavený pracovní bod tak, aby na kolektoru bylo přibližně napětí odpovídající $V_{cc}/2$ (1.7V). Zapojení R4 do kolektoru stabilizuje pracovní bod, slouží jako záporná zpětná vazba - pokud se zvýší proud do báze, tranzistor se více otevře, poklesne napětí na kolektoru, což zmenší proud do báze. Následuje druhý tranzistor s indikační LED v kolektoru, tento je opět střídavě vázaný, bez C1 by byl Q2 prakticky pořád sepnutý a zapojení by nebylo tak efektní (svit je vidět lépe než pohasínání). Se zapojenou diodou D2 bude zapojení citlivější na zvuk.



Obr. 3.6 Tranzistorový zesilovač pro mikrofon (nalevo část pro určení zesílení stupně s Q1)



Obr. 3.7 Škaredá, ale funkční realizace zapojení na nepájivém poli :-)

POZOR -zapojení obsahuje NAVÍC blokové kondenzátory (100nF a 22uF) přidané na horní napájecí rail, kde není 5V ale v tomto případě pouze 3.3V. Nalevo nahoře od mikrofonu je vidět NPN tranzistorový spínač s vysocesvítovou LED (jako na Obr. 3.2) a třemi paralelně zapojenými 470 Ohm rezistory (LED napájena z 5V)

Funkce mikrokontroléru viz program na konci tohoto návodu a video...

3.6 Určete přibližně, jako jaká kapacita se jeví výkonový N-MOSFET tranzistor (vstup Gate-Source) +2 body

Proč se používají FET tranzistory - pro statické řízení stačí zanedbatelný výkon..., mají extrémně vysoký vstupní odpor.

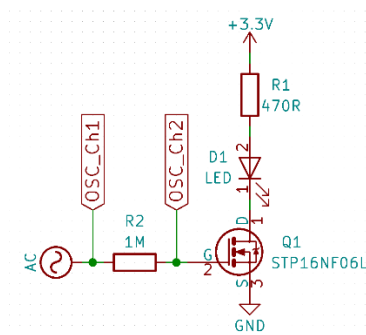
Proč se používají výkonové MOSFET tranzistory? Mohou mít velmi nízký odpor v sepnutém stavu (např. 1 mΩ) takže mohou spínat i velmi velké proudy (desítky, stovky ampér) bez velkých problémů s ohřevem způsobeným výkonovou ztrátou ($P=R \cdot I^2$).

Výkonový MOSFET, to je vlastně mnoho (desítky, tisíce...) malých tranzistorů uspořádaných paralelně (na čipu). Čím více je jich paralelně (lze zapojovat paralelně i jednotlivé součástky...), tím se jeví jako větší kapacita pro řídicí obvod (např. 50pF-50nF).

Pro méně časté spínání (např. méně než 5x za sekundu) to není příliš velký problém, pokud nespínáme opravdu extrémní proudy (tam by i krátký pobyt v „lineární oblasti“ - tranzistor není zcela sepnutý ani rozepnutý) mohl způsobit problémy.

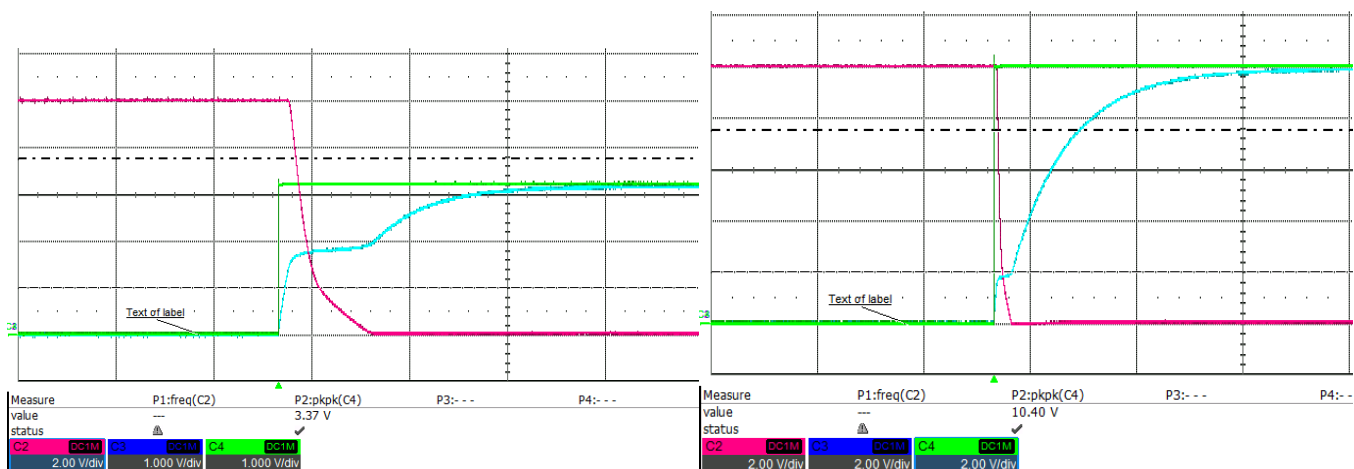
Pokud ale pro řízení použijeme PWM o vyšší frekvenci, představuje už periodické rychlé nabíjení a vybíjení kapacity značný problém. Nabití a vybití se musí provést co nejrychleji, aby tranzistor nepracoval v lineárním režimu a neohříval se. Existují speciální obvody „mosfet drivery“ které zajišťují nabíjení a vybíjení kapacity gate velkými impulzními proudy (až ±12A, např. MIC4452).

Kapacita gate vytvoří s přidavným sériovým rezistorem R_2 integrační článek, takže lze určit přibližnou časovou konstantu sledováním budícího a integrovaného průběhu pomocí osciloskopu a dopočítat kapacitu.



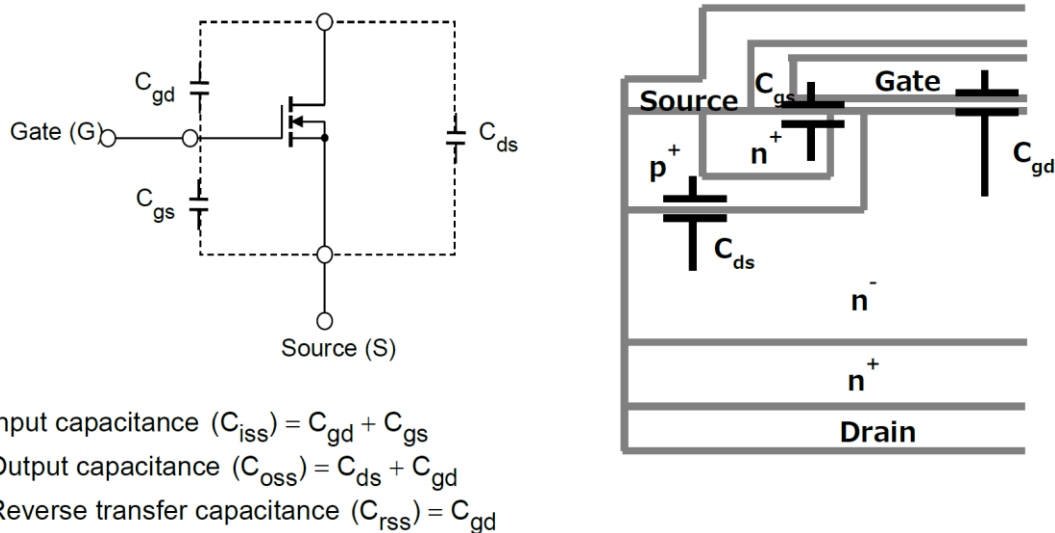
Obr. 3.8 Zapojení pro přibližné určení vstupní kapacity MOSFET

Ve skutečnosti je celá věc krapet složitější (jako obvykle :-). Na obrázcích níže je vidět budící pulz (zeleně), průběh napětí na gate (azurová) a napětí na drain (purpurová). Zobrazeno pro dvě různé hodnoty napětí budícího pulzu (nalevo 3.2 V, napravo 10 V).



Obr. 3.9 Průběhy napětí při spínání N-MOSFET tranzistoru (zelená – budící obdélík, azur – napětí na gate, purpur – napětí na drain)

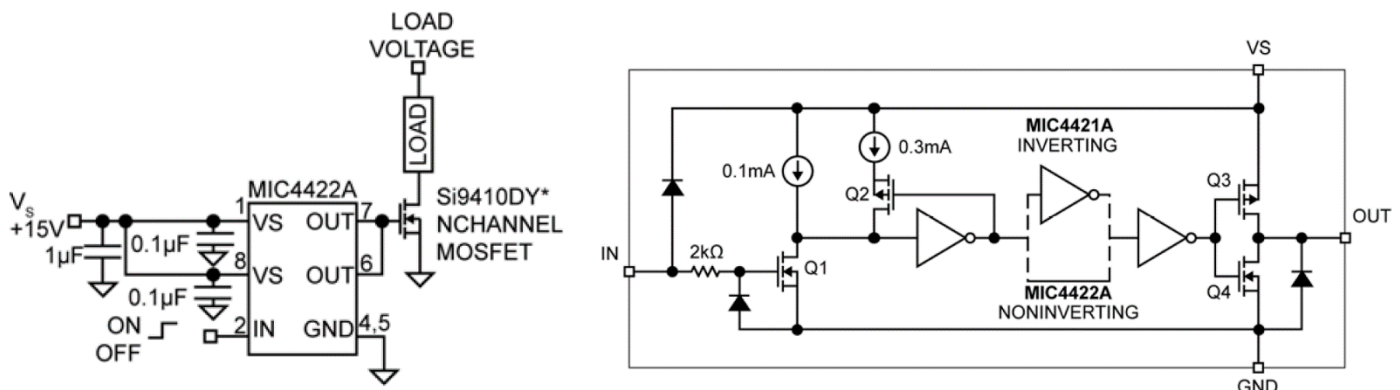
V průběhu napětí na gate je viditelný „zub“ - plochá část křivky, kdy dochází k nabíjení tzv. Millerovy kapacity (C_{gd}) vlivem toho, že v tomto čase se tranzistor otevírá a rychle klesá napětí na drain. Pro účely našeho orientačního měření vstupní kapacity lze toto zanedbat a klasicky změřit interval, kdy napětí na gate dosáhne 63% amplitudy.



Obr. 3.10 Náhradní zapojení a struktura MOSFET tranzistoru

V katalogovém listě MOSFET tranzistorů lze typicky nalézt i údaj o náboji potřebném pro sepnutí tranzistoru (total gate charge, např. 7 nC), se kterým se snadněji provede orientační výpočet při návrhu - jak velkým proudem musím nabíjet/vybíjet gate, aby se tranzistor sepnul/rozeplul v požadovaném čase ($i=Q/t$). „Požadovaný čas“ závisí na konkrétní aplikaci - velikosti spínaného proudu a četnosti spínání.

Příklad reálného zapojení s MOSFET tranzistorem jako spínačem zátěže je na Obr. 3.11. Uvedený budič dokáže pracovat s výstupním proudem až 9 A (samotný výstup MCU dodá max. malé desítky mA). Jak je vidět z diagramu vnitřní struktury, budiče se běžně dodávají jako invertující nebo neinvertující.

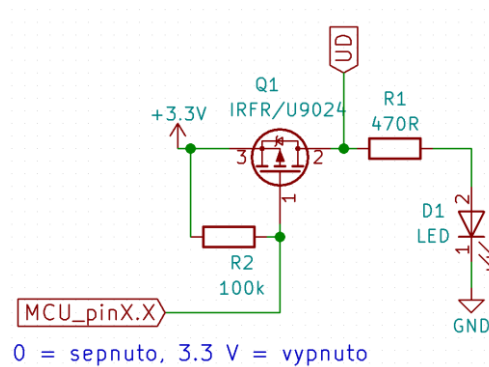


Obr. 3.11 Řízení výkonového N-MOSFET tranzistoru pomocí integrovaného driveru, signál z MCU se přivede na „IN“, napravo vnitřní struktura budiče.

3.7 Změřit $R_{DS(on)}$ pro výkonový P-MOSFET tranzistor

P-MOSFET, stejně jako PNP tranzistor použijeme pro spínání zátěže, která musí mít jeden pól přímo uzemněný. Lze jím spínat třeba napájecí napětí pro další sekce obvodů ve složitějším zapojení, přičemž všechny sekce mají jednu společnou GND.

Pokud spínáme napětí do velikosti budicího napětí, vystačíme se samotným P-MOSFETem, jinak opět musíme přidat NPN nebo N-MOSFET tranzistor (podobně jako u spínání PNP tranzistoru).



Obr. 3.12 Zapojení pro ovládání LED pomocí P-MOSFET

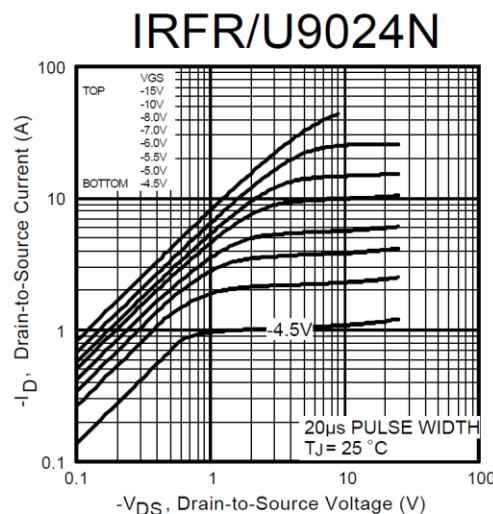


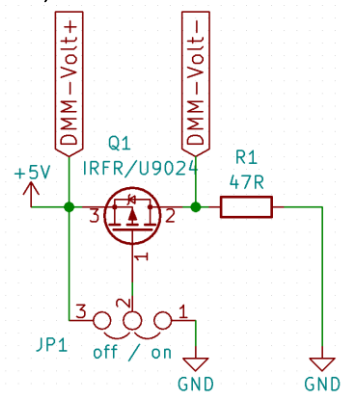
Fig 1. Typical Output Characteristics

$V_{GS(th)}$	Gate Threshold Voltage	-2.0	—	-4.0	V	$V_{DS} = V_{GS}, I_D = -250\mu A$
--------------	------------------------	------	---	------	---	------------------------------------

Obr. 3.13 Spínací charakteristika tranzistoru z katalogového listu, při napětí V_{GS} od -2 do -4 V dojde k otevření tranzistoru pro proud minimálně -250 μA .

Pro lepší sepnutí tranzistoru je vhodnější použít napájecí napětí 5V a úbytek napětí Source-Drain pak měřit multimetrem. Pozor - rezistor R_1 z obrázku 3.14 může již velmi znatelně topit!

$R_{DS(on)} = \text{úbytek napětí na tranzistoru} / \text{procházející proud}$ (proud zjistíme z úbytku na R_1).



Obr. 3.14 Zapojení pro změření odporu v sepnutém stavu pro výkonový P-MOSFET

Program mbed - tleskáč lampička

```
#include "mbed.h"
```

```
DigitalOut ledlight(PA_4); //řídí spínač s NPN tranzistorem
```

```
InterruptIn inIN(PA_3); //kolektor tranzistoru Q2
```

```
unsigned int counter;
```

```
volatile unsigned char flag;
```

```
void light(){
```

```
    flag++;
```

```
}
```

```
int main(){
```

```
    inIN.mode(PullUp); //aktivuj interni pull-up
```

```
    inIN.fall(&light); //prirad funkci "light" preruseni na spadovou hranu
```

```
    while(1) {
```

```
        wait(0.05);
```

```
        if (flag > 0){
```

```
            flag = 0;
```

```
            if(counter ==0){
```

```
                ledlight = !ledlight;
```

```
                counter = 20;
```

```
            }
```

```
        }//if (flag > 0){
```

```
        if(counter != 0){counter -=1;};
```

```
    }//while(1)
```

```
}
```