

UNIVERZITA PARDUBICE  
FAKULTA ELEKTROTECHNIKY A INFORMATIKY

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

2009

Luboš Rejfeč

**Univerzita Pardubice**

**Fakulta Elektrotechniky a Informatiky**

**Měření nerovnoměrnosti otáčení**

**Autor práce: Luboš Rejček**

**Vedoucí práce: Ing. Jiří Konečný, Ph.D.**

**Bakalářská práce**

**2009**

**University of Pardubice**

**Faculty of Electrical Engineering and Informatics**

**Measuring of rotational accuracy**

**Author: Luboš Rejtek**

**Supervisor: Ing. Jiří Konečný, Ph.D.**

**Bachelor work**

**2009**

Univerzita Pardubice  
Fakulta elektrotechniky a informatiky  
Katedra elektrotechniky  
Akademický rok: 2008/2009

## ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

(PROJEKTU, UMĚLECKÉHO DÍLA, UMĚLECKÉHO VÝKONU)

Jméno a příjmení: **Luboš REJFEK**  
Studijní program: **B2612 Elektrotechnika a informatika**  
Studijní obor: **Komunikační a mikroprocesorová technika**  
  
Název tématu: **Měření nerovnoměrnosti otáčení**

### Z á s a d y p r o v y p r a c o v á n í :

V řadě elektrických zařízení jejichž část se otáčí je důležité, aby toto otáčení bylo co nejrovnoměrnější. Pro bakalářskou práci budeme vycházet z předpokladu, že jde o otáčecí talíře gramofonu. V tomto případě se nerovnoměrnost otáčení projeví na kolísání výšky tónů. 1) Udělejte průzkum možností zjišťování rychlosti otáčení nejrůznějších zařízení (může jít i o jiná zařízení než gramofon). Vyberte princip, který bude v práci podrobně prozkoumán. 2) Navrhněte způsob snímání rychlosti otáčení a zpracování měřených hodnot použitý pro úlohu řešenou bakalářskou prací. 3) Důležitou částí bakalářské práce je principiální ověření realizace a funkce snímání otáček. 4) O práci na měření rychlosti otáčení a nerovnoměrnosti otáčení sepište pojednání - bakalářskou práci. Částmi tohoto pojednání bude nejen řešení vlastního snímače a měření na něm, ale také způsob vyhodnocení nerovnoměrnosti otáčení a jeho zobrazení (včetně teoretických analýz).

Rozsah grafických prací:

Rozsah pracovní zprávy:

Forma zpracování bakalářské práce: tištěná/elektronická

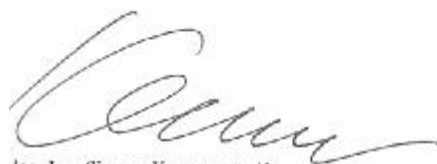
Seznam odborné literatury:

- 1) Detekce a měření různých druhů záření Tomáš Fukátko (978-80-7300-193-3)
- 2) Technická diagnostika - senzory, metody, analýza signálu Kreidl Marcel, Šmíd Radislav (80-7300-158-6)
- 3) Práce s mikrokontroléry AT-MEL AVR - ATmega16 Matoušek David (80-7300-174-8)


Vedoucí bakalářské práce: Ing. Jiří Končný, Ph.D.  
Katedra elektrotechniky

Datum zadání bakalářské práce: 15. ledna 2009

Termín odevzdání bakalářské práce: 15. května 2009

  
doc. Ing. Simeon Karamazov, Dr.  
děkan



  
Ing. Zdeněk Němec, Ph.D.  
vedoucí katedry

## Prohlašuji:

Tuto práci jsem vypracoval samostatně. Veškeré literární prameny a informace, které jsem v práci využil, jsou uvedeny v seznamu použité literatury.

Byl jsem seznámen s tím, že se na moji práci vztahují práva a povinnosti vyplývající ze zákona č. 121/2000 Sb., autorský zákon, zejména se skutečností, že Univerzita Pardubice má právo na uzavření licenční smlouvy o užití této práce jako školního díla podle § 60 odst. 1 autorského zákona, a s tím, že pokud dojde k užití této práce mnou nebo bude poskytnuta licence o užití jinému subjektu, je Univerzita Pardubice oprávněna ode mne požadovat přiměřený příspěvek na úhradu nákladů, které na vytvoření díla vynaložila, a to podle okolností až do jejich skutečné výše.

Souhlasím s prezenčním zpřístupněním své práce v Univerzitní knihovně.

V Klešicích dne 20. 4. 2009

Luboš Rejfek

## Poděkování:

Děkuji vedoucímu bakalářské práce panu Ing. Jiřímu Konečnému, Ph.D. za jeho všestrannou pomoc při výběru možností postupu při tvorbě této bakalářské práce.

Dále děkuji všem, kteří mi pomáhali při shánění at' už studijních zdrojů, nebo materiálů použitých při konstrukci samotného zařízení.

V neposlední řadě děkuji rodině a přátelům, kteří mi v průběhu celého studia na vysoké škole pomáhali a podporovali mé úsilí.

## **Souhrn:**

Tato bakalářská práce se zaměřuje na měření rychlosti otáčení. Jejím cílem je rozbor různých metod pro měření rychlosti otáčení, rozbor principů snímání pohybu, zjišťování změn v rychlosti otáčení z naměřených hodnot a aplikace těchto poznatků do zařízení pro měření nerovnoměrnosti rychlosti otáčení.

## **Klíčová slova:**

Úhlová rychlost, Pohyb po kružnici, Metody snímání otáčivého pohybu



## **Title:**

Measuring of rotational accuracy.

## **Abstract:**

This bachelor work is oriented to measuring of rotation speed. Its aim is an analysis of various methods for rotation speed measuring, an analysis of motion sensing principles, calculation of rotation speed variations from measured values and application of these findings to realization of device.

## **Keywords:**

Rotation speed, Circular motion, Circular motion sensing methods.

## Obsah:

Úvod.....	11
1. Rychlost otáčení hmotného bodu po kružnici .....	12
1.1. Rovnoměrný pohyb po kružnici .....	12
2. Principy měření otáčivého pohybu.....	14
2.1. Měření doby oběhu o 360° .....	14
2.2. Měření počtu průchozích značek za jednotku času .....	15
2.3. Měření času za který proběhne určitý počet značek .....	16
2.4. Měření směru otáčení.....	17
2.5. Měření aktuální výchylky .....	18
2.6. Měření převedené veličiny .....	19
2.6.1. Převod otáček na napětí.....	19
2.6.2. Převod otáček na kmitočet .....	20
2.7. Stroboskopické otáčkoměry .....	20
3. Snímače pohybu .....	21
3.1. Optické senzory .....	21
3.1.1. Optické senzory s přímým šířením paprsku .....	21
3.1.2. Optické senzory s odraženým šířením paprsku (reflexní) .....	23
3.2. Magnetické senzory .....	24
3.2.1. Tachometrická dynamo .....	24
3.2.2. Impulsní magnetické senzory .....	25
3.2.3. Magnetické senzory s hallovou sondou.....	26
3.3. Kapacitní senzory.....	27
3.3.1. Princip změny vzájemné polohy desek kondenzátoru .....	27
3.3.2. Princip změny dielektrika v závislosti na změně polohy .....	28
3.4. Mechanické senzory .....	28
3.4.1. Mechanické senzory s mechanickým sepnutím spínače .....	29
3.4.2. Mechanické senzory s přemostěním kontaktů .....	29
3.5. Převod sinusového napětí na kmitočet .....	29
4. Návrh měřicího zařízení .....	31
4.1. Základní údaje o otáčivém pohybu gramofonu .....	31
4.2. Koncepce měřicího zařízení .....	31

4.2.1.	Výběr principu měření a metody snímání pohybu .....	32
4.2.2.	Výběr koncepce obvodů pro zpracování signálu .....	32
4.2.3.	Výběr vyhodnocovacího zařízení .....	33
4.2.4.	Ovládání přístroje a výstup .....	33
4.3.	Dílní měření na senzorech .....	34
4.3.1.	Postupy měření a zapojení měřícího pracoviště .....	34
4.3.2.	Záznamy a vyhodnocení těchto měření .....	36
4.4.	Návrh fyzického provedení zařízení bez USB .....	48
4.4.1.	Bloky měřícího zařízení .....	48
4.4.2.	Schéma zapojení modulů .....	49
4.5.	Návrh obslužného programu pro mikroprocesor .....	50
4.5.1.	Požadavky na ovládací software .....	50
4.6.	Testy na měřicím zařízení .....	51
4.6.1.	Výpočty předpokládaných výstupů .....	51
4.6.2.	Záznam měření .....	52
4.7.	Návrh fyzického provedení zařízení pro USB .....	53
4.7.1.	Návrh zapojení zařízení pro připojení k USB .....	54
4.7.2.	Návrh obslužného programu pro mikroprocesor .....	55
4.7.3.	Návrh obslužného programu pro PC .....	55
4.8.	Testy na měřicím zařízení .....	56
4.8.1.	Výpočty předpokládaných výstupů .....	56
4.8.2.	Záznam měření .....	57
5.	Měření na gramofonu .....	58
5.1.	Kotouč pro měření na gramofonu .....	58
5.2.	Měření na gramofonu navrženými přípravky .....	58
5.2.1.	Záznamy měření .....	59
6.	Závěr .....	64
6.1.	Zhodnocení dosažených výsledků .....	64
6.2.	Další možná zlepšení .....	65

## Úvod:

Měření rychlosti patří k nejčastějším měřením, která jsou prováděna v současné civilizaci. Cílem této bakalářské práce je rozbor možností metod pro měření rychlosti otáčení, principů snímání pohybu, zjišťování změn v rychlosti otáčení z naměřených hodnot a aplikace těchto poznatků do zařízení pro měření nerovnoměrnosti rychlosti otáčení. Měření nerovnoměrnosti se uplatňuje ve zvukové a počítačové technice, kde je měřena rychlost otáčení disků a čtecích mechanik. Využití je také při měření změny rychlosti větru na meteorologických stanicích.

Bakalářská práce je rozložena do tří základních částí. První částí je seznámení s otáčivým pohybem a způsoby jeho měření a snímání dat z rotujícího tělesa. Dále se práce zabývá návrhem detektoru pro tato měření a jeho realizace. Poslední částí bakalářské práce je měření na gramofonu a porovnání s teoretickými hodnotami gramofonu.

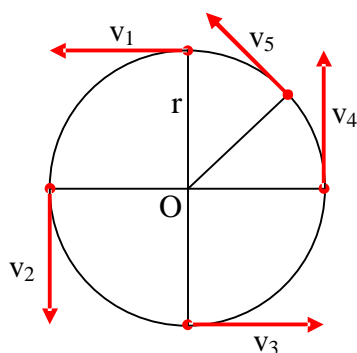
V první kapitole je zmíněna teorie o otáčivém pohybu a jeho změnách v závislosti na vlivu prostředí. Druhá kapitola se zabývá principy měření rychlosti otáčivého pohybu a aktuální výchylky točivého stroje. Ve třetí kapitole jsou rozebrány způsoby jak zjistit rychlost otáčení a úhel vychýlení točivého stroje od počáteční polohy. Čtvrtá kapitola obsahuje záznamy z pokusných měření na vybraných detektorech, koncept návrhu zařízení pro detekci nerovnoměrnosti otáčení, je v ní též provedeno navržení dvou konkrétních zařízení a jejich konstrukční postupy, postupy uvedení zařízení do činnosti a provedena testovací měření. V páté kapitole jsou zaznamenány a zpracovány výsledky ze skutečného měření provedeného na gramofonu. V šesté kapitole jsou shrnuty poznatky a výsledky měření získané během tvorby této bakalářské práce.

# 1. Rychlost otáčení hmotného bodu po kružnici

Hmotným bodem můžeme nahradit těleso, jehož rozměry a tvar nejsou při popisu zkoumaného děje podstatné. Nejčastěji jde o případ kdy rozměry tělesa jsou velmi malé vzhledem k ostatním rozměrům. (19)

## 1.1 Rovnoměrný pohyb po kružnici

V literatuře (7) a (17) lze dohledat: Pohyb hmotného bodu po kružnici je velmi běžný, konají ho body na obvodu kola s nehybnou osou, jako jsou body na obvodu gramofonové desky a body vrtule ventilátoru. Tento pohyb je nejjednodušší křivočarý pohyb. Dráha hmotného bodu je kružnice a velikost rychlosti je konstantní. Směr rychlosti se v každém bodu dráhy mění. V každém z těchto bodů má rychlost směr tečny ke kružnici, po níž se hmotný bod pohybuje, tento jev je zobrazen na obrázku *Obr 1.01*.



*Obr 1.01 – Rovnoměrný pohyb hmotného bodu po kružnici(17)*

Pro rovnoměrný pohyb po kružnici se zavádí úhlová rychlost, to je fyzikální veličina, která udává změnu úhlové dráhy za jednotku času. Úhlová rychlost se značí  $w$  a je udávána v jednotkách radián za sekundu.

$$\text{Okamžitá úhlová rychlost: } w = \frac{df}{dt}. \quad (17)$$

$$\text{Průměrná úhlová rychlost: } w = \frac{f}{t}. \quad (17)$$

Pro rovnoměrný otáčivý pohyb lze uvažovat:  $w = 2\pi f = \frac{2\pi}{T}$ . (17)

Vedlejší jednotkou soustavy SI pro frekvenci je jednotka otáčky za minutu RPM (*revolutions per minute*). Používá se nejčastěji pro vyjádření rychlosti nejrůznějších točivých strojů (motorů, turbín, gramofonových desek). Udává počet plných otočení měřeného zařízení za minutu. V poměru ke frekvenci je 60x větší.

Při rovnoměrném pohybu po kružnici se velikost jeho rychlosti nemění, mění se však směr rychlosti. Z toho vyplývá, že rychlost jako vektor konstantní není naznačeno na *Obr 1.01*. Má však stálou velikost, a pokud se tato velikost mění, má hmotný bod tečné zrychlení. Zrychlení je definováno jako podíl změny rychlosti nastalé za čas a času za který tato změna nastala. (7), (17)

$$\text{Zrychlení: } a = \frac{\Delta v}{\Delta t} = \frac{\Delta s}{\Delta t} \cdot \frac{v}{r}. \quad (17)$$

$$\text{Velikost okamžité rychlosti: } v = \frac{\Delta s}{\Delta t}. \quad (17)$$

$$\text{Zrychlení po dosažení rychlosti: } a = \frac{v^2}{r}. \quad (17)$$

Za použití vztahu  $v = wr$ , lze vyjádřit velikost zrychlení pomocí úhlové rychlosti vztahem  $a = w^2 r$ .

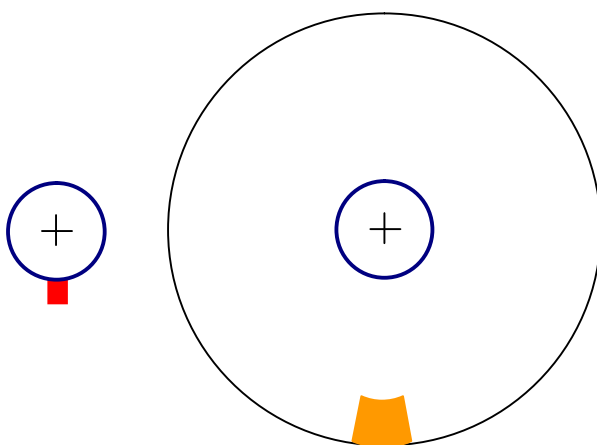
## 2. Principy měření otáčivého pohybu

Metod jak změřit rychlost otáčení točivého stroje je mnoho a každá metoda má své výhody a nevýhody, které se uplatňují v každé aplikaci s jinou vahou.

### 2.1 Měření doby oběhu o $360^\circ$

Často používaná metoda měření rychlosti otáčení je měření času, za který provede točivý stroj otočení hmotného bodu kolem své osy. Takto získaný čas se převede na otáčky za sekundu tím, že se čas oběhu vynásobí takovou hodnotou, která převede tento čas na jednu sekundu a tato konstanta je frekvence. Z dopočítané frekvence lze podle vztahů z první kapitoly určit úhlovou rychlost a úhlové zrychlení, pokud je znám i poloměr otáčení hmotného bodu, lze snadno dopočítat rychlost v metrech za sekundu, kterou se tento hmotný bod pohybuje po kružnici.

Pro využití této metody je nutné upravit hřídel točivého stroje tak, aby bylo možné detekovat průchod bodem  $0 + k * 360^\circ$ . Možnosti této úpravy si lze prohlédnout na obrázku *Obr 2.01*.



*Obr 2.01 – Úpravy hřídelí pro měření otočení o  $360^\circ$*

V *Obr 2.01* je první úpravou přidání jednoho výstupku na hřídel a k měření slouží detekce jeho průchodu určitým bodem. Druhou úpravou je přidání kotouče na hřídel a na kotouči je umístěna značka pro měření otočení o  $360^\circ$ . Typ značky na kotouči závisí na typu detekce, pro optickou reflexní detekci je použita optická odrazová plocha, pro přímou

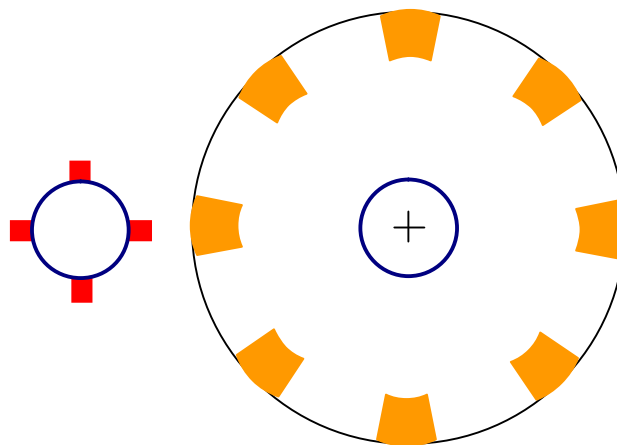
optickou detekci je v kotouči výřez umožňující světelnému záření projít materiálem kotouče, pro magnetickou detekci se umístí na místo značky permanentní magnet.

Tato metoda slouží k měření rychlosti otáčení tam, kde není potřeba měřit otáčení v různých částech kružnice, ale stačí k měření pouze čas otočení hřídele kolem své osy.

Změna rychlosti se vyhodnocuje po celých otáčkách, kdy se porovnávají úhlové rychlosti po sobě jdoucích period.

## 2.2 Měření počtu průchozích značek za jednotku času

Metoda, která umožňuje zjištění o kolik bodů se potočí hřídel točivého stroje za pevně daný časový interval. Nejběžnější roztečí měřících bodů je po stupních a jako pevně daný časový interval se udává jedna sekunda. Při takovýchto podmínkách měření se nejlépe přepočítávají body, které prošly přes detektor, na úhlovou rychlost. Z posloupností těchto úhlových rychlostí se dopočítává nerovnoměrnost (změna) rychlosti otáčení během částečného otočení. Pro rychle se točící stroje je nutné, pokud je cílem změřit změny otáčení během jedné otáčky, použít pro zpřesnění měření nižší časový interval než je jedna sekunda.

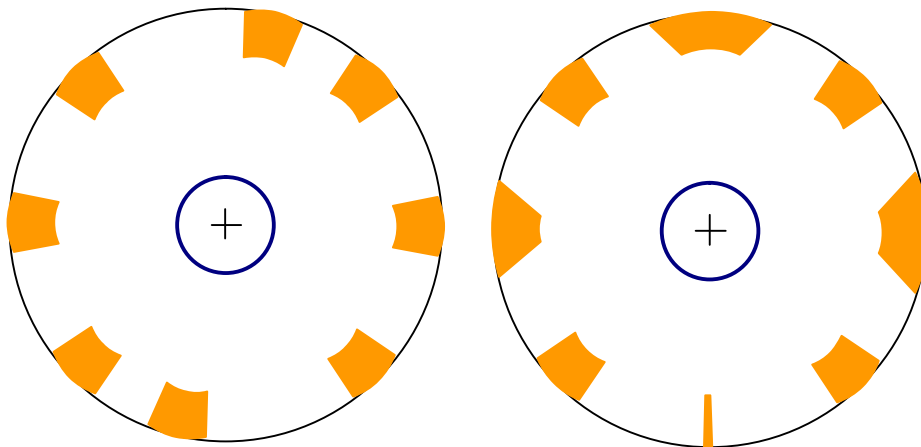


Obr 2.02 – Úpravy hřídelí pro měření počtu průchozích značek za čas

Nevýhodou této metody je fakt, že začátek sledovaného intervalu může následovat bezprostředně před průchodem značky a konec intervalu může nastat přímo za poslední průchozí značkou. Tento jev může způsobit, že je úhlová rychlost po sobě jdoucích úseků vyhodnocena jako rozdílná, a proto je nutné počítat s jistou tolerancí.



Tato metoda vyžaduje úpravu hřídele tak, aby bylo možné detekovat průchod značek i během pootočení hřídele, kdy nedojde k celému otočení hřídele. Tyto úpravy si lze prohlédnout na obrázku *Obr 2.02*. Pro přesné měření je důležité, aby měly všechny značky stejnou vzdálenost od předchozí značky a značky následující. Pro správné vystředění úpravy hřídele je také důležité, aby měly všechny značky stejný rozměr. Pokud by některá z těchto podmínek nebyla splněna, doházelo by k periodickým chybám měření. Tyto chyby by vznikaly tak, že za daný čas by prošlo detektorem sice různé množství značek, ale překonaná vzdálenost hmotného bodu by byla stejná jako předchozí. Další možností projevení této chyby je jev, kdy projde detektorem stejný počet značek, ale vzdálenost kterou hmotný bod vykonal by byla různá. Jak takovéto nevyhovující úpravy hřídele vypadají je na obrázku *Obr 2.03*.



*Obr 2.03 – Způsoby nevhodné úpravy hřídelí*

### 2.3 Měření času za který proběhne určitý počet značek

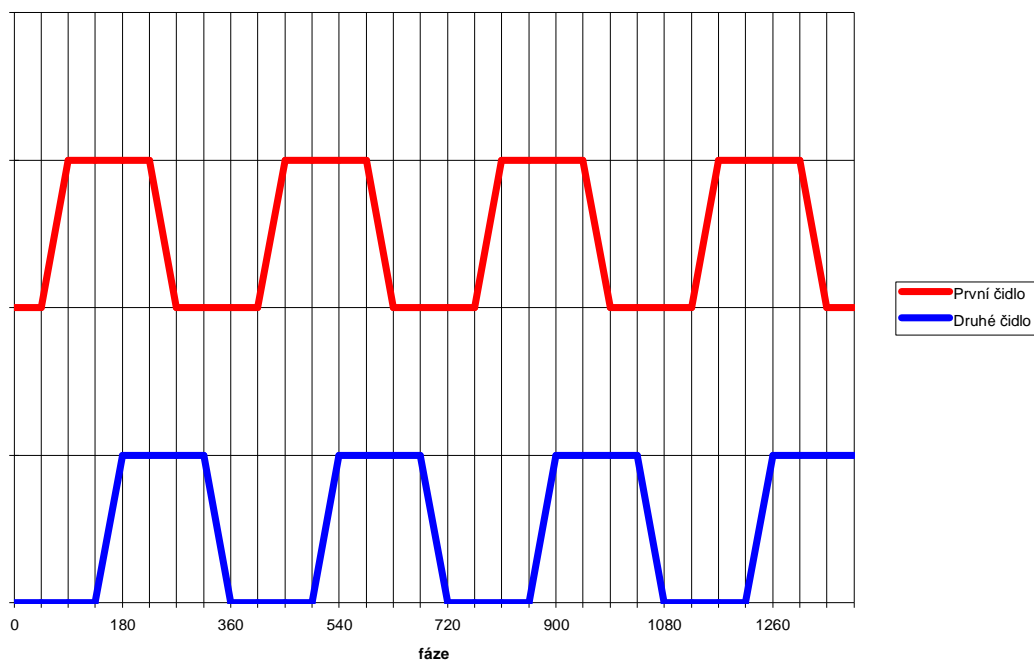
Metoda pracující na podobném principu jako metoda popsaná výše, základní rozdíl mezi nimi je ten, že v předchozí metodě je znám pevně daný čas a počítají se sepnutí čidla za tento čas. V této metodě je znám přesný počet sepnutí čidla a zjišťuje se jak dlouho trvá, než-li dojde k požadovanému počtu sepnutí čidel. Výhodou této metody je, že čidlo detekuje začátek průchodu značky, a tím je eliminován jev, kdy se měření zahajuje a končí mezi značkami. V této metodě se musí kalkulovat s faktem, kdy k sepnutí detektoru dochází v okolí značky a ne přesně na ní. Z toho vyplývá, že každý časový interval od značky ke značce může být různý. Tuto chybu lze snížit zvýšením počtu značek, které musí projít čidlem. Problém nastává v okamžiku, kdy je důležité měřit změny rychlosti otáčení s větší přesností. Vlivem tohoto faktu je potřeba počet značek omezit, aby nedocházelo ke zkreslení měření. Z výše zmíněného plyne nutnost volit počet detekovaných sepnutí jako kompromis mezi přesností

sepnutí a přesností nerovnoměrnosti otáčení. Přesnost měření lze zvýšit rozložením na intervalu více hodinových vzorků, to se provede zvýšením hodinového kmitočtu  $f_{CLK}$ .

Úpravy hřídele pro tuto metodu a kritéria těchto úprav jsou shodná s předchozí metodou a jsou tedy popsány v kapitole 2.4.

## 2.4 Měření směru otáčení

Pro některé aplikace je nutné měření nejenom rychlosti otáčení, ale také směru otáčení. Měření směru otáčení se provádí pomocí dvou čidel pohybu, které jsou vzájemně fázově posunuté. To znamená, že v okamžiku kdy je první z této dvojice čidel sepnuto, je druhé stále ve stavu rozepnuto a sepne s fázovým zpožděním. Systém stavů sepnutí je zobrazen na obrázku *Obr 2.04*, ze kterého vyplývá tabulka *Tab 2.01*.



*Obr 2.04 – Pořadí spínání čidel*

*Tab 2.01- Tabulka určení směru podle stavů čidel*

	Stavy spínání čidel 1. směr				Stavy spínání čidel 2. směr			
První čidlo	0	1	1	0	0	0	1	1
Druhé čidlo	0	0	1	1	0	1	1	0
Směr	První směr				Druhý směr			

Z tabulky *Tab 2.01* vychází tabulka *Tab 2.02* ve které je zaznamenán systém přechodů stavů prvního čidla z 1 do 1' a druhého čidla z 2 do 2'. Ve sloupci výstup je popsán jev

vyplývající z přechodu čidel. Chybový stav může být způsoben nedostatečnou četností vzorkování, nebo chybným rozložením čidel.

Tab 2.01- Tabulka přechodů

1	2	1'	2'	Výstup
0	0	0	0	Nelze určit
0	0	0	1	První směr
0	0	1	1	Chyba
0	0	1	0	Druhý směr
0	1	0	0	Druhý směr
0	1	0	1	Nelze určit
0	1	1	1	První směr
0	1	1	0	Chyba
1	0	0	0	První směr
1	0	0	1	Chyba
1	0	1	1	Druhý směr
1	0	1	0	Nelze určit
1	1	0	0	Chyba
1	1	0	1	Druhý směr
1	1	1	1	Nelze určit
1	1	1	0	První směr

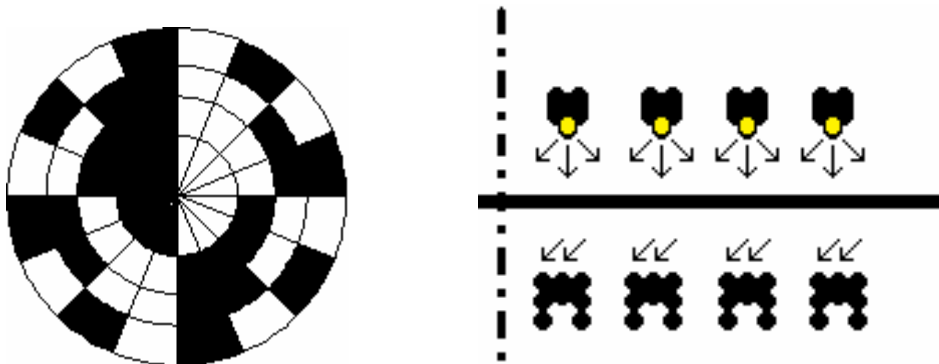
## 2.5 Měření aktuální výchylky

Pro speciální aplikace jako je řízení otevírání dveří, nebo krokového motoru robota je důležité měření aktuální výchylky pootočení hřídele točivého stroje. Toto měření lze provádět sice metodami z kapitol 2.2 a 2.3 za pomoci určování směru otáčení podle kapitoly 2.4, mnohem jednodušší na provedení je metoda, která nám udává v každém okamžiku aktuální výchylku. Výhodou této metody je její výstup, kterým je aktuální výchylka v binárním kódu. Další předností této metody je fakt, že výstupem je vždy přesný úhel, oproti metodě dopočítávání, kterou je nutno doplnit o počáteční vychýlení externě.

Úprava hřídele pro tuto metodu je však mnohem komplikovanější a na snímání vychýlení této hřídele je potřeba více čidel. Čím větší přesnost vychýlení je požadována tím více čidel je na její realizaci zapotřebí. Počet čidel pro snímání výchylky je dán vztahem uvedeným níže a způsob jak upravit hřídel pro tuto metodu snímání je na obrázku *Obr 2.05*.

$$\text{Vztah pro výpočet počtu čidel: } 2^n = 2^x \Rightarrow n = x$$

Kde  $x$  je celé číslo, které udává mocninu čísla 2 tak, aby byl výsledek roven počtu stavů výstupu a číslo  $n$  udává počet čidel potřebných ke snímání aktuální výchylky.



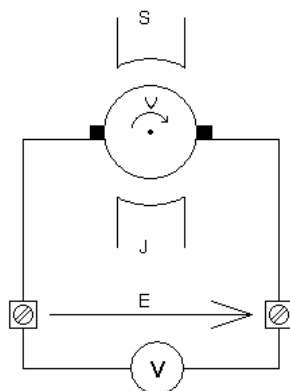
Obr 2.05 – Princip kotouče pro aktuální měření výchylky a jeho snímání

## 2.6 Měření převedené veličiny

Další často používanou metodou měření rychlosti otáčení točivého stroje je převedení fyzikální veličiny na veličinu, která je snáze měřitelná. Nejběžnější veličiny na které jsou otáčky převáděny jsou napětí, nebo kmitočet.

### 2.6.1 Převod otáček na napětí

Tato metoda měření otáček spočívá v převedení mechanické energie na energii elektrickou. Pro její realizaci se využívají elektrické zdroje (alternátory, dynama). Napětí lze měřit voltmetrem a pomocí přechování stupnice lze vytvořit jako výstup voltmetru přímo otáčky točivého stroje. Z toho vyplývá, že se jedná co se týče zpracování a vyhodnocování signálu o jednu z nejjednodušších metod měření otáček točivého stroje. Tato metoda je vhodná u strojů s velkou kinetickou energií, u strojů s malou kinetickou energií se uplatňuje zatížení měřeného stroje, které vzniká v důsledku přímého kontaktu detektoru s hřídelí točivého stroje. Princip měření touto metodou je na obrázku Obr 2.06.



Obr 2.06 – Princip měření otáček pomocí tachometrického dynama (3)

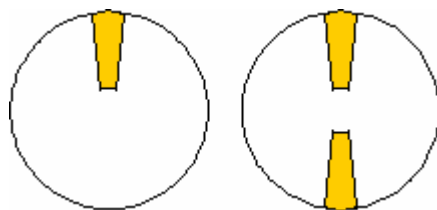
Kotva dynama je pevně spojena s rotující částí a vlivem změny úhlu natočení cívky rychlostí ( $V$ ) v magnetickém poli permanentního magnetu se v ní indukuje elektromotorické napětí  $E$ .

### 2.6.2 Převod otáček na kmitočty

V této metodě měření je převáděna délka mechanicky zaznamenaného sinusového signálu na kmitočty. Princip spočívá v tom, že se zvukový kotouč roztočí konstantní rychlostí a přehráváním sinusového průběhu vznikne pískavý zvuk stálého kmitočtu. Aktuální hodnota tohoto kmitočtu se zjistí pomocí čítače. Změny (nerovnoměrnosti) otáčení se projevují jako změny kmitočtu. S využitím kmitočtu lze podle první kapitoly dopočítat úhlovou rychlost. Princip detekce touto metodou a vlivy na její přesnost jsou popsány v kapitole 3.5. Tato metoda se využívá ve zvukařském průmyslu.

## 2.7 Stroboskopické otáčkoměry

Jsou založeny na nedostatku lidského oka. Pracují na principu porovnávání otáček měřené hřídele s jiným periodickým jevem, jehož kmitočty je známý. Na hřídel je upevněn kotouč s libovolným lichým počtem značek, který je ozařován výbojem ze stroboskopu o známé frekvenci s krátkou dobou záblesku. V okamžiku kdy se zastaví značky na místě a kotouč se jeví jako stojící, je kmitočty rotujícího kotouče celým násobkem kmitočtu stroboskopu. Po ustálení kotouče je kmitočty stroboskopu postupně zvyšován po dvojnásobcích svého kmitočtu. Objeví-li se při zvyšování kmitočtu dvojnásobné množství značek, než jaké je na kotouči, které jsou na kotouči umístěny symetricky. Je kmitočty stroboskopu dvojnásobkem kmitočtu měřeného. Princip zobrazení těchto stavů kotouče pro jednu značku je zobrazen na obrázku *Obr 2.07*, kde první kotouč zachycuje ustálený stav při kmitočtu, který je celým násobkem kmitočtu stroboskopu a druhý zachycuje stav, kdy je kmitočty kotouče polovičním kmitočtem stroboskopu.



*Obr 2.07 – Kotouč při kmitočtu stroboskopu a polovině kmitočtu stroboskopu*

## 3. Snímače pohybu

Aby bylo možné měřit rychlost otáčení je třeba vybrat způsob detekce pohybu. V této kapitole jsou rozebrány nejběžnější způsoby detekce pohybu, a to optickými, magnetickými, kapacitními, mechanickými a zvukovými cestami.

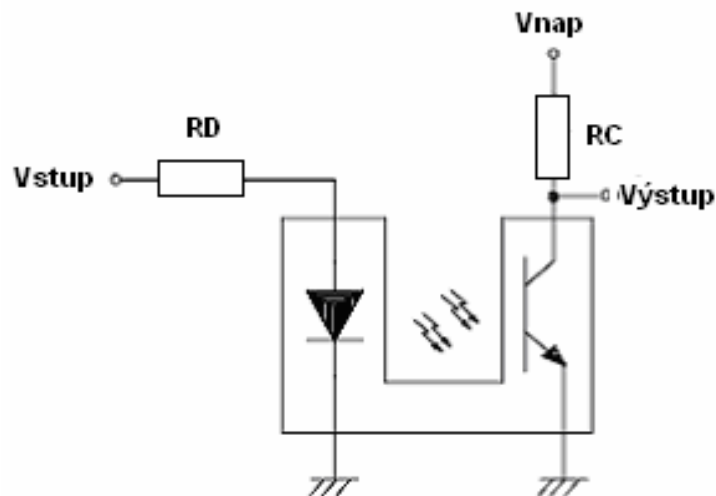
### 3.1 Optické senzory

Optické senzory lze rozdělit do dvou základních skupin. První skupinou jsou senzory s přímým šířením paprsku, to znamená, že vysílaný paprsek je nasměrován na přijímač a detekce pohybu se uskutečňuje stíněním paprsku, z toho vyplývá, že světelný paprsek musí procházet měřeným prostředím. Druhou skupinou jsou senzory s odraženým paprskem, kde se paprsek z vysílače na sensor odráží a dojde-li ke změně logické úrovně na výstupu snímače způsobené vlivem změny intenzity odražených paprsků, je zaznamenán pohyb.

#### 3.1.1 Optické senzory s přímým šířením paprsku

Tento způsob snímání vyžaduje, aby byl zdroj světelného záření nasměrován v přímce směrem k optickému snímači. Nejběžnějšími zařízeními využívajícími tento způsob snímání jsou laserové závory a inkrementální čidla v kuličkových myších.

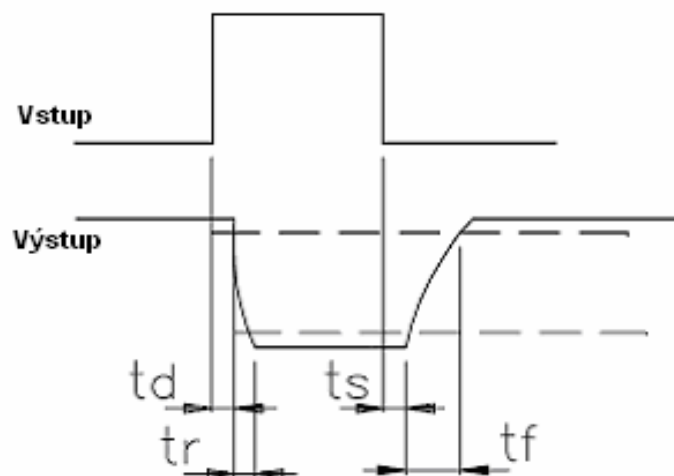
Laserová závora je složena ze dvou částí. První částí je zdroj světelné energie, který může být buď trvalým zdrojem světla, v tom případě dojde ke změně výstupu v okamžiku, kdy je světelná přenosová cesta zastíněna, nebo může být závora použita jako vazební člen a v tom případě je výstup závislý na zdroji budícím světelný zdroj. Druhou částí závory je světelný detektor, nejčastěji se používá fototranzistor, který se vlivem dopadajícího světelného záření otevírá, nebo přivírá. Princip zapojení laserové závory je zobrazen na obrázku *Obr 3.01*. Z obrázku *Obr 3.02* vyplývá, že je-li na vstup přiveden obdélníkový puls, objeví se na výstupu také obdélníkový puls, který však bude deformovaný.



Obr 3.01 – Princip optické závory (13)

Popis rozdílů výstupního pulsu :

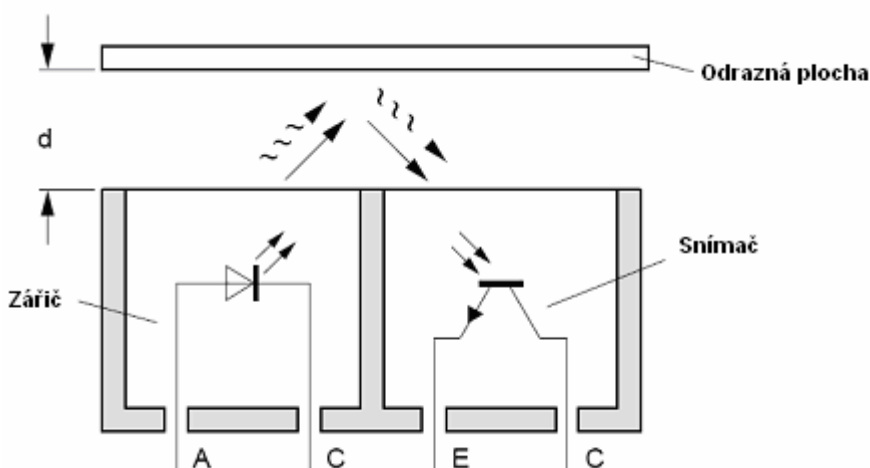
- Invertovaný – Jelikož má tranzistor uzemněný emitor a výstup na kolektoru, který je připojen přes Pull-up (zvedací) odpor  $R_C$  na zdroj napětí, je po přivedení logické jedničky na vstup je na výstupu logická nula, a při logické nule na vstupu je na výstupu logická jednička.
- Časově posunutý – Po přivedení logické jedničky na vstup, se musí rozzářit světelný zdroj a přenést informaci prostorem, z toho plyne, že začátek a konec pulsu jsou zpožděny. Na obrázku jsou tyto anomálie okótovány jako  $t_d$  (dopravní zpoždění) a  $t_s$ .
- Exponenciální doba doběhu a náběhu – Jelikož k plnému vybuzení světelného zdroje nedojde okamžitě, je tvar sestupné hrany exponenciální, tento jev je okótován jako  $t_r$  (time rise – doba náběžné hrany). Mnohem hůře se však při přenosu uplatní rekombinační jev, který zapříčiní, že do doby než se všechny uvolněné elektrony usadí do děr (zrekombinují) dochází k pozvolnému pohasínání světelného zdroje, ve výstupním průběhu je označeno zkratkou  $t_f$  (time fall – doba sestupné hrany).



Obr 3.02 – Závislost výstupu optické závory na vstupním pulsu (13)

### 3.1.2 Optické senzory s odraženým šířením paprsku (reflexní)

Výhodou tohoto detektoru při měření otáčivého pohybu je, že nemusí procházet měřeným prostředím, jeho princip je zobrazen na obrázku Obr 3.03. Vzniká zde ovšem problém se stabilitou otáčejícího se objektu, pohybující se objekt musí pro správné snímání udržovat konstantní odstup od snímajícího pracoviště, z toho vyplývá, že pokud dojde k vychýlení objektu nemusí se paprsek odrazit na detektor, a ten pak nezaznamená průchod měřeného bodu.

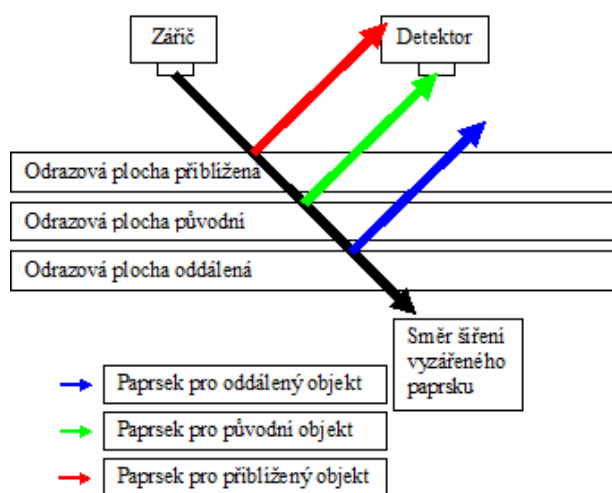


Obr 3.03 – Princip detektoru využívajícího odražené záření (14)

Z předchozího odstavce plyne, že princip detektoru je velmi podobný předešlému způsobu, ale řeší se tu nutnost přesnosti odrazu. Z důvodu potřeby přesného měření je potřeba



vytvořit světelný paprsek s co nejmenším poloměrem, to lze provést zaprvé použitím usměrněného zdroje světla (LASER – Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation – Zesílení optického záření pomocí vynucené emise záření), a nebo průchodem světelného záření otvorem s požadovaným průměrem, kde dojde k vysokým ztrátám světla na stínící překážce. Zmenšením poloměru paprsku se sníží přesnost snímání v okamžicích kdy rotující těleso změní svou vzdálenost od čidla, a proto je šíře paprsku kompromisem mezi těmito výše zmíněnými požadavky, pro hlubší pochopení jejich opodstatněnosti je přiložen obrázek *Obr 3.04*.



*Obr 3.04 – Problematika paprsku odraženého od měřeného objektu*

## 3.2 Magnetické senzory

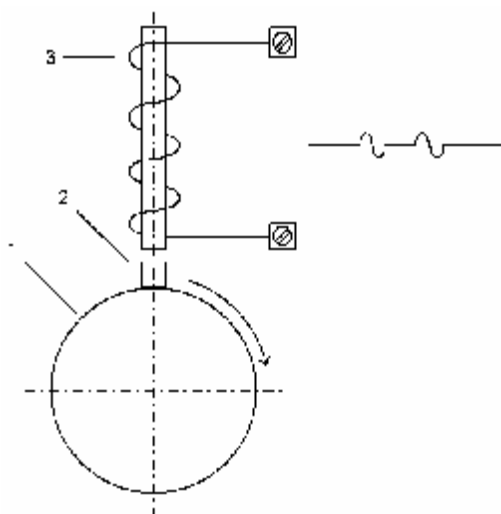
Magnetické detektory jsou založeny na principu vzniku elektromotorického napětí, které vzniká ve vodiči změnou intenzity magnetického pole působícího na tento vodič. Další možností jejich provedení je pomocí soustavy hallových sond.

### 3.2.1 Tachometrická dynamika

Detektory s přímou přeměnou mechanické energie na elektrickou musejí být nejprve sami roztočeny a tím zatěžují měřené zařízení. Tento typ detektoru je popsán v kapitole 2.6.1. Je to nejběžnější způsob detekce pro metodu měření rychlosti otáčení ve výše zmíněné kapitole.

### 3.2.2 Impulsní magnetické senzory

Impulsní magnetické detektory pracují na principu detekce změny magnetického odporu v obvodu konstantního magnetického pole. Tento jev lze vyvolat více způsoby, jedním z nich je umístit do magnetického obvodu permanentní magnet s obrácenou polaritou. To se projeví indukcí proudu v elektrickém obvodu. Podobný princip lze využít přidáním magneticky vodivého prvku do magnetického obvodu. V první metodě byl použit jako impulsní činitel přidaný magnetický zdroj, ale v této druhé metodě je využito změny odporu ustáleného magnetického obvodu. Princip impulsního magnetického detektoru je na obrázku *Obr 3.05*.

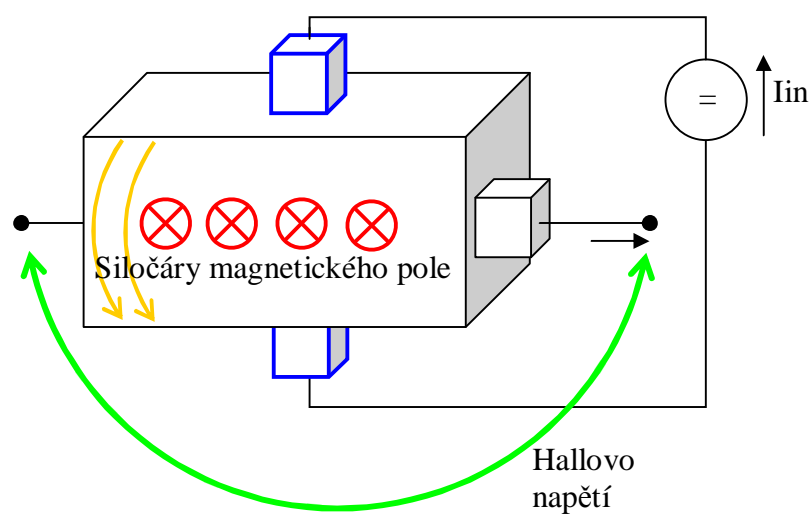


*Obr 3.05 – Princip impulsní magnetické detekce (3)*

Na rotující hřídeli (1) obrázku *Obr 3.05* je upevněn zdroj impulsního signálu (2), zdroje impulsního signálu byli rozvedeny v předchozím odstavci. A vlivem pohybu tohoto zdroje dochází v pevně ukotvené cívce (3) ke vzniku kladných pulsů. Vlivem oddálení impulsního zdroje přechází kladný puls plynule na záporný, je-li pohyb dostatečně rychlý, tak se po odeznění těchto přechodových jevů úroveň výstupního signálu ustálí na konstantní přednastavené hodnotě. Znázorněno průběhem mezi výstupními svorkami.

### 3.2.3 Magnetické senzory s hallovou sondou

Hallová sonda je polovodičový prvek pro měření magnetických polí. Při vystavení některých polovodičů, jimiž prochází elektrický proud, magnetickému poli působícímu kolmo na směr šíření elektrického, vytvoří se v polovodiči elektrické napětí, které je kolmé na směr pole i proudu. Hallová sonda je mnohem universálnější, než fluxmetr, ale není tak přesná.



Obr 3.06 – Princip Hallovy sondy

Na obrázku *Obr 3.06* je nakreslen princip Hallovy sondy, červené kruhy s křížkem znázorňují směr působení magnetického pole. Kolmo na směr působení magnetického pole teče elektrický proud z proudového zdroje  $I_{in}$ , který je připojený na modré elektrody. Zelená šipka označuje elektrody na kterých vzniká Hallové napětí. Žluté šipky znázorňují vychýlení elektrického proudu v sondě vlivem působení magnetického pole. Smysl jejich vychýlení udává polaritu Hallova napětí.

### 3.3 Kapacitní senzory

Princip těchto detektorů vychází ze změny kapacity kondenzátoru. Změnu této kapacity lze docílit záměnou dielektrika, nebo změnou velikosti či vzájemné polohy desek kondenzátoru. Detekce v těchto čidlech lze provádět pozorováním přechodových dějů vzniklých při změně kapacity, nebo pomocí změny výstupů RC, CC, nebo LC děličů buzených střídavým napětím o známém kmitočtu.

$$\text{Základní vztah pro výpočet kapacity: } C = \frac{\epsilon_0 \cdot \epsilon_r \cdot S}{d}. \quad (18)$$

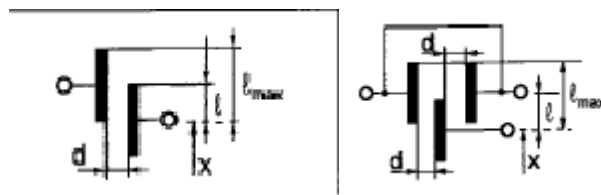
$\epsilon_0, \epsilon_r$  – permitivita vakua a relativní permitivita dielektrika

S – plocha desek kapacitoru

d – šířka dielektrika

#### 3.3.1 Princip změny vzájemné polohy desek kondenzátoru

Nejjednodušším provedením tohoto detektoru jsou dvě elektrody, kde jedna má pevnou pozici a druhá se pohybuje rovnoběžně s elektrodou upevněnou. Pro zlepšení vlastností detektoru se zapojuje do detektoru více elektrod, které jsou složeny ve dvou skupinách.



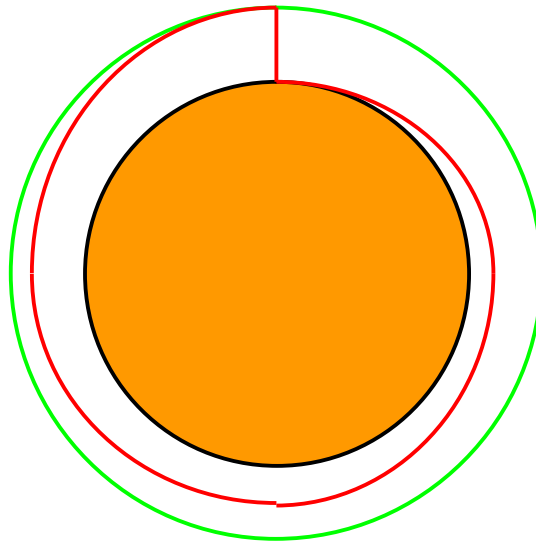
Obr 3.07 – Kapacitní detektory s proměnnou vzájemnou polohou(18)

Na obrázcích Obr 3.07 je první zobrazen nejjednodušší kapacitní detektor, který je složen ze dvou desek. Druhý obrázek v pořadí je princip detektoru s více elektrodami. Šířka dielektrika je na obrázcích označena jako „d“ a pro tento princip detekce je konstantní. Aktuální výchylka vzájemné polohy desek je označena písmenem „l“. Vzájemná poloha elektrod, kdy má detektor největší kapacitu je značen jako „ $l_{max}$ “. Jedná se o stav, při kterém

mají elektrody střed plochy ve stejném bodě osy po které se pohybují. Směr posuvu označuje šipka „x“.

### 3.3.2 Princip změny dielektrika v závislosti na změně polohy

Princip tohoto detektoru spočívá v posuvu dielektrika v kapacitoru. Detektor má dvě nepohyblivé elektrody se vzduchovým dielektrikem a jeho kapacita se mění zasunováním a vysunováním dielektrika s permitivitou různou od permitivity vzduchu. Úhel a směr vychýlení se dá určit tvarováním dielektrika, kde je každý úhel zastoupen konkrétní plochou dielektrika.



*Obr 3.08 – Úprava měřícího kotouče pro kapacitní detekci polohy*

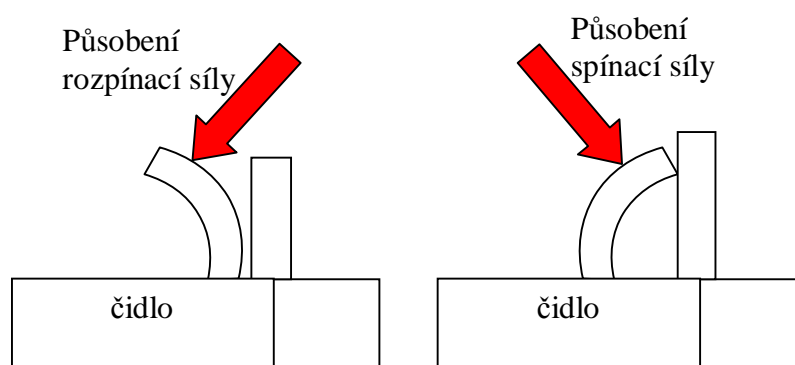
Červeně je na obrázku *Obr 3.08* znázorněno rozdělení kotouče, kde mezi červenou a zelenou je plocha prvního dielektrika a mezi červenou a černou plocha dielektrika druhého. Rozdílné vlastnosti dielektrik slouží k změně kapacity. První dielektrikum lze nahradit vzduchovým, pevné je zavedeno z důvodu vystředění kotouče.

### 3.4 Mechanické senzory

Jedná se o jedny z prvních senzorů, dnes se od nich při měření pohybu povětšinou upouští. Jsou velmi běžné ve výukových aplikacích a využívají se v ovládacích prvcích, ale v zabezpečovací technice jsou dnes nahrazovány čidly magnetickými.

### 3.4.1 Mechanické senzory s mechanickým sepnutím spínače

Princip těchto čidel spočívá v tom, že je jeden z kontaktů pružný a k zaznamenání činnosti dojde v okamžiku, kdy je ohnut tak, aby se fyzicky spojil s druhým kontaktem, nebo se od něho odpojil. Tyto principy jsou zobrazeny na obrázku *Obr 3.09*.



*Obr 3.09 – Principy mechanických čidel*

### 3.4.2 Mechanické senzory s přemostěním kontaktů

Systém přemostňovaných kontaktů je založen na principu běžců, které pevné kontakty spojují. Tento systém je aplikován v otočných prepínačích, kde jsou ke středovému vývodu postupně připojovány krajní vývody. Jednou z možností aplikace takového prepínače jako čidla, je nastavit na okrajové vývody různá napětí a tyto vstupy dekódovat A/D převodníkem. Jednodušší variantou je připojit okrajové vstupy na porty vyhodnocovacího zařízení a středový kontakt uzemnit.

## 3.5 Převod sinusového napětí na kmitočet

Tuto metodu detekce lze využít na zařízení přehrávající zvukové záznamy. Princip detekce spočívá v tom, že je na přehrávaném médiu zaznamenán zvuk sinusového průběhu mající konstantní kmitočet. Přehráváním média generuje zvukový výstup zařízení sinusové tóny, které jsou pomocí čítače převáděny na aktuálně přehrávaný kmitočet. Při pevně dané délce jedné periody průběhu a změřeném kmitočtu ze zvukového výstupu lze dopočítat aktuální rychlost otáčení podle níže uvedených vztahů.

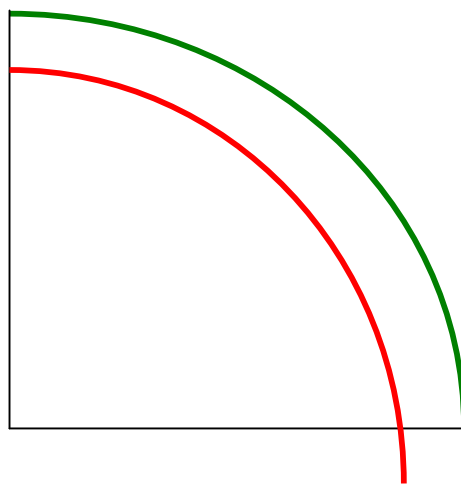
Doba přehrání jedné periody je dána vztahem:  $T = \frac{1}{f}$  .

Aktuální rychlost je dána vztahem:  $v = \frac{l}{T} = f * l$  .

$l$  – délka průběhu zaznamenaného na médiu

$T$  – Doba přehrání jednoho průběhu

Je-li záznam na médiu uložen v různých vzdálenostech od středu otáčení, vzniká problém, z obrázku *Obr 3.10*, kde jak zelená tak červená výseč mají stejnou délku, je patrné, že stejné periody se přehrávají s různým kmitočtem. Tento problém lze odstranit dvěma způsoby, jednou možností je propočítávat změnu kmitočtu na změnu vzdálenosti, ale jednodušší variantou je zaznamenávat na médium pro každou konkrétní vzdálenost od středu otáčení stejný počet period, které mají různou délku. Tím je zajištěno, že přehrávaný kmitočet je vždy konstantní a délka je vybrána pro jeden konkrétní případ, například pro výběr délky periody rovné vlnové délce kmitočtu je výstupem přímo rychlost.



*Obr 3.10 – Délka periody záznamu na médiu*

## 4. Návrh měřicího zařízení

Z potřeby provést měření na konkrétní aplikaci, vyplývá potřeba navrhnout zařízení, které bude schopno měřit rychlost otáčení na této aplikaci. Zařízení musí být navrženo tak, aby ho bylo možné v případě potřeby snadno přeorientovat na jinou aplikaci. Pro demonstrativní účely je upraveno zařízení pro měření nerovnoměrností otáčení desky gramofonu.

### 4.1 Základní údaje o otáčivém pohybu gramofonu

Gramofon je zařízení pro přehrávání nosičů s mechanickým (analogovým) záznamem zvuku. Byl vyvinut ze dvou přístrojů fonografu a orchestrionu. Na konci 20. století byl gramofon částečně vytlačen digitálními přehrávači. Udržel se však jako zvláštní hudební nástroj v některých nových hudebních směrech. Průměr desek LP je 30 cm, desek SP je 17 cm a dnešní CD má průměr 12 cm.

SP (single play) – menší typ vinylových desek obvykle na rychlost 45 otáček za minutu, výjimečně na rychlost 33 otáček za minutu. EP (extended play) - menší typ vinylových desek obvykle na rychlost 45. V podstatě totožné s SP, ale na každé straně jsou 2 (někdy i 3) písničky. Vydávány byly mnohem méně a mívaly speciální obaly. Vzácně byly vydávány tyto desky i s rychlostí 33 otáček se zmenšeným středem, na jednu stranu se tak daly zaznamenat až 4 drobné skladby. LP (long play – „elpíčko“ ) – dlouhohrající deska obvykle na rychlost 33,3 rpm, zpočátku výjimečně i na rychlost 16 rpm. V případě populární hudby většinou obsahovala celé jedno album, u vážné hudby pak jakoukoliv jinou nahrávku v celkové délce až 45 minut, výjimečně i delší. Z výše zmíněného plyne, že gramofon je zařízení, které má několik rychlostí otáčení. Pro správné přehrávání je důležité, aby se deska otáčela správnou rychlostí a pokud možno stálou v čase. Předmětem zájmu této bakalářské práce je sledování změn rychlosti otáčení talíře gramofonu v čase.

### 4.2 Koncepce měřicího zařízení

Zařízení pro měření nerovnoměrností otáčení, sestává z měřicího členu, řídicího modulu, modulu pro komunikaci s PC a programu počítače. Do modulů jsou fyzické části detektoru rozvrženy pro jednodušší ožívování tohoto zařízení.



#### 4.2.1 Výběr principu měření a metody snímání pohybu

Měřicí člen je senzor, který je upraven tak, aby jeho výstupem byly obdélníkové pulsy. Jako detektor pro toto zařízení byl vybrán obvod KTIR0611S (optická závora), který vyniká rychlými přechody mezi logickými úrovněmi. U tohoto způsobu detekce odpadá problém s nastavováním vzdálenosti senzoru od měřeného objektu. Porovnání vlastností optických detektorů je v kapitole 4.3, kde jsou zařazeny i záznamy z měření na těchto detektorech.

Jako způsob měření byl vybrán systém, kdy je měřen časový interval za který detekuje snímač daný počet značek. Při rovnoměrném rozmístění značek na kotouči je to nejsnáze vyhodnotitelný postup. Při použití systému, kdy by se počítal počet značek za jednotku času by docházelo k častým výkyvům způsobeným tím, že začátek časového intervalu by nemusel být při začátku značky. I při nastavení začátku časového intervalu na náběžnou hranu vyvolanou značkou, by nebylo zaručeno, že konec časového intervalu nebude v jiné části periody než na začátku značky. Tím by docházelo k chybě měření v rozsahu jedné periody značek.

#### 4.2.2 Výběr koncepce obvodů pro zpracování signálu

Pro zlepšení vlastností detektoru je nutné navrhnout obvod na zpracování měřené veličiny tak, aby byly náběžná a sestupná hrana pulsů co nejkratší. Z měření na KTIR0611S byly vyzkoušeny nevhodnější parametry součástek pro buzení tohoto detektoru. Schéma buzení detektoru je na *Obr 3.01*. Vybrané parametry budících součástek pro buzení detektoru napájeného napětím 5 V jsou RL (rezistor load - zátěže) = 10 k $\Omega$  a RD (rezistor předradný k diodě) = 120  $\Omega$ . Časy přechodů mezi logickými úrovněmi jsou závislé na rychlosti pohybu stínící clonky a její šířce. Při nedostatečné šířce clonky může dojít k chybám měření způsobených zasazením úrovně logické jedničky do pásma hazardních stavů, to je zapříčiněno nedostatečným zastíněním světelného zdroje. Je-li rychlost pohybu clonky příliš vysoká, může dojít ke stavům, kdy zaclonění světelného zdroje skončí dříve, než odeznějí přechodové děje a tím vzniká stejný problém jako při nedostatečné šířce clonky. Tyto neduhy lze z velké části eliminovat přivedením výstupního signálu z detektoru na komparátor. Ten zajistí zrychlení doby přechodu mezi logickými úrovněmi, do určité úrovně signálu na vstupu udržuje na výstupu úroveň logické nuly a od této úrovně přepíná na logickou jedničku. Při sestupné hraně funguje přesně opačně. Tento obvod má také určité doby přechodů mezi úrovněmi, ale jejich délka již není závislá na rychlosti pohybu clonky ani její délce.

### 4.2.3 Výběr vyhodnocovacího zařízení

Pro vyhodnocování měření je nutné zaznamenávat data a posléze tato data zpracovat. Nejjednodušším způsobem vyhodnocování dat je jejich zpracování v osobním počítači. Nevýhodou přímého odesílání a zpracovávání délek pulsů je potřeba operačního systému reálného času. Klasický operační systém nemá zajištěnou časovou odezvu. Pro použití počítače s běžným operačním systémem je nutné data zaznamenávat v reálném čase a ukládat, toto lze zajistit použitím mikroprocesoru, který zaznamenává naměřená data. Naměřená data jsou zaznamenána do mikroprocesoru a z něho se přepíše do tabulkového procesoru v PC, matematicky se zpracují a vynesou do grafů. Jako zaznamenávací obvod byl vybrán ATMEGA16, který má HW čítače, a tyto čítače nezabírají programový čas. Při snímání dat je využita jednotka input capture, která ihned po sepnutí přenese obsah čítače do registru, v němž se na rozdíl od čítače data do další detekce signálu nemění.

### 4.2.4 Ovládání přístroje a výstup

Přístroj je řízen pěti tlačítky, kde dvěma se přepíná mezi druhy měření. Prvním druhem měření je sejmutí jednoho vzorku, druhým je změření dvou po sobě jdoucích vzorků a výstupem je absolutní hodnota jejich rozdílu a třetím druhem měření je detekce sta po sobě jdoucích vzorků. Data jsou vypisována v hexadecimální soustavě na čtyřmístný display. Vyhodnocení dat se provede v PC.

#### Metody zpracování naměřených dat:

- A. Změna úhlové rychlosti vztažená k předchozímu vzorku
- B. Aktuální průměrná úhlová rychlost otáčení ze všech dosud naměřených vzorků
- C. Rozdíl úhlové rychlosti vztažený k aktuální průměrné hodnotě
- D. Úhlová rychlost aktuálně naměřeného vzorku
- E. Průměr z x posledních vzorků úhlové rychlosti
- F. Rozdíl vztažený k x vzorkovému průměru
- G. Změna proti požadované rychlosti

Vztahy pro výpočty konkrétních průběhů jsou zařazeny v příloze B v tabulce Tab B.01.

### 4.3 Dílčí měření na senzorech

Pro specializaci zařízení je potřeba vybrat vhodný způsob detekce pohybu. Pro přehled aplikovatelnosti je vhodné provést orientační měření na dostupných čidlech a porovnat jejich vlastnosti pro danou aplikaci.

#### 4.3.1 Postupy měření a zapojení měřicího pracoviště

Fotografie měřicích přípravků pro optická čidla jsou na obrázku Obr 4.01. Optická čidla použitá při měření jsou: KTIR0611s (závora), TCRT5000 (reflexní) a TCRT1000 (reflexní). Všechny testované optické detektory pracují na principu infra-diod, emitující optické záření na vlnové délce 950nm a fototranzistoru, který je tímto zářením spínán. Napájení přípravků bylo stanoveno na 5V. Podle tabulek z přílohy A byly dopočítány hodnoty předřadných rezistorů.

Přípravek s TCRT1000 a přípravek s TCRT5000:

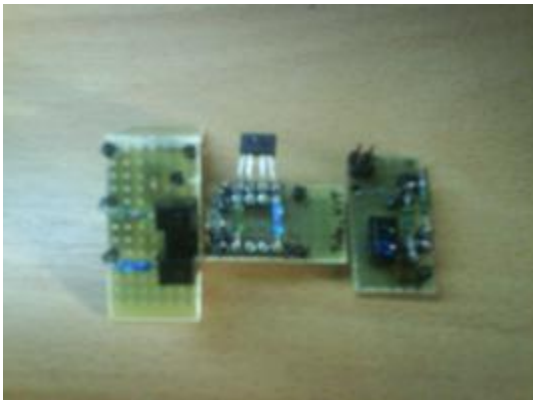
- Zdroj: 
$$R_D = \frac{V_{R_D}}{I_D} = \frac{V_{NAP} - V_D}{I_D} = \frac{5 - 1,25}{0,03} = 125 \Omega$$
- Spínač: 
$$R_K = \frac{V_K}{I_K} = \frac{V_{NAP}}{I_K} = \frac{5}{0,0005} = 10 \text{ k}\Omega$$

Elektrické charakteristiky obou detektorů se liší pouze v maximálním proudu diodou. Proud diodou byl zvolen 30 miliampérů. Tato hodnota vyhovuje oběma zapojením, TCRT1000 má předepsaný maximální proud diodou 50mA a TCRT5000 má předepsaný proud diodou 60mA. Předřadný odpor diody byl zaokrouhlen podle řady na 120  $\Omega$ . Předřadný odpor kolektoru, který slouží k omezení maximálního proudu tekoucího kolektorem je-li tranzistor sepnut, je dán podle výpočtu 10 k $\Omega$  a tím je omezen maximální proud kolektorem na hodnotu 500  $\mu$ A. Tato hodnota vychází z tabulek Tab A.01 a Tab A.02.

### Přípravek s KTIR0611S:

- Zdroj: 
$$R_D = \frac{V_{R_D}}{I_D} = \frac{V_{NAP} - V_D}{I_D} = \frac{5 - 1,2}{0,02} = 190 \Omega$$
- Spínač: 
$$R_K = \frac{V_K}{I_K} = \frac{V_{NAP}}{I_K} = \frac{5}{0,0005} = 10 \text{ k}\Omega$$

Předřadný rezistor diody byl použit o hodnotě 120  $\Omega$ , pro možnost porovnání s ostatními optickými detektory. Napájení obvodu bylo zvoleno 5V. Proud diodou je zvolen 20 mA podle tabulky *Tab A.03*. Proud kolektoru zavřeného tranzistoru při  $V_{NAP} = 20V$  nesmí překročit 100nA. Pro otevřený tranzistor byl maximální proud kolektorem zvolen na 500 $\mu$ A. Odpor v kolektoru byl pomocí výše zvolených hodnot a vztahů vypsanych nad odstavcem vypočítán na 10 k $\Omega$ .



*Obr 4.01 – Přípravky optických čidel*

Spínací události pro měření optických čidel jsou vytvářeny buzením diody pulzním zdrojem a rotujícím kotoučem, který vyvolává spínání fototranzistoru. Princip spínání fototranzistoru rotujícím kotoučem závisí na principu detektoru.

Pro měření spínání fototranzistoru pomocí rotujícího kotouče bylo potřeba zapojit modul pro elektromotor. Úhlovou rychlost zapojení elektromotoru je potřeba převést na nižší. Toto zapojení je zobrazeno na obrázku *Obr 4.02*. Napájecí napětí pro elektromotor je v rozmezí od 5 V do 5,9 V.



*Obr 4.02 – Elektromotor a kolový převod*

Reflexní detektory pracují tak, že odrážejí záření z fotodiody na bázi fototranzistoru. Úroveň intenzity odraženého záření závisí na barvě odrazové plochy. Je-li odrazová plocha bílé barvy odráží se velká část záření a v případě černé barvy odrazové plochy je odražené záření téměř pohlceno odrazovou plochou. Kotouče upravené pro toto měření jsou zobrazeny na obrázku *Obr 4.03*. Umístění kotouče na přípravku elektromotoru (*Obr 4.02*) je označeno červeným kruhem.



*Obr 4.03 – Kotouče pro měření reflexních závor*

#### 4.3.2 Záznamy a vyhodnocení těchto měření

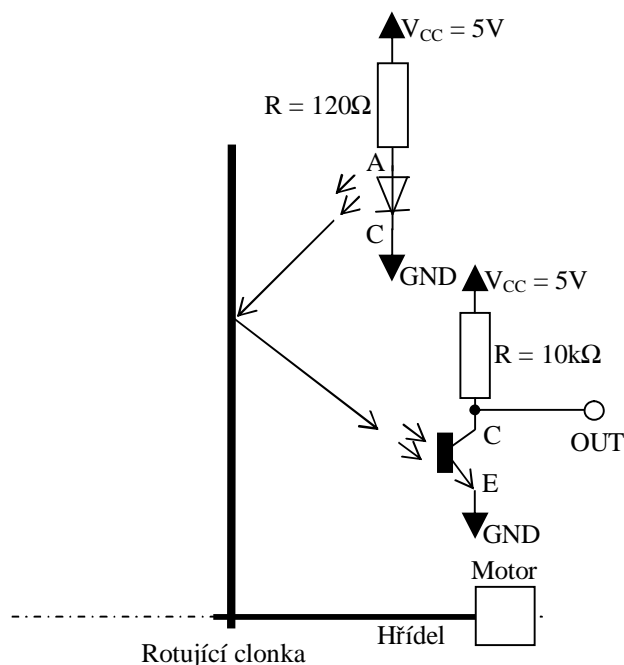
Měření průběhů spínání čidel bylo prováděno na osciloskopu tektronix. Detektorové moduly byly napájeny napětím 5 V.

## Záznamy z měření na detektorech

Měření na detektorech bylo provedeno třemi způsoby. Hlavní částí měření bylo sledování výstupu detektoru, který snímal rotující kotouč a byl osazen dostatečně velkým rezistorem v obvodu tranzistoru. Další část měření byla zaměřena na chování výstupu při snížené hodnotě odporu rezistoru v obvodu tranzistoru. Ve třetí části měření byly sledovány odezvy detektoru na buzení fotodiody pulsem.

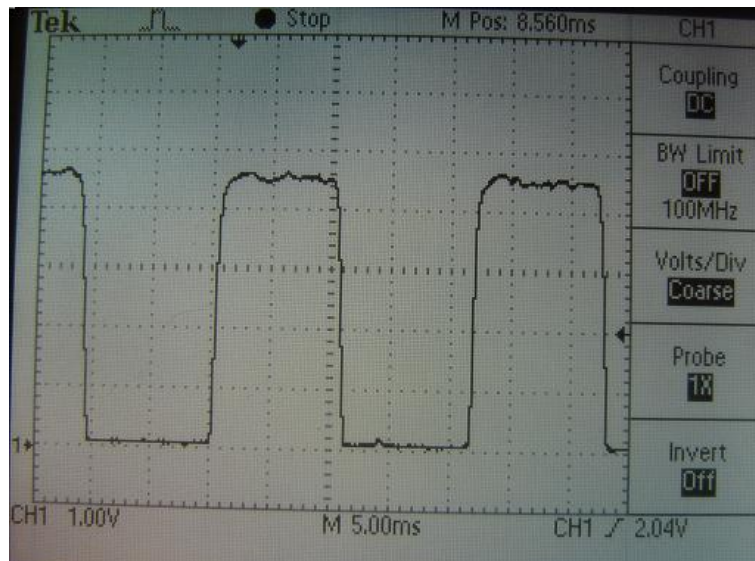
## Měření na modulu TCRT1000

Na obrázku *Obr 4.04* je schéma zapojení a umístění senzoru TCRT 1000 pro měření na rotujícím kotouči. Měření podle tohoto schématu jsou prováděna pro různé hodnoty  $R$  a různé typy měřicích kotoučů. Hodnota  $R$  je  $10\text{ k}\Omega$  a  $1\text{ k}\Omega$  pro kotouč se čtyřmi značkami. Pro kotouč sestrojený pomocí výpočtů je hodnota odporu  $10\text{ k}\Omega$ .



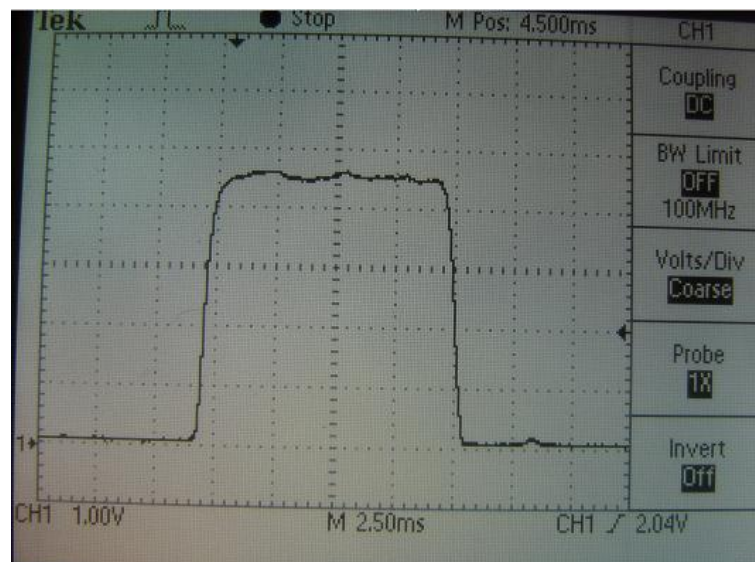
*Obr 4.04 – Schéma pracoviště pro měření odrazu na TCRT 1000*

Na obrázku *Obr 4.05* je výstup detektoru v závislosti na odrazech od rotujícího kotouče, kde čtyři z osmi dílků byli zastíněny. Měřítka průběhu je  $T = 5\text{ ms/div}$  pro časovou osu a  $U = 1\text{ V/div}$  pro napěťovou osu. Úroveň logické nuly je označena šipkou s číslem 1. Této úrovni nabývá signál v případě odrazu od nezačerněné odrazové plochy kotouče, která nepohlcuje záření a odražený signál sepne foto tranzistor.



Obr 4.05 – Výstup detektoru s kotoučem rozděleným na 8 dílů

Na obrázku Obr 4.06 je přiblížení jednoho pulsu, kde časová osa má hodnotu  $T = 2,5 \text{ ms/div}$ . Rozkreslení průběhu po menších časových intervalech odhaluje vlastnosti náběžné a sestupné hrany.



Obr 4.06 – Výstup detektoru přiblížený na jeden puls

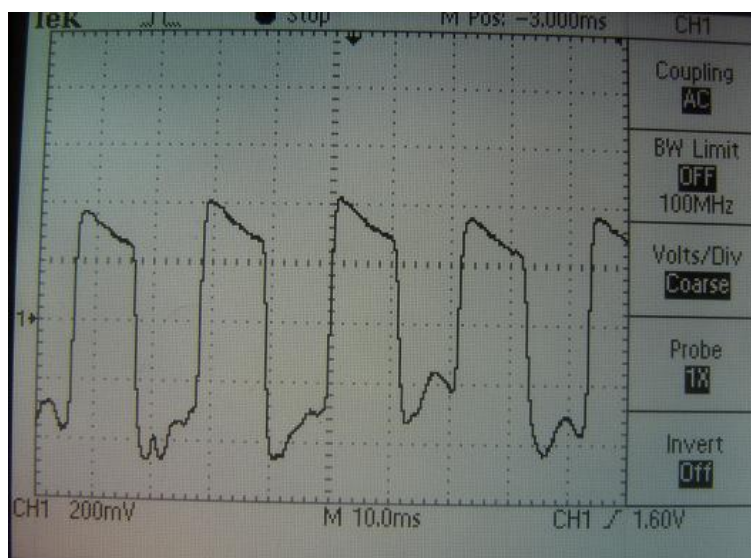
Z tohoto pulsu byla odečtena doba náběhu, která nabývá přibližně hodnoty  $t_r = 1 \text{ ms}$ . Z šířky pulsu ( $T_p = 4,5 \text{ div} * 2,5 \text{ ms} = 11,25 \text{ ms}$ ) a rychlosti rotace ve vzdálenosti senzoru, byla vypočtena délka neodrazné části plochy  $l_{np}$ . Vzdálenost senzoru od středu otáčení je 33 mm. Ze vztahu pro výpočet obvodu kruhu lze vypočítat obvod na 207,35 mm, po podělení dobou trvání 4 pulzů umístěných na kotouči získáme rychlost rotace ve vzdálenosti senzoru odpovídající hodnotě  $v = 2,18 \text{ mm/ms} = 2,18 \text{ m/s}$ .

$$I_{np} = T_p * v = 11,25 * 2,18 = 24,525 \text{ mm}$$

V průběhu lze pozorovat, že dostačující doba pulsu je rovna 1,5 násobku času na dílek. Doba takto zkráceného průběhu  $T_{zp} = 3,75 \text{ ms}$ , vypočtená nutná délka neodrazné plochy je rovna ploše odrazné, délka ploch pro změnu úrovně je  $I_{np}/(T_p/T_{pz}) = 8,175 \text{ mm}$ .

Proud kolektorem fototranzistoru je dán hodnotou odporu v kolektoru a rozdílem napětí mezi sepnutým a rozepnutým stavem tranzistoru. Při hodnotě odporu kolektoru rovné  $10 \text{ k}\Omega$  a rozdílu napětí cca  $5 \text{ V}$  nabývá proud kolektorem z ohmova zákona hodnot  $0,5 \text{ mA}$  ( $\Delta V/R_K = 5/10000$ ).

Na obrázku *Obr 4.07* je zachycen průběh výstupu detekce rotujícího kotouče, který je v kolektoru zatížen desetkrát menším odporem v kolektoru  $R_k = 1 \text{ k}\Omega$ . Napěťový rozsah osciloskopu je  $200 \text{ mV/div}$  a časová osa je vykreslena na intervalu  $10 \text{ ms/div}$ . Vlivem nedostatečného proudu kolektorem tranzistoru a nízké hodnoty odporu v kolektoru zůstává při sepnutém stavu tranzistoru na kolektoru tranzistoru zbytkové napětí, které je patrné na *Obr 4.07*, kde je rozdíl napětí odpovídá téměř  $1 \text{ V}$  a to při hodnotě  $R_K = 1 \text{ k}\Omega$ , ohmovým zákonem je zjištěn proud kolektorem rovný  $4 \text{ mA}$  ( $4 \text{ V}/1000 \Omega$ ). Pro tento odpor zátěže je nutné před vyhodnocovací zařízení připojit komparátor.

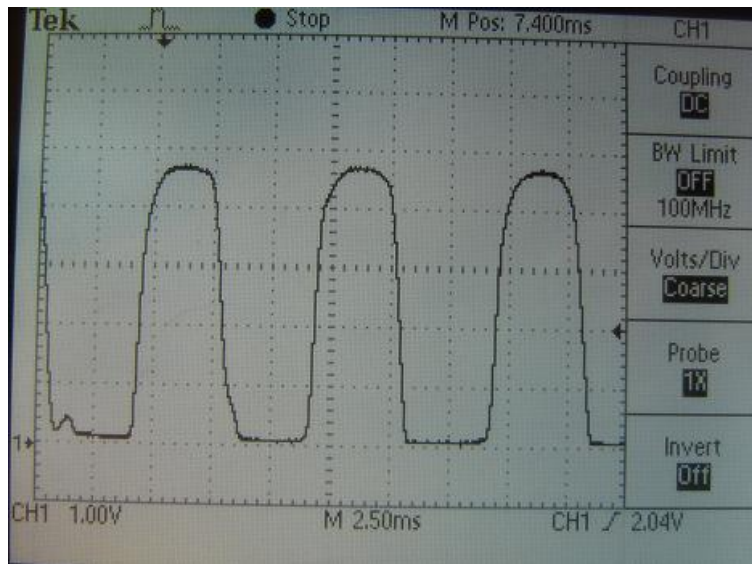


*Obr 4.07 – Výstup detektoru při snížené zátěži kolektoru*

Po prostudování výše uvedených výpočtů byl zkonstruován kotouč, který má minimální potřebnou délku pulsu s malou rezervou. Měření na tomto upraveném kotouči je na *Obr 4.08*. Zaoblení na úrovni logické jedničky je způsobeno hodnotou odporu  $R$ , který má

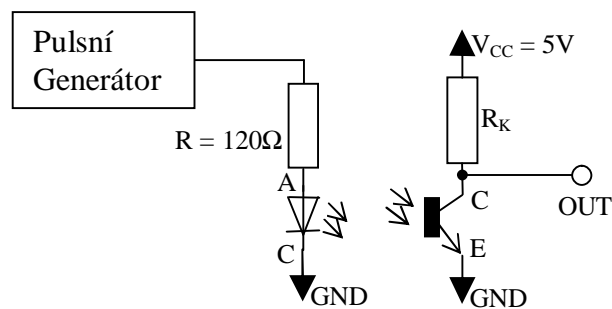


vysokou hodnotu. Senzor funguje jako dělič a foto tranzistor v senzoru má zbytkovou vodivost i v zavřeném stavu.



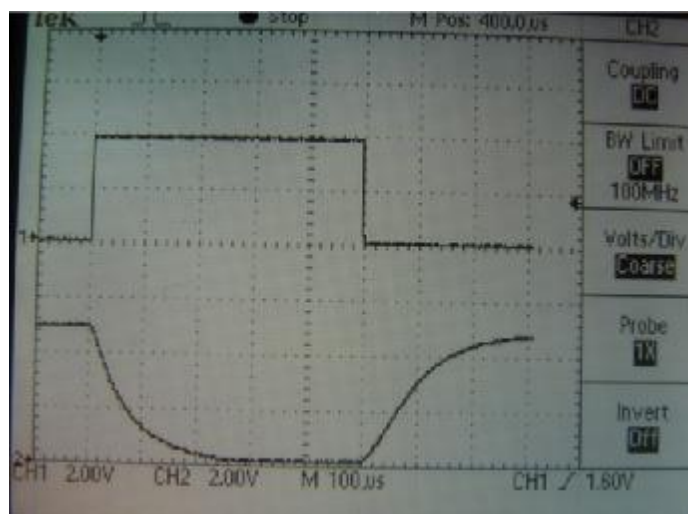
Obr 4.08 – Měření na zúžených pulsech

Třetí měření na detektoru bylo provedeno vybuzením zdroje světla pulsem a jeho průběh a odezva obvodu na tento puls byla sledována osciloskopem. Schéma měřicího pracoviště je na obrázku Obr 4.09. Pro toto schéma zapojení byla provedena dvě měření kde první měření bylo provedeno s odporem  $R_K$  o velikosti  $10\text{ k}\Omega$  a druhé měření bylo provedeno s odporem o velikosti  $100\text{ k}\Omega$ .



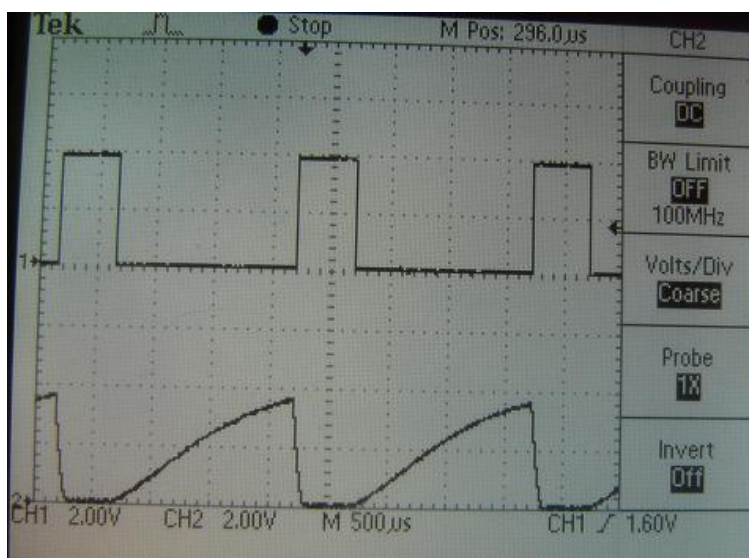
Obr 4.09 – Schéma zapojení pro měření odezvy na puls senzorem TCRT 1000

Záznam z tohoto měření odezvy na puls při odporu  $R_K$  o velikosti  $10\text{ k}\Omega$  je vynesena na obrázku Obr 4.10. Osa napětí má rozsah  $2\text{ V/div}$  a časová osa má  $100\text{ }\mu\text{s/div}$ . Zem budicího pulsu je označena šipkou s číslem jedna a zem pulsu, který je odezvou soustavy na budicí puls, je označena šipkou s číslem dvě.



Obr 4.10 – Odezva detektoru TCRT1000 na impuls

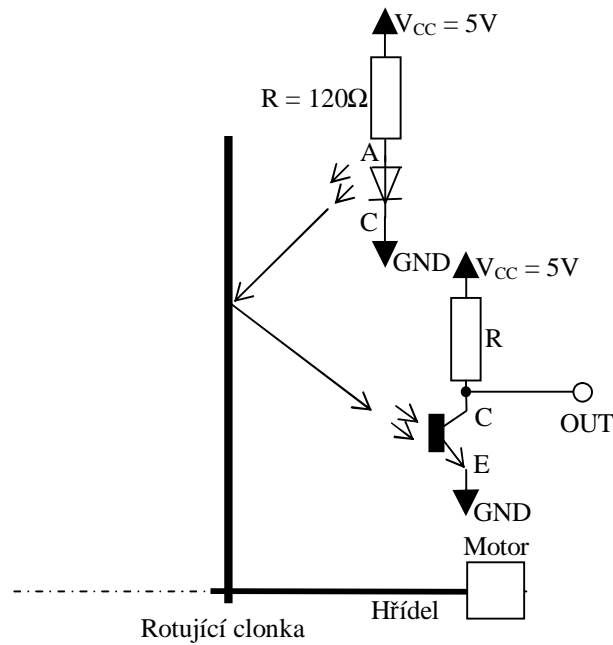
Pro lepší pochopení funkcí detektoru, byl rezistor v kolektoru nahrazen 100 k $\Omega$ . Na obrázku Obr 4.11 je zachycena odezva na puls při této úpravě. Z průběhu je patrné, jak se změnil poměr délek náběžné a sestupné hrany. To je zapříčiněno velikostí rezistoru, který má i při zbytkovém proudu kolektorem stále velký úbytek napětí.



Obr 4.11 – Odezva na puls při  $R_k = 100k$

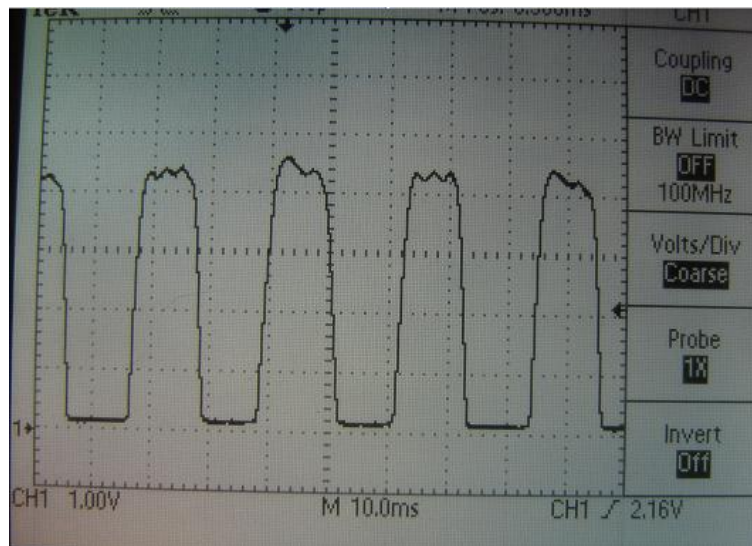
### Měření na modulu TCRT5000

Na obrázku Obr 4.12 je zobrazeno schéma měřeného zapojení pro měření na detektoru TCRT5000. Princip měření je shodný jako u detektoru TCRT1000. Rozdíl proti předchozímu detektoru je ve vzdálenosti senzoru od odrazové plochy, kde TCRT1000 má doporučenou disperzní vzdálenost 5 mm a TCRT5000 má doporučenou disperzní vzdálenost 24 mm.



Obr 4.12 – Schéma pracoviště pro měření odrazu na TCRT 5000

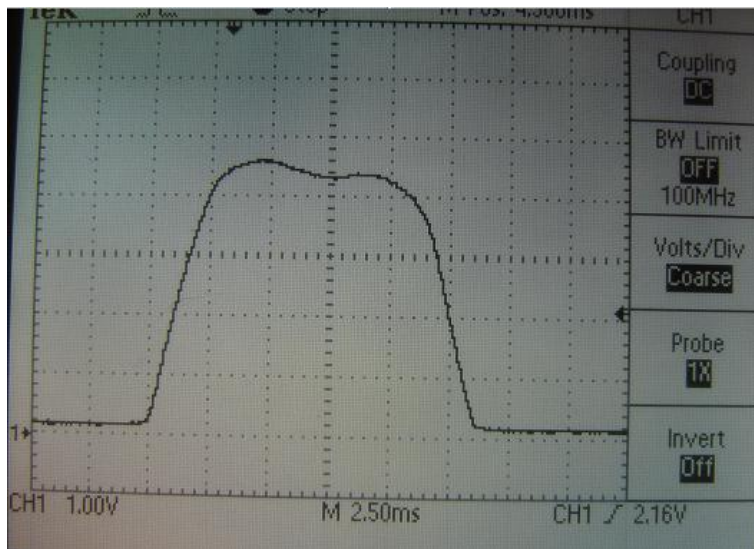
Na obrázku Obr 4.13 je průběh měření na rotujícím kotouči, který je rozdělen na osm částí a čtyři z těchto částí jsou zastíněny tak, aby neodrážely světelný signál. Měřítka průběhu je  $T = 10 \text{ ms/div}$  pro časovou osu a  $U = 1 \text{ V/div}$  pro napěťovou osu.



Obr 4.13 – Detekce na TCRT 5000

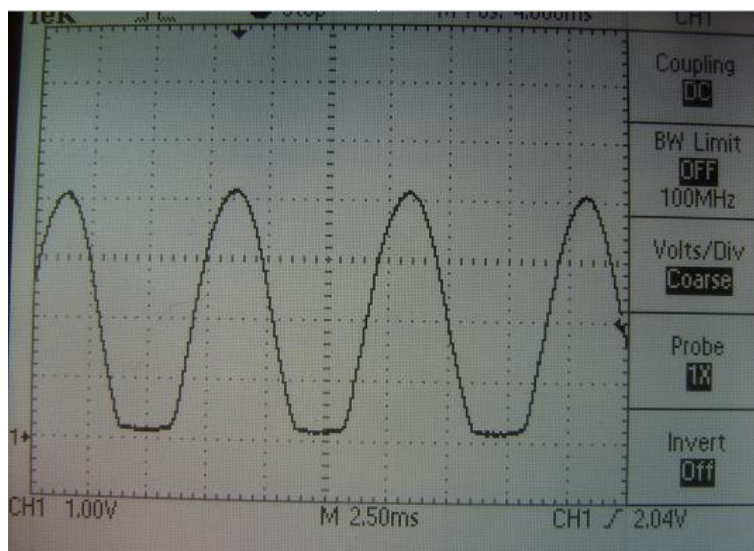
Na Obr 4.14 je znázorněn přibližný puls na detektoru TCRT 5000. Ze zaznamenaného průběhu byla odečtena doba náběžné a doba sestupné hrany o velikosti 2.5 ms. Výpočet délky stínících pulsů se tedy provede s většími časy pro náběžné hrany než-li tomu

bylo v předchozím případě a nutná délka stínítka pro tato měření je tedy větší. Pro porovnání bylo provedeno měření s kotoučem navrženým pro předchozí senzor.



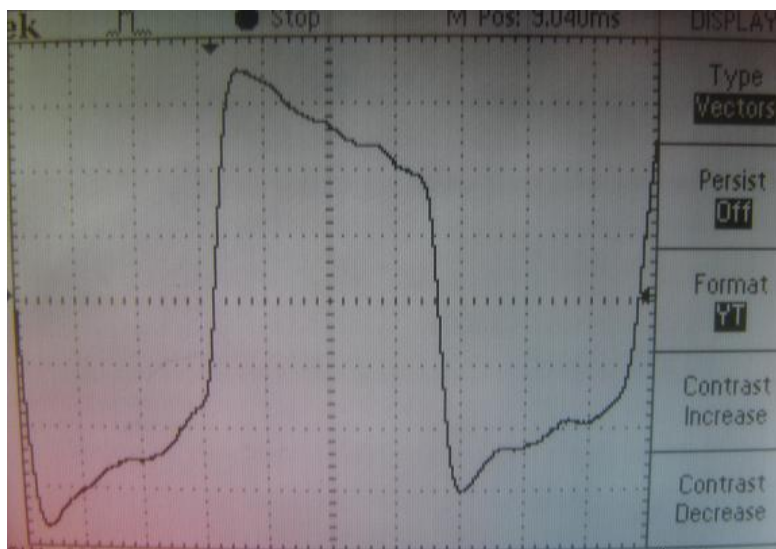
Obr 4.14 – Vykreslení náběžné hrany na TCRT 5000

Z měření na kotouči speciálně upraveném pro TCRT 1000, které je zobrazeno na obrázku Obr 4.15, je patrné, že pro tuto rychlost otáčení a tento detektor je úprava kotouče pro detektor TCRT 1000 s rezervami nejmenší možná použitelná bez jakékoli rezervy. A tento fakt lze určit zaprvé z šířky podstavy a špičky pulsů a za druhé z velikosti napětí při maximálním pohlcení odráženého záření. Maximální velikost těchto pulsů dosahuje pouze čtyři volty.



Obr 4.15 – Detekce na kotouči pro TCRT 1000

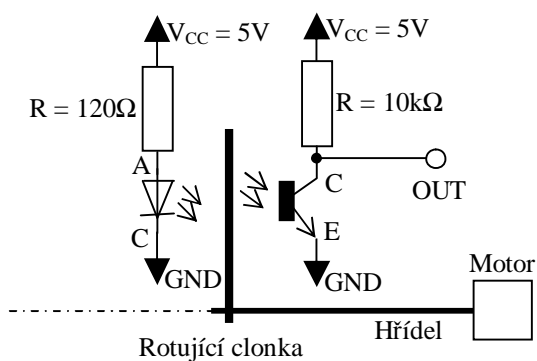
Na průběhu *Obr 4.16* je zachycen průběh měření při hodnotě odporu v kolektoru  $1\text{ k}\Omega$ . Průběh je vynesena s měřítkem napěťové osy  $200\text{ mV/div}$  a časové osy s měřítkem  $2,5\text{ ms/div}$ .



*Obr 4.16 – Výstup detektoru při snížené zátěži kolektoru*

### Měření na modulu KTIR0611S

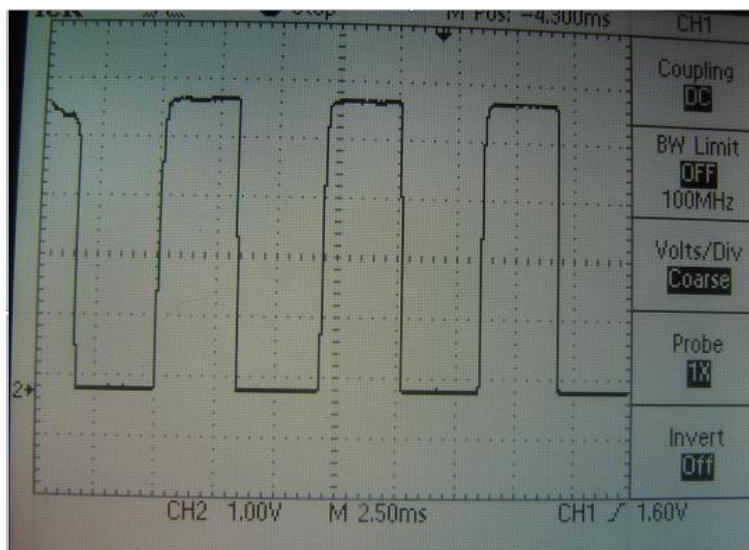
Schéma pro měření na senzoru KTIR0611S je na obrázku *Obr 4.17*. Na rozdíl od předchozích senzorů je KTIR0611S přímá závora a z toho vyplývá, že rotující clonka není složena z bílých a černých úseků, ale musí být složena z průsvitných a neprůsvitných segmentů. To lze provést dvěma způsoby. První způsob je použít kotouč číré barvy a ten na místě značek zastínit nánosem neprůsvitného materiálu. Druhou možností je použít neprůsvitný kotouč a z něho tvar značek vyříznou.



*Obr 4.17 – Schéma pracoviště pro měření zastínění senzorem KTIR0611S*



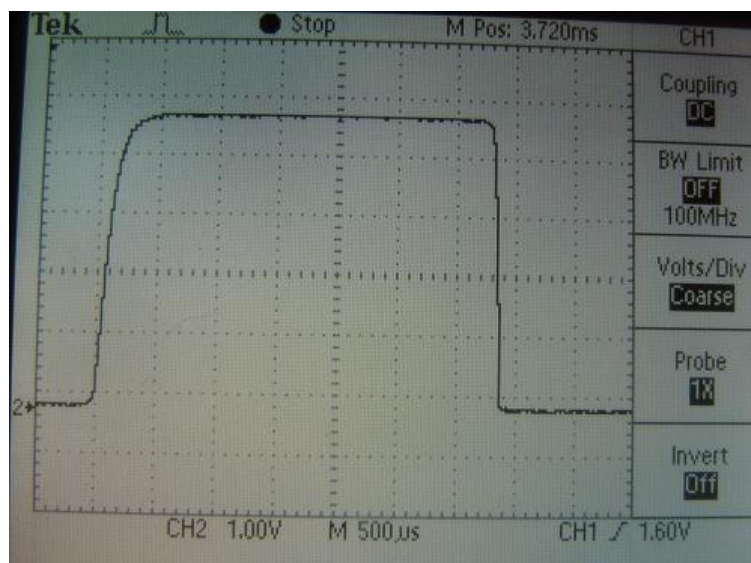
Na obrázku *Obr 4.18* je vykreslen průběh měření na přímé světelné závoře za využití kotouče rozděleného na 24 stejných dílů, dlouhých cca 8 mm, kde je 12 ploch zastíněných a 12 ploch průsvitných, který byl navržen speciálně pro TCRT 1000.



*Obr 4.18 – Detekce na optické závoře*

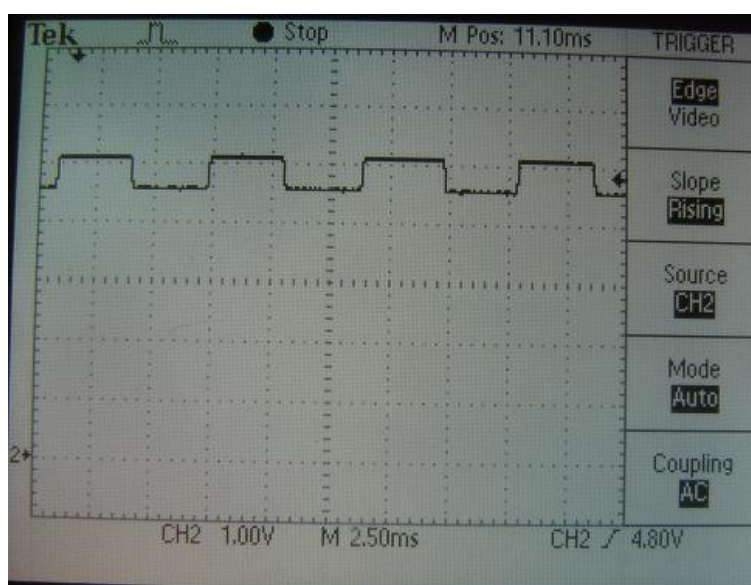
Z průběhu je patrné, že náběžná i sestupná hrana jsou v porovnání s předchozími senzory časově nepoměrně kratší. Další odlišností je přehození logických stavů, zatím co při reflexním snímání byl foto tranzistor otevřen ve chvíli, kdy docházelo k odrazu od měřicího kotouče, při snímání přímého záření působí reflexní zástěna jako blokáce záření a foto tranzistor je tedy zavřený. Logická nula je na průběhu označena šipkou číslo dvě.

Z průběhu vyneseno na rychlejší časové ose, který je zaznamenán na obrázku *Obr 4.19*, je patrné, že náběžná i sestupná hrana mají dobu přechodu mezi stavy menší než 250 mikrosekund a náběžná hrana trvá delší čas v poměru k hraně sestupné. Z toho je patrná nutnost spínat událost buď na hrany náběžné, nebo sestupné, při snímání obou typů hran dochází k velmi malému časovému zkreslení časových intervalů mezi vzorky.



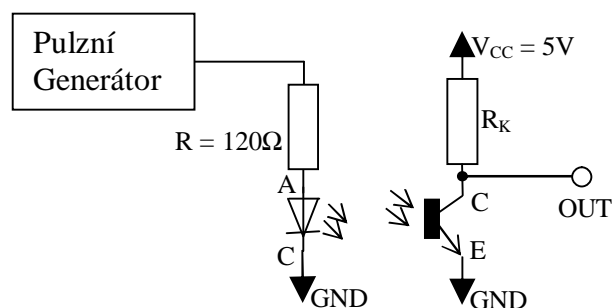
Obr 4.19 – Detail pulsu detekovaného pomocí KTIR0611S

Na obrázku Obr 4.20 je zaznamenán výstupní průběh detektoru při odporu zátěže  $1k\Omega$ . Z tohoto průběhu je patrné, že hodnota odporu zátěže je nedostatečná pro případ, kdy je detektor připojen přímo na vyhodnocovací zařízení. Pro použití této varianty je potřeba zapojit před vyhodnocovací zařízení komparátor. Nevýhodou proti  $10k\Omega$  zátěži je větší proud protékající kolektorem a tím i větší spotřeba obvodu detektoru.



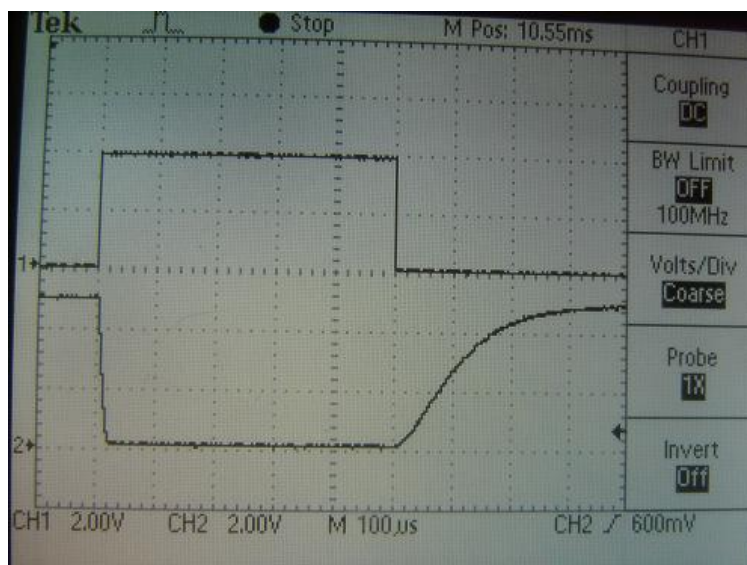
Obr 4.20 – KTIR0611S s  $RL = 1kW$

Obrázek Obr 4.21 zachycuje schéma zapojení měřicího pracoviště pro měření na senzoru KTIR0611S pro měření odezvy na pulsy z pulsního generátoru. Měření je provedeno pro odpor kolektoru  $10k\Omega$ .



Obr 4.21 – Schéma pracoviště pro měření odezvy senzorem KTIR0611S

Na obrázku Obr 4.22 je vynesena odezva detektoru s 10 kΩ zátěží na obdélníkový puls. Z průběhu je patrný rozdíl mezi náběžnou a sestupnou hranou pulsu. To je způsobeno vybuzením diody, které po vybuzení trvá určitý čas, než-li se uvolněné elektrony zpět usadí do uvolněných děr. K tomuto jevu dochází postupně a to způsobuje dlouhou přechodovou charakteristiku při zavírání tranzistoru.



Obr 4.22 – Odezva KTIR0611S na puls

Poznatky z měření na detektorech:

- Podstatným poznatkem bylo zjištění že „není černá jako černá“. Během měření se projevil jev, kdy docházelo k odrazu optického paprsku i v okamžiku, kdy odražen být neměl. Měření prokázalo vliv černé na odrazovém kotouči, která po nanesení na kotouč z kartonu nasála do povrchu a vytvořila lehce našedivělý povrch. Tento povrch již k úplnému odrazu postačil.



- Čidlo snímá ve vzdálenosti 33 mm od středu kotouče umístěného na převodovaném elektromotoru, ze vztahů z kapitoly 1. lze dopočítat obvod kotouče v bodě měření na 207,35 mm. Z průběhů detektorů lze odečíst dobu oběhu kotouče kolem své osy, která činí 95 ms. Z výše zmíněného lze tedy spočítat rychlost otáčení kotouče v bodě měření, která je 2,18 mm/ms.
- V tomto měření byl potvrzen teoretický předpoklad, že reakce na vzestupnou a sestupnou hranu pulsu budícího diodu se liší. Doba reakce na náběžnou hranu je mnohem kratší než-li doba reakce na hranu sestupnou. Toto je zapříčiněno jevy rozvedenými v kapitole optické detektory.

#### 4.4 Návrh fyzického provedení zařízení bez USB

Měřicí zařízení bylo navrženo tak, aby byla zajištěna jeho snadná manipulace. Z důvodu přizpůsobitelnosti měřicího zařízení pro další aplikace, byl přípravek navržen tak, aby bylo možné vyměnit senzor bez nutnosti zásahu do vyhodnocující části zařízení. Z důvodu jednoduššího oživování částí zařízení, bylo navrženo jako moduly, které jsou připojeny k základnímu modulu.

##### 4.4.1 Bloky měřicího zařízení

V této kapitole jsou popsány komponenty ze kterých se skládá měřicí zařízení navržené pro měření nerovnoměrnosti otáčení gramofonové desky.

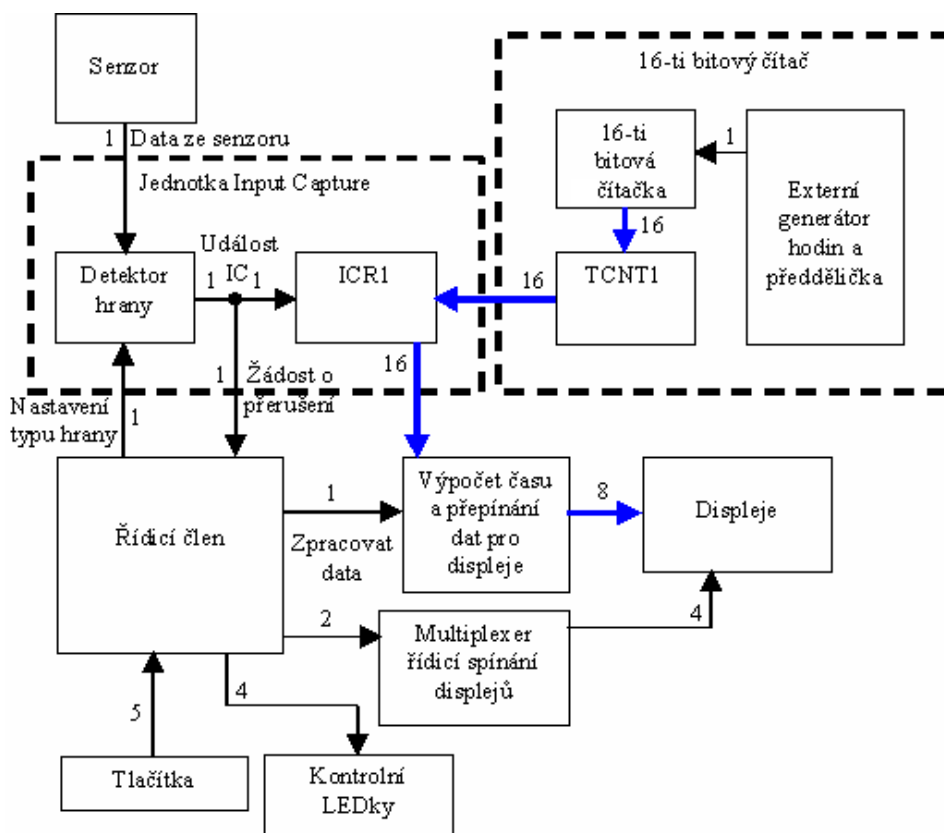
- Zobrazovací modul – Je složen ze čtyř sedmi segmentových displejů, které jsou buzeny jednou sběrnici, která je společná pro všechny displye. Přepínání segmentů je provedeno čtyřmi signálními vodiči, které řídí jaký display má být v daný okamžik aktivní.
- Modul výběru měřicí metody – Skládá se ze tří žlutých LED diod a jedné červené, kde každé ze žlutých LED je přiřazena jedna metoda měření, červená LED signalizuje, že obvod v danou chvíli provádí měření.
- Modul ovládání – Složený z pěti tlačítek, kde dvě přepínají mezi měřicími metodami, další dvě přepínají mezi vzorky po naměření sta vzorků a páté tlačítko

je potvrzovací. Potvrzovací tlačítko slouží k zahájení měření a k přepínání mezi pořadovým číslem vzorku a jeho naměřenou hodnotou.

- Modul senzoru – Je modul použitý při měření na senzorech. Tento externě umístěný senzor lze snadno vyměnit za jiný, s dodržáním podmínky změny mezi logickými stavy cca pět voltů. Pro připojení modulu, který nespĺňuje tuto podmínku je nutné připojit k modulu komparátor.
- Základní modul – Obsahuje řídicí mikroprocesor s podpůrnými obvody a blok napěťové stabilizace. Stabilizační blok udržuje napětí pro zařízení na pěti voltech a je napájeno z devítivoltové baterie. Mikroprocesor řídí výstupy modulů a zpracovává vstupy z ovládacího modulu a senzoru.

#### 4.4.2 Schéma zapojení modulů

Všechny moduly mimo zobrazovacího modulu byly postaveny na kontaktních polích. Schémata zapojení modulů jsou umístěna v příloze C. Schéma zapojení zobrazovacího modulu je na obrázku *Obr C.01*. Zapojení modulu pro výběr měřicí metody je na obrázku *Obr C.02*. Ovládací modul má schéma na obrázku *Obr C.03*. Schéma základního modulu je rozloženo na dvě části, kde v první části na obrázku *Obr C.04* zobrazena část řídicí měřicí přípravek a na obrázku *Obr C.05* je schéma zapojení pěti voltového napěťového zdroje. Na obrázku *Obr 4.23* je nakresleno blokové schéma zařízení pro měření otáček, které se nepřipojuje k PC. Modré šipky na schématu znázorňují datové sběrnice a černé šipky zobrazují řídicí signály. Číslo u šipek znázorňujících sběrnici udávají počet vodičů sběrnice. Analyzátor se skládá ze dvou základních funkčních bloků. První část je volněběžící šestnácti bitový čítač, který je buzený krystalovým rezonátorem a druhou je jednotka input capture kontrolující výstup ze senzoru. Při spuštění zařízení se rozběhne čítač, který svou hodnotu ukládá do registru TCNT1 a řídicí člen nastaví typ hrany na níž bude jednotka input capture reagovat. Nastavení typu hrany se provádí v detektoru hrany. Přijme-li detektor hrany požadovanou hranu, vygeneruje žádost o přerušení a současně s tím přenesou obsah registru čítače TCNT1 do registru ICR1 (Input Capture Register 1). Řídicí jednotka po přijetí žádosti o přerušení zadá vyhodnocovací jednotce pokyn, aby vyzvedla z registru ICR1 data a spočítala počet hodinových cyklů mezi současným a předchozím sepnutím. Vypočítaným datům jsou přiřazeny hodnoty pro buzení displeje a ty jsou pak postupně přepínány na sběrnici displeje. Správné vyzvednutí dat z této sběrnice obstarává multiplexer.



Obr 4.23 – Blokové schéma zařízení bez USB

## 4.5 Návrh obslužného programu pro mikroprocesor

Aby bylo možné provádět měření, je potřeba nahrát do mikroprocesoru vhodný firmware. V následující kapitole jsou popsány požadavky na tento software a v kapitole 4.5.2 je popsán algoritmus použitý při tvorbě firmware. Celý komentovaný program je umístěn na doprovodném CD.

### 4.5.1 Požadavky na ovládací software

Ovládací software musí být navržen tak, aby byla možná jeho úprava pro měření na různých zařízeních. Typ použitého měření byl zvolen měření času, který uplyne mezi dvěma sepnutími senzoru, to znamená, že program musí událostem ze senzoru přiřazovat časové okamžiky a z nich dopočítat čas, který uplyne mezi dvěma značkami. Zobrazení změřených hodnot na čtyřmístný display je prováděno v hexadecimální číselné soustavě. Ovládací jednotka reaguje na sestupnou hranu signálu ze senzoru.

Algoritmus programu navrženého pro řízení navrženého měřicího zařízení je umístěn v příloze D na obrázku *Obr D.01* a na obrázku *Obr D.02* je rozkreslená část algoritmu zabývající se postupem měření.

## 4.6 Testy na měřicím zařízení

Pro toto měření je od přípravku odpojen senzor a výstup z pulsního generátoru je přiveden přímo na vstup jednotky input capture. Délka tohoto pulsu je vypočtena a porovnána s naměřenou hodnotou. Pulsní generátor je buzený krystalem a jeho výstup pro měřicí zařízení je zajišťován jednotkou output compare. V první části je čítač mikroprocesoru buzen vnitřním oscilátorem a porovnána s měřením při buzení čítače pomocí krystalového rezonátoru. Ve druhé části měření je měněna výstupní šířka periody pulsů z generátoru během měření. Po odzkoušení zařízení budou parametry přenastaveny pro měření na gramofonu.

### 4.6.1 Výpočty předpokládaných výstupů

Pulsní generátor je buzen krystalovým rezonátorem pracujícím na kmitočtu 16 MHz. A tento kmitočet je snížen předděličkou  $f_{\text{clk}}/64$ . Jednotka output compare je řízena osmi bitovým čítačem, z toho vyplývá, že kmitočet vystupující z pulsního generátoru je snížen o  $f_{\text{předděličky}}/256$ . Takto nastavený pulsní generátor generuje pulsy, které trvají 0,001024 s.

Při prvním testovacím měření je cílem dokázat, že k sestrojení měřicího zařízení nestačí využít vnitřní oscilátor mikroprocesoru. Vnitřní oscilátor je nastaven na kmitočet 1 MHz, předdělička je nastavena na  $f_{\text{clk}}/256$ . Z toho vyplývá, že délka pulsu budícího vnitřní čítač je 0,000256 s. Při buzení měřicího zařízení krystalem pracujícím na kmitočtu 16 MHz a s předděličkou  $f_{\text{clk}}/256$  je délka pulsu pro vnitřní čítač 0,000016 s.

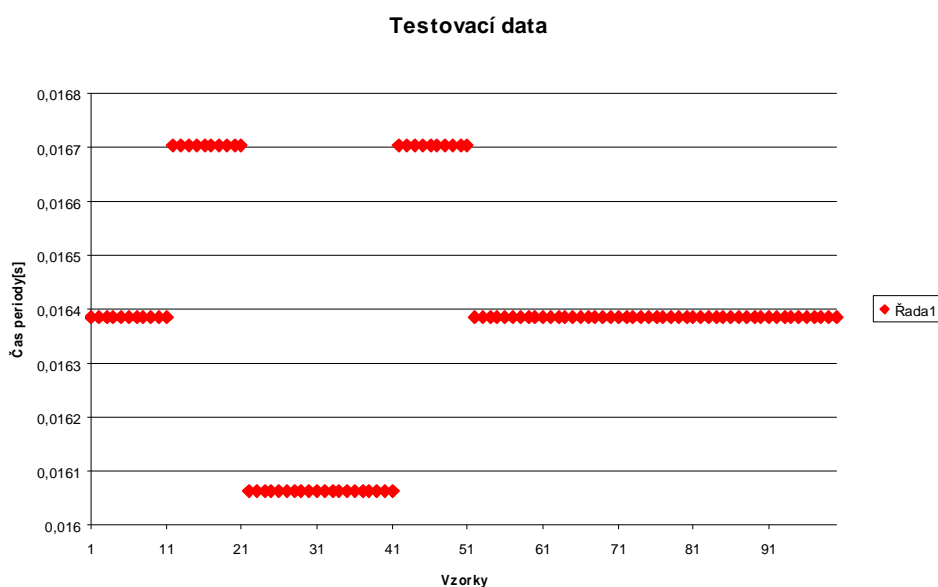
Pro toto měření je nastaven generátor, aby byl pin OC0 po shodě nulován, tím se nastaví sestupná hrana, na níž reaguje měřicí zařízení, z pozice při přetečení čítače na pozici při shodě hodnoty čítače a hodnoty output compare registru. Při běhu programu se v nekonečné smyčce mění hodnoty output compare registru a tím i délky měřených pulsů. Změnami průběhu output compare registru po konstantním počtu cyklů jedním směrem, se zkracuje následující interval, ustálení na nové hodnotě je zajištěno konstantním posunem. Tímto způsobem byl z pilového průběhu v output compare registru vytvořen pulsní průběh na výstupu generátoru. Tento průběh na 10 cyklů čítače zpomalý pulsy, poté na 20 cyklů čítače

pulsy zrychlý, pak zase na 10 cyklů čítače zpomalý a nakonec se ustálý na původní hodnotě, data z měření tohoto generátoru jsou vyneseny do grafu na obrázku *Obr 4.24*.

#### 4.6.2 Záznam měření

Z tabulky *Tab 4.01* je patrné, že naměřené hodnoty se s prodlužující délkou měřeného pulsu vzdalují od skutečné délky pulsu. Při měření s krystalem byla změřena hodnota, při pulsu dlouhém 16,384 ms, 400 v hexadecimální soustavě, z toho plyne hodnota čítače 1024 decimálně. Po roznásobení strojových cyklů jejich délkou získáme tedy čas 16,384 ms. Po porovnání s hodnotou pro stejně dlouhý puls změřený bez využití krystalu, je přesnost vyšší. Z tohoto důvodu musí být v měřicím zařízení krystal přítomen.

Průběh změřený při změnách délek pulsů z generátoru je na obrázku *Obr 4.24*. Naměřený počet instrukčních cyklů byl vynásoben časem odpovídajícím jednomu cyklu. Vynesený průběh tedy zobrazuje reálnou dobu mezi po sobě jdoucími sestupnými hranami. Přesné hodnoty získané z tohoto měření jsou uloženy na doprovodném CD.



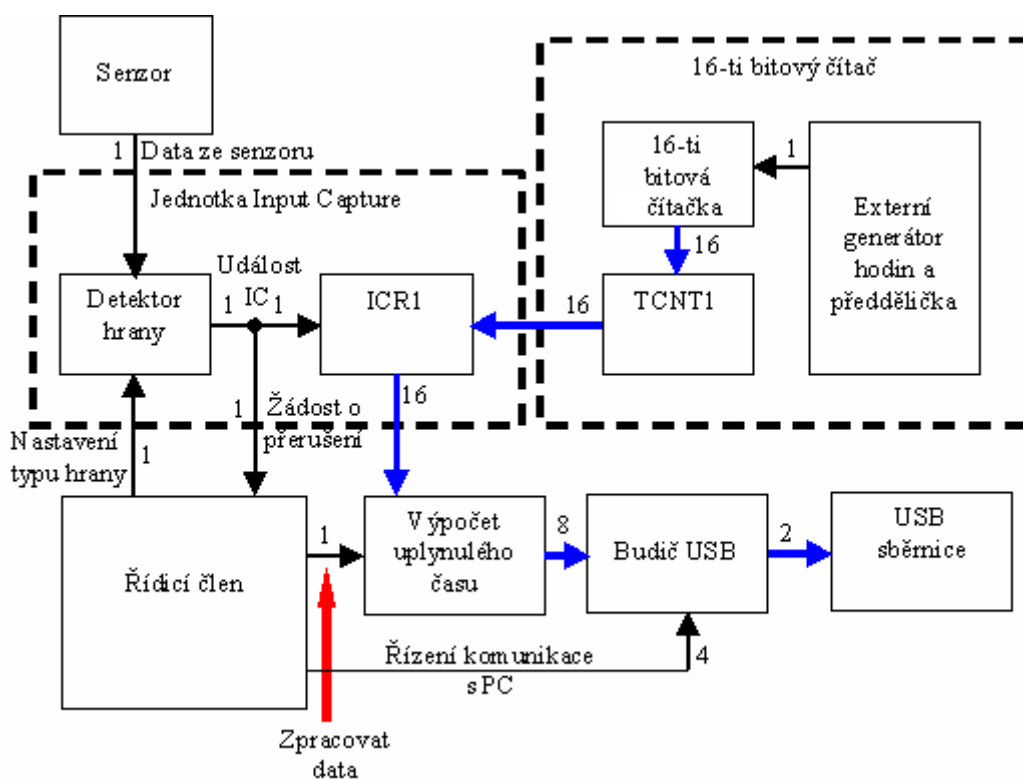
*Obr 4.24 – Průběh z testovacího měření při změnách pulsů*

Tab 4.01 – Hodnoty z prvního měření bez krystalu

Měření	$f_{Gen}$	Změřené hodnoty		Přepočítané hodnoty	
	Předdělička	Hex.	Dec.	$t_{Pulsu}$	$t_{Měřené}$
1.	1024	3C	60	16,384ms	15,36 ms
2.	256	F	15	4,096 ms	3,84 ms
3.	64	4	4	1,024 ms	1,024 ms

#### 4.7 Návrh fyzického provedení zařízení pro USB

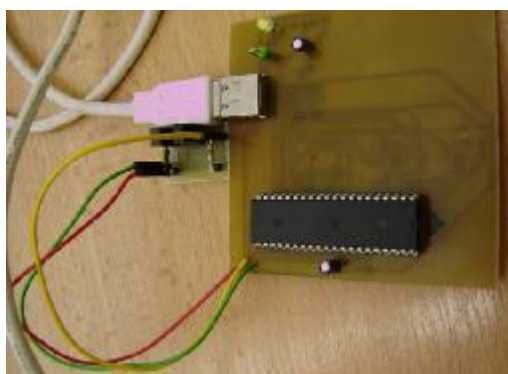
Pro zjednodušení zadávání dat do PC, bylo navrženo druhé měřicí zařízení. Toto zařízení komunikuje s PC přes USB. Data se po přijetí ukládají do textového souboru. Senzor je umístěn na samostatném plošném spoji. Spoj obsahující senzor je napájen z USB přes toto měřicí zařízení. Princip tohoto zařízení je na obrázku Obr 4.25, základní princip měření je stejný jako u předešlého zařízení. Rozdíl spočívá v tom, že spočítaná data se rozdělí na dvě části a ty se poté odešlou přes budič USB a USB sběrnici do PC, zatím co u předešlého zařízení musela být data do PC vkládána ručně uživatelem.



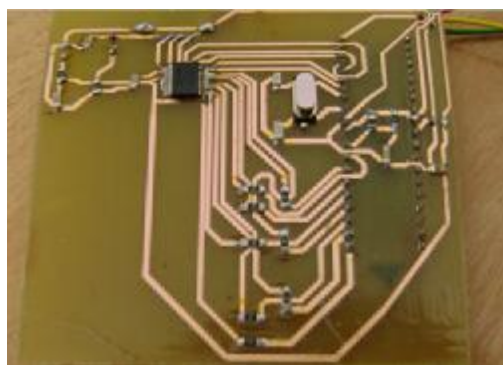
Obr 4.25 – Blokové schéma zařízení pro připojení do USB

#### 4.7.1 Návrh zapojení zařízení pro připojení k USB

Buzení sběrnice na přípravku obstarává USB budič FT245RL. Tento obvod simuluje v PC sériový port a k mikroprocesoru má data připojena pomocí osmi bitové brány, řízení komunikace obstarávají čtyři řídicí piny. Schéma zapojení navrženého měřicího zařízení je umístěno v příloze C na obrázku *Obr C.06*. Fyzické zapojení je navrženo na jednovrstvém plošném spoji. Vzhled tohoto plošného spoje je umístěn v příloze C na obrázku *Obr C.07*. Zkonstruované měřicí zařízení je na obrázku *Obr 4.26*, kde je zobrazeno připojení senzoru a na obrázku *Obr 4.27* je zařízení zobrazeno ze strany plošných spojů.



*Obr 4.26 – Fotka měřicího zařízení pro USB*



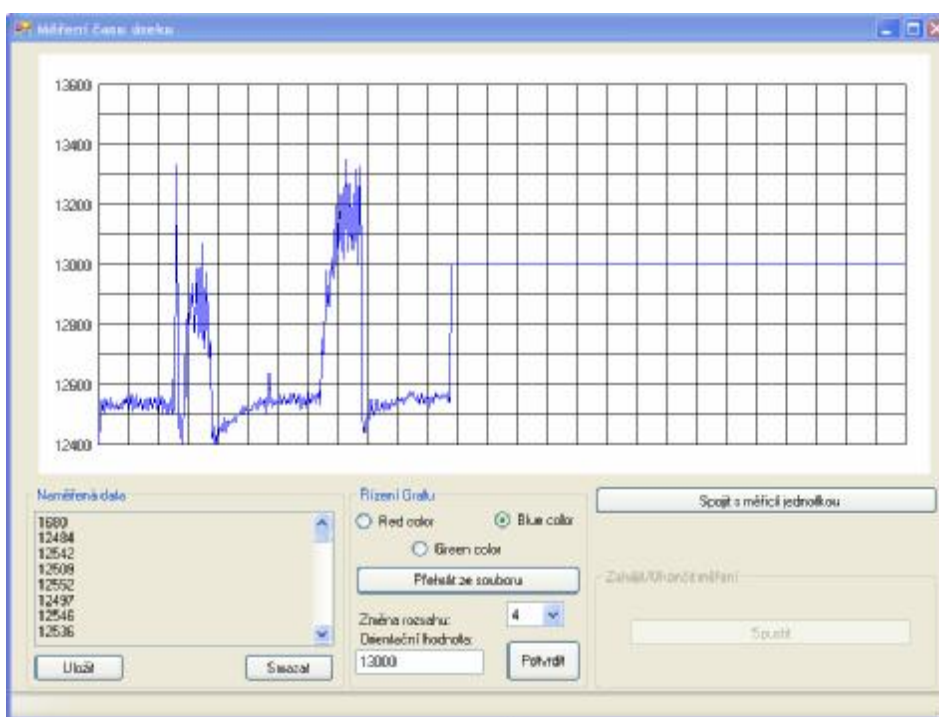
*Obr 4.27 – Fotka měřicího zařízení pro USB ze strany plošných spojů*

#### 4.7.2 Návrh obslužného programu pro mikroprocesor

Program v mikroprocesoru přijímá z PC příkazy ke spuštění a zastavení měření. Pokud přijal příkaz ke spuštění měření odesílá do PC data o přetečení čítače a v případě detekce sestupné hrany na jednotce input capture odešle aktuální stav registrů ICR1L a ICR1H. Přijme-li příkaz k zastavení měření, zastaví čítač, zakáže přerušení od jednotky input capture a čeká na nový příkaz k zahájení měření.

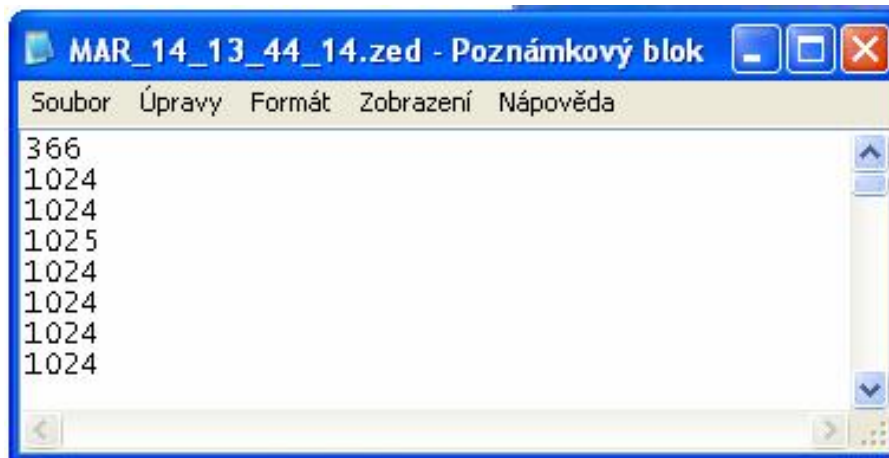
#### 4.7.3 Návrh obslužného programu pro PC

Program pro PC generuje řídicí zprávy pro mikroprocesor a přijímá informace o délkách změřených intervalů. Z přijatých zpráv je vykreslován do grafu počet cyklů čítače mezi dvěma sestupnými hranami. Uživatelské rozhraní programu pro PC je zobrazeno na obrázku *Obr 4.28*. Systém uložení dat do souboru je na obrázku *Obr 4.29*. Uživatel má možnost vybrat si pro zobrazení grafu rudou, modrou, nebo zelenou barvu. Data lze uložit do souboru tlačítkem uložit, vytvořený soubor má název *MAR\_(D)\_(H)\_(M)\_(S).zed*. Data jsou vykreslována podle orientační hodnoty a rozsah osy y lze měnit nastavením změny rozsahu. Další užitečnou funkcí programu je možnost přehrát průběh ze souboru, ta umožňuje znovu vykreslit data uložená při již proběhlém měření.



*Obr 4.28 – Uživatelské rozhraní v PC*





Obr 4.29 – Uložení dat do souboru

## 4.8 Testy na měřicím zařízení

Pro toto měření je od přípravku odpojen senzor a výstup z pulsního generátoru je přiveden přímo na vstup jednotky input capture. Délka tohoto pulsu je vypočtena a porovnána s naměřenou hodnotou. Pulsní generátor je buzený krystalem a jeho výstup pro měřicí zařízení je zajišťován jednotkou output compare.

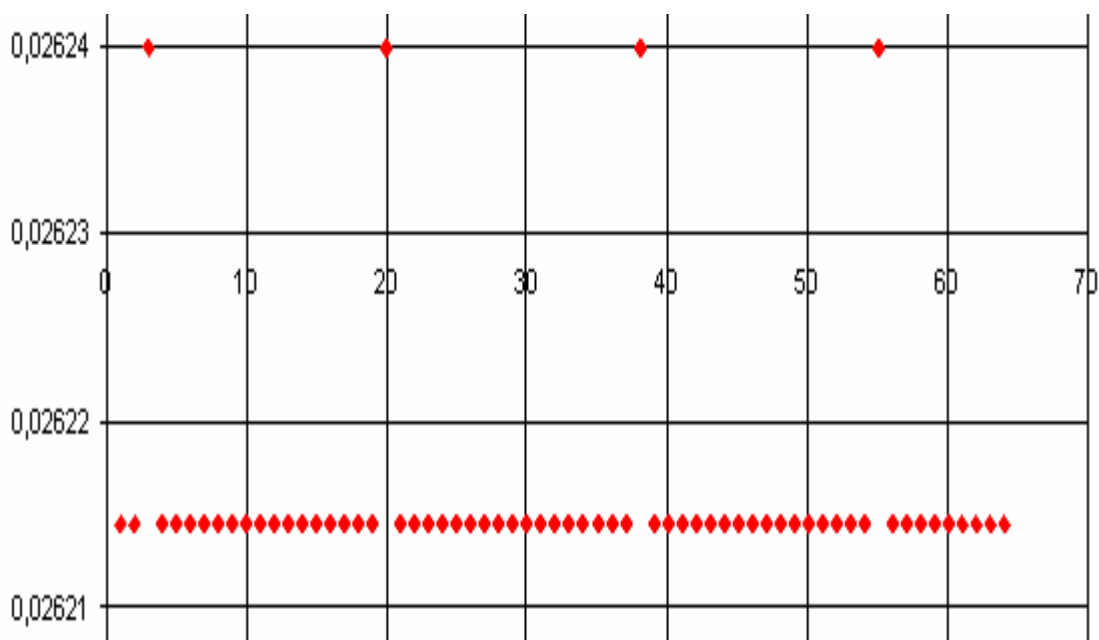
### 4.8.1 Výpočty předpokládaných výstupů

Pulsní generátor je buzen krystalovým rezonátorem pracujícím na kmitočtu  $f_{clk} = 10 \text{ MHz}$ . A tento kmitočet je snížen předděličkou na  $f_{clk} / 1024$ . Jednotka output compare je řízena osmi bitovým čítačem, z toho vyplývá, že kmitočet vystupující z pulsního generátoru je snížen o  $f_{předděličky} / 256$ . Takto nastavený pulsní generátor generuje pulsy, které trvají 0,0262144 s.

Měřicí přípravek je buzen externím krystalem a pracuje na kmitočtu 10 MHz, předdělička měřicího čítače je nastavena na  $f_{clk} / 256$ . Z toho vyplývá, že při měření pulsů z výše definovaného generátoru napočítá měřicí zařízení 1024 cyklů měřicího čítače.

#### 4.8.2 Záznam měření

Průběh dat získaných z generátoru při buzení konstantními pulsy je na obrázku *Obr 4.30*. Naměřený počet cyklů byl v průběhu roznásoben časem odpovídajícím jednomu cyklu. Vynesený průběh tedy zobrazuje reálnou dobu mezi po sobě jdoucími sestupnými hranami. Přesné hodnoty získané z tohoto měření jsou uloženy na doprovodném CD.



*Obr 4.30- Průběh z testovacího měření zařízení pro USB*

Na průběhu je patrná nerovnoměrnost při měření opakující se po sedmnácti vzorcích, kdy zařízení naměří o jeden měřicí puls více. Touto nerovnoměrností je definováno, že přesnost měřicího zařízení je v rozsahu od přesné hodnoty po hodnotu o jedna vyšší. První změřený vzorek nabývá nedefinovanou hodnotu, z tohoto důvodu trvá zařízení jeden měřicí segment, než-li se dají měřená data použít pro analýzu.

## 5. Měření na gramofonu

Pro odzkoušení navrženého přípravku je nutné provést měření na konkrétním zařízení. Zařízení na kterém se bude porovnávací měření provádět je gramofon. Na gramofonu se bude provádět měření aktuální rychlosti a tato rychlost se bude matematicky zpracovávat pomocí vzorců v *Tab B.01* umístěné v příloze B. Jako metoda měření na aplikaci byla vybrána metoda měření času po dobu impulsu o známé délce tohoto impulsu.

### 5.1 Kotouč pro měření na gramofonu

Při konstrukci kotouče pro gramofon je nutné vycházet z fyzických parametrů gramofonu a vlastností použitého detektoru. Použitým detektorem pro tato měření je přímá optická závora, z toho vyplývá nutnost vytvořit značky na kotouči jejich vyřezáním, nebo použitím průsvitného materiálu na výrobu kotouče. Tabulka rozměrů gramofonu je *Tab 5.01*. Z této tabulky vyplývá poloměr kotouče, který musí být větší než 130 mm a zároveň musí být menší než 177,5 mm. Kotouč bude označen deseti měřicími značkami s konstantními rozestupy. Z výšky talíře byla zjištěna informace, která říká, že podstava detektoru musí být menší než 10 mm. Další možností úpravy pro měření je umístit kotouč na rotující distanční sloupek, v tomto případě může mít kotouč menší poloměr než-li je poloměr talíře gramofonu. Navržený kotouč je umístěn do Přílohy E obrázek *Obr E.01*, má poloměr 80 mm a ke gramofonu se upevňuje pomocí distančního sloupku.

*Tab 5.01 – Fyzické rozměry gramofonu*

Šířka gramofonu	Délka gramofonu	Průměr talíře	Výška talíře
460 mm	355 mm	260 mm	10 mm

### 5.2 Měření na gramofonu navrženými přípravky

V této části proběhne samotné měření na gramofonu. V první fázi se provede měření při volném běhu gramofonu. A ve druhé části měření bude měřena uměle vyvolaná nerovnoměrnost otáčení kotouče. Tato data se přepočítají na aktuální úhlovou rychlost a porovnají.

## 5.2.1 Záznamy měření

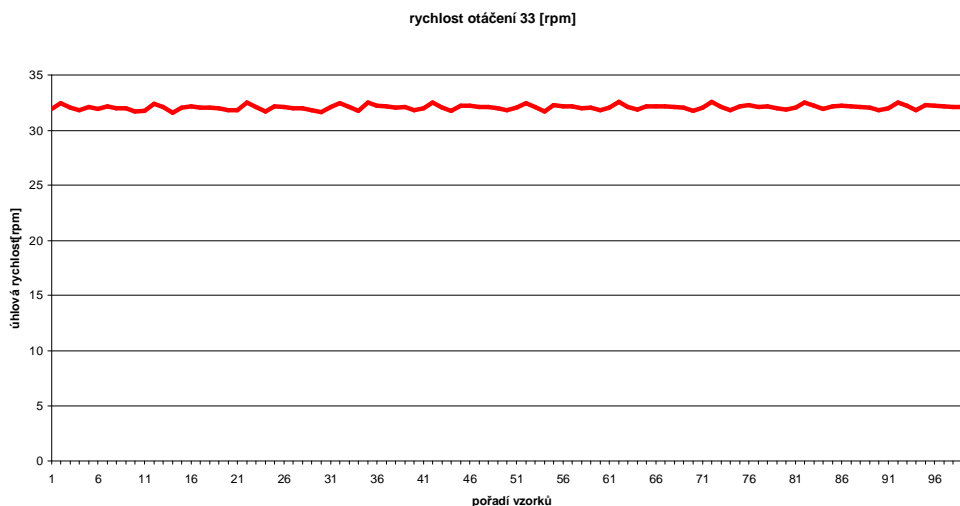
Byla provedena měření jak při rychlosti otáčení 16 otáček za minutu, tak i při rychlosti otáčení 33 otáček za minutu.

Výpočet hodnoty pro výstup naměřených dat při rychlosti otáčení 33 [rpm]:

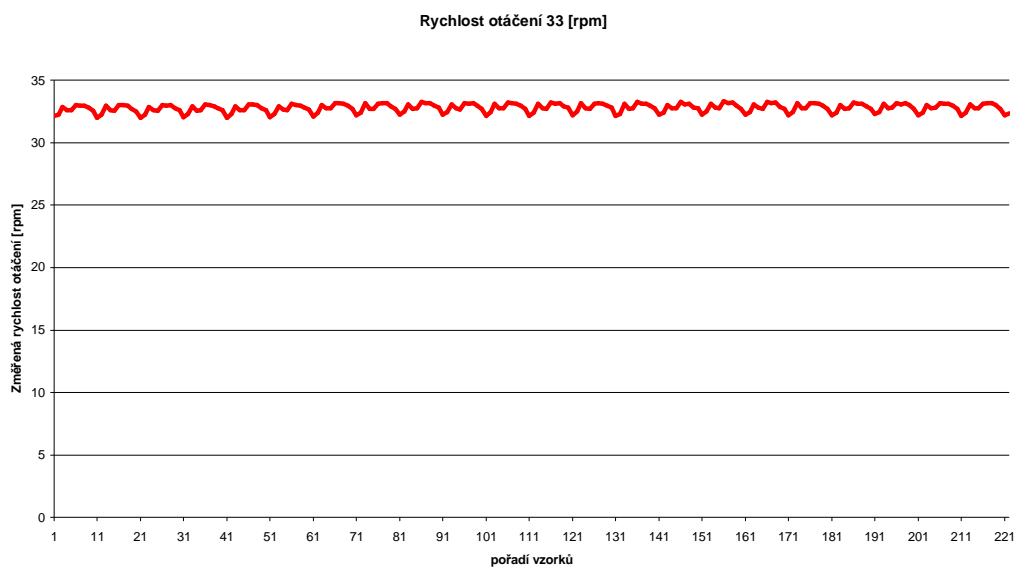
$$rh = \frac{Min.}{RPM} * \frac{f_{clk}}{f_{prescaler}} * \frac{1}{PMSnO} = \frac{60}{33} * \frac{10000000}{256} * \frac{1}{10} = 7102,27$$

PMSnO – Počet Měřicích Segmentů na Otáčku

Použitý kotouč je vyřezán z papíru, to nelze provést s absolutní přesností. Tento jev způsobuje, že měřené úseky nemají stejnou délku, ale úseky stejné délky se periodicky opakují po deseti vzorcích, tento periodický průběh je zobrazen na obrázku *Obr 5.01* pro zařízení nevyužívající při měření USB a na obrázku *Obr 5.02* pro měření pomocí zařízení připojeného do USB. Postup vypočtení otáček za minutu z naměřených dat je v příloze F tabulka Tab F.01.

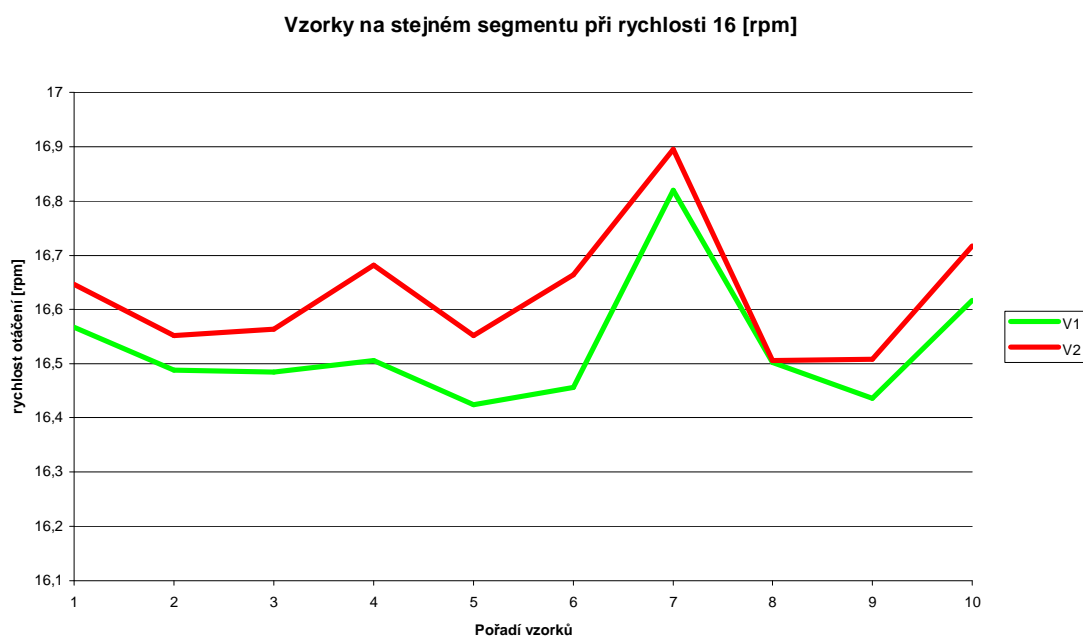


*Obr 5.01 – Záznam z měření na přípravku bez USB*



Obr 5.02 – Záznam z měření na přípravku připojeného do USB

Pro zpřesnění vyhodnocení je tedy nutné zaměřit se na porovnání vzorků naměřených na stejném segmentu kotouče. Jelikož má kotouč deset segmentů, je třeba porovnat vzorky od sebe vzdálené o deset měření. Na obrázku Obr 5.03 jsou vyneseny dva průběhy, kde každý je naměřen na jiném segmentu. Z průběhů je patrné, že rychlost kotouče se při jednom úseku liší otáčku od otáčky, ale průběh rychlostí otáčení na různých segmentech byl při jedné otáčce kopírován, pouze byl posunut vlivem nepřesnosti výroby kotouče.



Obr 5.03 – Průběhy na konstantním segmentu

Na průběhu z obrázku *Obr 5.04* je zaznamenáno měření, při kterém byl kotouč přibrzděn. Z průběhu je patrné, že rychlost kotouče se vrátila na původní průběh rychlosti již na dalším změřeném vzorku.

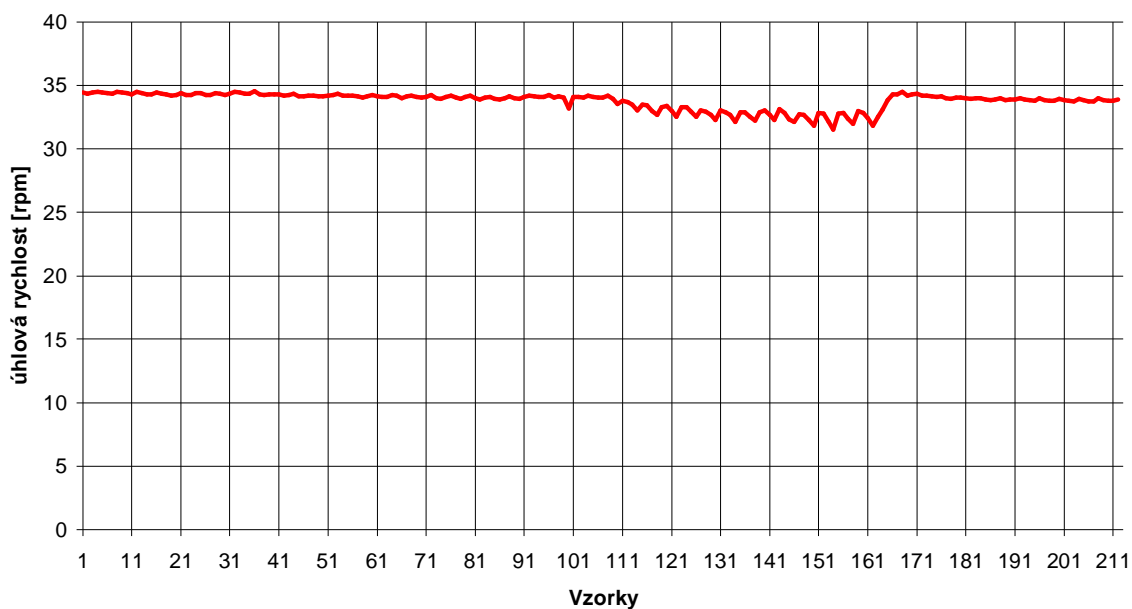


*Obr 5.04 – Měření při zbrzdění kotouče*

Měření bylo provedeno rovněž na moderním gramofonu, který slouží k ukládání zvukových záznamů z gramofonových desek do formátu mp3. U tohoto gramofonu vznikl problém, jelikož původní kotouč byl navržen pro uchycení na otočný střed gramofonu. Tento moderní gramofon měl tento střed navržený jako netočivý. Místo kotouče byly využity vnitřní drážky talíře gramofonu, které byly pro účely měření zabíleny. Takto upravený talíř umožnil vytvořit čtyři měřicí úseky. Tyto úseky však nebylo možné detekovat přímou optickou závorou, a tak byla použita reflexní závora TCRT 1000, která byla zapojena na přípravku použitým při testovacích měřeních na senzorech.

Na obrázku *Obr 5.05* je zachyceno měření na moderním gramofonu, který byl během měření uměle přibrzděn. Na průběhu je patrné, že po skončení brzdění se rychlost zvýšila nad standardní rychlost otáčení, a pak se teprve ustálila na hodnotě, kterou měla před zahájením měření. Z tohoto poznatku vyplývá, že tento moderní gramofon má ošetřeno, aby při zvýšené zátěži zvýšil své otáčky a tím dorovnal rozdíl, který vznikl v rychlosti otáčení.

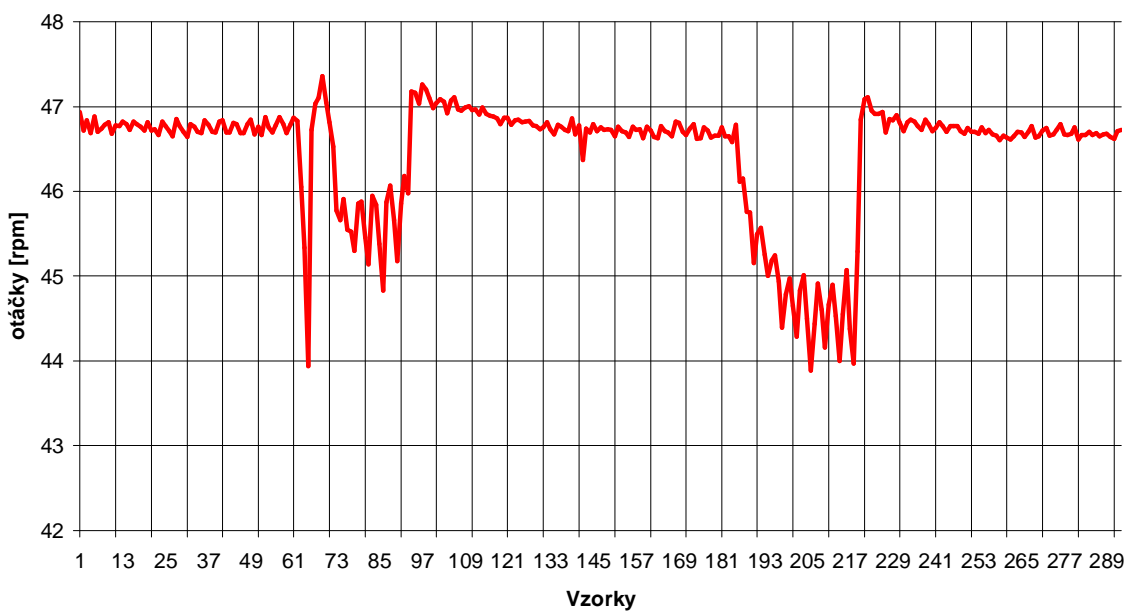
### Brzděné měření



*Obr 5.05 – Měření při zbrzdění kotouče na druhém gramofonu*

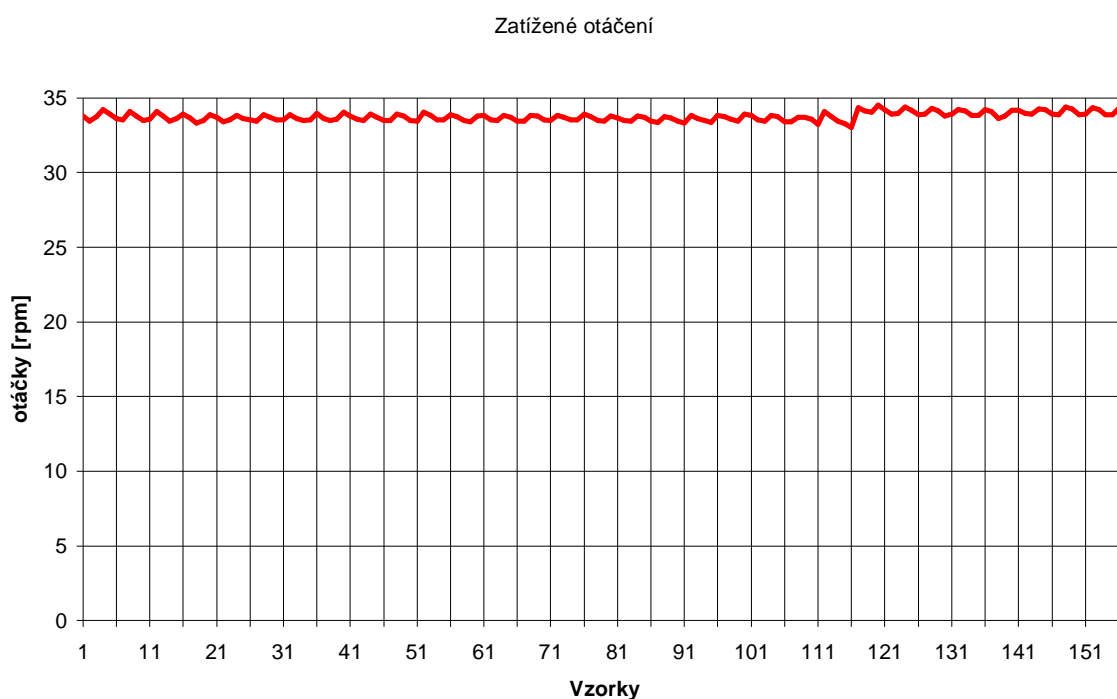
Na obrázku *Obr 5.06* je zobrazen průběh měření při zbrzdění kotouče a vyšší rychlosti otáčení oproti obrázku *Obr 5.05*. Z těchto dvou měření je patrné, že gramofon se otáčí rychleji v porovnání s požadovanou rychlostí otáčení.

### Brzděné měření při vyšší rychlosti otáčení

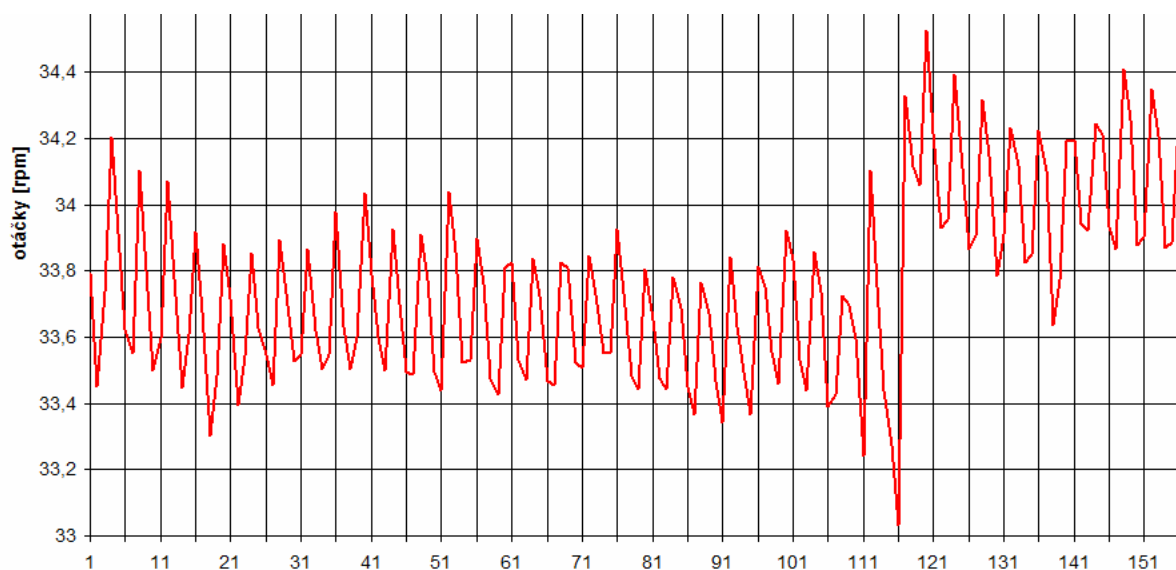


*Obr 5.06 – Měření při zbrzdění kotouče na druhém gramofonu*

Na obrázcích Obr 5.07 a Obr 5.08 je zachycen průběh otáčení druhého gramofonu, jehož talíř je rozdělen na čtyři segmenty a je zatížen permanentní zátěží konstantní hodnoty. Po vzorku 116 byla tato zátěž odstraněna. Z průběhů je patrné, že dojde po odstranění zátěže ke zvýšení rychlosti otáčení. Toto zvýšení rychlosti je téměř zanedbatelné v porovnání s rychlostí otáčení talíře gramofonu.



*Obr 5.07 – Měření při změně zatížení kotouče*



*Obr 5.08 – Měření při změně zatížení kotouče na rozsahu od 33 [rpm] do 35 [rpm]*



## 6. Závěr

Cílem práce bylo seznámení se způsoby měření otáčení, principy snímání dat pro tato měření, dalším bodem bakalářské práce bylo vyhodnocení nerovnoměrnosti otáčení, poslední část práce byla zaměřena na nasazení získaných poznatků v praktické aplikaci a návrh zařízení pro měření na této aplikaci.

### 6.1 Zhodnocení dosažených výsledků

V úvodní části práce byly rozebrány metody měření rychlosti otáčení a možnosti snímání dat pro tyto měřicí metody, které se používají v dnešní době i metody, od kterých se dnes již při nasazení v praktických aplikacích upouští. V první části praktického bloku práce byla provedena úspěšná měření na senzorech pro snímání dat z rotujícího kotouče optickou cestou, a to jak pomocí přímého tak i odraženého šíření paprsku. Pro závěrečná měření na gramofonech se uplatnily obě tyto metody šíření záření.

Způsob snímání značek byl zvolen optickou cestou. Pro zařízení byla vybrána metoda měření rychlosti otáčení, ve které je měřen čas mezi dvěma po sobě jdoucími značkami. Značky jsou od sebe rozmístěny s konstantními rozestupy, pro kotouč osazený deseti spínacími segmenty představuje čas mezi dvěma sepnutími pootočení kotouče o úhel  $36^\circ$ . Úhlová rychlost se pak dopočítá podle vztahu  $w = \Delta j / \Delta t$ . Pro kotouč druhého gramofonu, který je rozdělen na čtyři segmenty, je úhlový rozestup  $90^\circ$ . V práci byly navrženy a odzkoušeny dva typy měřicích zařízení pro měření rychlosti otáčení. První měřicí zařízení je navrženo pro použití bez potřeby zapojení k PC a druhé bylo navrženo pro odesílání naměřených dat do PC pomocí USB.

Z testovacího měření na přípravcích je patrné, že měření produkuje chybu, která se opakuje zhruba po stejných intervalech. Tato chyba zkresluje naměřené hodnoty a to odchylkou o cca 25,6 mikrosekund v případě zařízení pro USB. Snížení této chyby lze dosáhnout použitím vyššího kmitočtu  $f_{clk}$ , který budí měřicí čítač. Přesnost při odchylce jednoho pulsu je přímo úměrná jedné a nepřímo úměrná počtu pulsů během jednoho segmentu. Z toho plyne vzniklá chyba v řádech  $10^{-5}$  až  $10^{-4}$  pro kotouč rozdělený na 4 segmenty.

V závěrečné části práce byla provedena měření na novém a starém typu gramofonu při volném otáčení a poté měření na těchto gramofonech při přibrzdění a zatížení rotujícího talíře. Data z těchto měření byla uložena do souboru s koncovkou .zed, zpracována a vynesena do grafů byla pomocí programu Microsoft Excel. Podle tabulky *Tab F.01* lze obráceným postupem dopočítat počet předpokládaných cyklů na hodnotu přibližně 17756 strojových cyklů pro rychlost 33 [RPM] a na 4 segmenty rozdělený kotouč. Průměrná hodnota z 212 naměřených vzorků je 17362 strojových cyklů a z toho vyplývá časový rozdíl na segment 10,0864 ms. Gramofon nezatížený deskou se tedy podle výše zmíněného otáčel větší než požadovanou rychlostí. Obrázek *Obr 5.08* ukazuje, jak se po zatížení talíře gramofonu rychlost otáčení přiblíží požadované rychlosti.

Přesnost měření byla ovlivněna čtyřmi faktory, 1. je tolerance  $\pm 1$ , 2. je nepřesná vzdálenost mezi značkami na kotouči vzniká při výrobě kotouče, 3. je upevnění kotouče k měřené části gramofonu a 4. je nepřesnost odrazu odvozená od vzdálenosti mezi senzorem a reflexní plochou kotouče.

## 6.2 Další možná zlepšení

Zařízení pro připojení k PC, by bylo lépe navrhnout s vyvedenými piny z mikroprocesoru pro programátor JTAG, to by usnadnilo úpravy a odzkoušení programu v měřicím zařízení. Dále by bylo lépe přidat k zařízení mimo obvodu pro kontrolu napájení zařízení i obvod kontrolující zda zařízení právě provádí měření, nebo je-li právě ve stavu nečinnosti.

Při realizaci měření bylo zjištěno, že nejlepším postupem výroby kotouče je jednoduchý kotouč zhotovený na průsvitné fólii, kde se požadované segmenty zastíní. Výhodou je vyšší přesnost než-li při zhotovení z papíru, který je třeba mechanicky upravovat. Další výhodou kotouče zhotoveného bez vystřižených segmentů je fakt, že nedochází k jeho ohybu na jednotlivých segmentech, v důsledku čehož byla přesnost měření snížena a docházelo i k zachycení kotouče senzorem. Přesnější rychlost otáčení lze získat také použitím kotouče s větší vzdáleností spínacích značek od středu otáčení. Měření nerovnoměrnosti otáčení během jedné otáčky by bylo možné také zpřesnit využitím kotouče s jedním segmentem. Tento kotouč by byl k měřenému točivému stroji připojen pomocí převodu, kde převodový poměr by udával, na kolik měřených částí je jedna otáčka měřeného zařízení rozdělena. Nevýhodou tohoto způsobu měření je snížená přesnost při měření přesné rychlosti otáčení, jelikož převod zatíží měřený objekt, a ten se pak otáčí pomaleji.

## Použitá literatura:

### *Internetové odkazy:*

- (1) *Hornicko-geografická fakulta* [online]. 2007-2009 [cit. 2008-10-10]. Dostupný z WWW: <[http://hgf.vsb.cz/neu10/studium/ashv/texty/doly/12\\_a\\_rychlost\\_otacky.pdf](http://hgf.vsb.cz/neu10/studium/ashv/texty/doly/12_a_rychlost_otacky.pdf)>.
- (2) *Katedra řídicí techniky ČVUT-FEL Praha* [online]. 1993-2009 [cit. 2008-10-10]. Dostupný z WWW: <[http://dce.felk.cvut.cz/zri/podklady/Regulace\\_ss\\_motorku.pdf](http://dce.felk.cvut.cz/zri/podklady/Regulace_ss_motorku.pdf)>.
- (3) *KATEDRA MIKROELEKTRONIKY ČVUT-FEL Praha* [online]. 2006 , 30.1.2009 [cit. 2009-1-1]. Dostupný z WWW: <<http://www.micro.feld.cvut.cz/home/X34SES/>>.
- (4) *Jonatan* [online]. 2007 [cit. 2008-10-10]. Dostupný z WWW: <[http://jonatan.spse.pilsedu.cz/~mazanec/opticke\\_ekodery.htm](http://jonatan.spse.pilsedu.cz/~mazanec/opticke_ekodery.htm)>.
- (5) *Katedra řídicí techniky ČVUT-FEL Praha* [online]. 1993-2009 [cit. 2008-10-10]. Dostupný z WWW: < [http://dce.felk.cvut.cz/zri/podklady/Inkrement\\_snimac.pdf](http://dce.felk.cvut.cz/zri/podklady/Inkrement_snimac.pdf) >.
- (6) *Automatizace - snímače* [online]. [1999] [cit. 2008-10-10]. Dostupný z WWW: <<http://www.snimace.xf.cz/>>.
- (7) *Wikipedie* [online]. 2002 [cit. 2008-10-10]. Dostupný z WWW: <<http://cs.wikipedia.org/>>.

### *Datasheet*

- |      |               |   |                           |
|------|---------------|---|---------------------------|
| (8)  | ATMEGA16-16PU | – | Mikroprocesor             |
| (9)  | ss49          | – | Magnetické čidlo          |
| (10) | FT245RL       | – | Budič USB                 |
| (11) | LTH209-01     | – | Optické čidlo             |
| (12) | KTIR0711S     | – | Optické čidlo             |
| (13) | KTIR0611S     | – | Vidlicová světelná závora |
| (14) | TCRT1000      | – | Reflexní světelná závora  |
| (15) | TCRT5000      | – | Reflexní světelná závora  |

*Knižní literatura:*

- (16) Váňa, Vladimír. *Mikrokontroléry ATMEL AVR Programování v Jazyce C*. Praha : BEN - Technická literatura, 2006. 213 s., 1 CD-ROM. ISBN 80-7300-102-0.
- (17) BEDNAŘÍK, Milan, ŠIROKÁ, Miroslava. *Fyzika pro gymnázia : Mechanika*. Praha : Prometheus, 2005. 288 s. ISBN 80-7196-176-0.
- (18) Prof. Ing. Stanislav Ďaďo, DrSc., Doc. Ing. Marcel Kreidl, CSc. *Senzory a měřicí obvody*
- (19) MARTINEK, Radislav. *Senzory v průmyslové praxi*. Praha : BEN - Technická literatura, 2008. 199 s. ISBN 80-7300-114-4.
- (20) FUKÁTKO, Tomáš. *Senzory neelektrických veličin : Detekce a měření různých druhů záření*. Praha : BEN - Technická literatura, 2007. 189 s. ISBN 978-80-7300-193-3.
- (21) KREIDL, Marcel, ŠMÍD, Radislav. *Senzory neelektrických veličin : Technická diagnostika*. Praha : BEN - Technická literatura, 2006. 408 s. ISBN 80-7300-158-6.

## Seznam obrázků:

<i>Obr 1.01 – Rovnoměrný pohyb hmotného bodu po kružnici(17)</i>	12
<i>Obr 2.01 – Úpravy hřídělí pro měření otočení o 360°</i>	14
<i>Obr 2.02 – Úpravy hřídělí pro měření počtu průchozích značek za čas</i>	15
<i>Obr 2.03 – Způsoby nevhodné úpravy hřídělí</i>	16
<i>Obr 2.04 – Pořadí spínání čidel</i>	17
<i>Obr 2.05 – Princip kotouče pro aktuální měření výchylky a jeho snímání</i>	19
<i>Obr 2.06 – Princip měření otáček pomocí tachometrického dynama (3)</i>	19
<i>Obr 2.07 – Kotouč při kmitočtu stroboskopu a polovině kmitočtu stroboskopu</i>	20
<i>Obr 3.01 – Princip optické závory (13)</i>	22
<i>Obr 3.02 – Závislost výstupu optické závory na vstupním pulsu (13)</i>	23
<i>Obr 3.03 – Princip detektoru využívajícího odražené záření (14)</i>	23
<i>Obr 3.04 – Problematika paprsku odraženého od měřeného objektu</i>	24
<i>Obr 3.05 – Princip impulsní magnetické detekce (3)</i>	25
<i>Obr 3.06 – Princip Hallovy sondy</i>	26
<i>Obr 3.07 – Kapacitní detektory s proměnnou vzájemnou polohou(18)</i>	27
<i>Obr 3.08 – Úprava měřícího kotouče pro kapacitní detekci polohy</i>	28
<i>Obr 3.09 – Principy mechanických čidel</i>	29
<i>Obr 3.10 – Délka periody záznamu na médiu</i>	30
<i>Obr 4.01 – Přípravky optických čidel</i>	35
<i>Obr 4.02 – Elektromotor a kolový převod</i>	36
<i>Obr 4.03 – Kotouče pro měření reflexních závor</i>	36
<i>Obr 4.04 – Schéma pracoviště pro měření odrazu na TCRT 1000</i>	37
<i>Obr 4.05 – Výstup detektoru s kotoučem rozděleným na 8 dílů</i>	38
<i>Obr 4.06 – Výstup detektoru přiblížený na jeden puls</i>	38
<i>Obr 4.07 – Výstup detektoru při snížené zátěži kolektoru</i>	39
<i>Obr 4.08 – Měření na zúžených pulsech</i>	40
<i>Obr 4.09 – Schéma zapojení pro měření odezvy na puls senzorem TCRT 1000</i>	40
<i>Obr 4.10 – Odezva detektoru TCRT1000 na impuls</i>	41
<i>Obr 4.11 – Odezva na puls při <math>R_k = 100k</math></i>	41
<i>Obr 4.12 – Schéma pracoviště pro měření odrazu na TCRT 5000</i>	42
<i>Obr 4.13 – Detekce na TCRT 5000</i>	42
<i>Obr 4.14 – Vykreslení náběžné hrany na TCRT 5000</i>	43

<i>Obr 4.15 – Detekce na kotouči pro TCRT 1000</i>	43
<i>Obr 4.16 – Výstup detektoru při snížené zátěži kolektoru</i>	44
<i>Obr 4.17 – Schéma pracoviště pro měření zastínění senzorem KTIR0611S</i>	44
<i>Obr 4.18 – Detekce na optické závoře</i>	45
<i>Obr 4.19 – Detail pulsu detekovaného pomocí KTIR0611S</i>	46
<i>Obr 4.20 – KTIR0611S s <math>RL = 1kW</math></i>	46
<i>Obr 4.21 – Schéma pracoviště pro měření odezvy senzorem KTIR0611S</i>	47
<i>Obr 4.22 – Odezva KTIR0611S na puls</i>	47
<i>Obr 4.23 – Blokové schéma zařízení bez USB</i>	50
<i>Obr 4.24 – Průběh z testovacího měření při změnách pulsů</i>	52
<i>Obr 4.25 – Blokové schéma zařízení pro připojení do USB</i>	53
<i>Obr 4.26 – Fotka měřicího zařízení pro USB</i>	54
<i>Obr 4.27 – Fotka měřicího zařízení pro USB ze strany plošných spojů</i>	54
<i>Obr 4.28 – Uživatelské rozhraní v PC</i>	55
<i>Obr 4.29 – Uložení dat do souboru</i>	56
<i>Obr 4.30 – Průběh z testovacího měření zařízení pro USB</i>	57
<i>Obr 5.01 – Záznam z měření na přípravku bez USB</i>	59
<i>Obr 5.02 – Záznam z měření na přípravku připojeného do USB</i>	60
<i>Obr 5.03 – Průběhy na konstantním segmentu</i>	60
<i>Obr 5.04 – Měření při zbrždění kotouče</i>	61
<i>Obr 5.05 – Měření při zbrždění kotouče na druhém gramofonu</i>	62
<i>Obr 5.06 – Měření při zbrždění kotouče na druhém gramofonu</i>	62
<i>Obr 5.07 – Měření při změně zatížení kotouče vztaženo k nule</i>	63
<i>Obr 5.08 – Měření při změně zatížení kotouče vztaženo k 33 [rpm]</i>	63

## Seznam tabulek:

<i>Tab 2.01- Tabulka určení směru podle stavů čidel</i>	17
<i>Tab 2.01- Tabulka přechodů</i>	18
<i>Tab 4.01 – Hodnoty z prvního měření bez krystalu</i>	53
<i>Tab 6.01 – Fyzické rozměry gramofonu</i>	58

## Příloha A:

Tab A.01 – Tabulky elektrických charakteristik TCRT1000(14)

### Input (Emitter)

Parameter	Test Conditions	Symbol	Min.	Typ.	Max.	Unit
Forward voltage	$I_F = 50 \text{ mA}$	$V_F$		1.25	1.6	V

### Output (Detector)

Parameter	Test Conditions	Symbol	Min.	Typ.	Max.	Unit
Collector emitter voltage	$I_C = 1 \text{ mA}$	$V_{CEO}$	32			V
Emitter collector voltage	$I_E = 100 \text{ } \mu\text{A}$	$V_{ECO}$	5			V
Collector dark current	$V_{CE} = 20 \text{ V}, I_F = 0, E = 0$	$I_{CEO}$			200	nA

Tab A.02 – Tabulky elektrických charakteristik TCRT5000(15)

### Input (Emitter)

Parameter	Test Conditions	Symbol	Min.	Typ.	Max.	Unit
Forward voltage	$I_F = 60 \text{ mA}$	$V_F$		1.25	1.5	V
Junction capacitance	$V_R = 0 \text{ V}, f = 1 \text{ MHz}$	$C_j$		50		pF

### Output (Detector)

Parameter	Test Conditions	Symbol	Min.	Typ.	Max.	Unit
Collector emitter voltage	$I_C = 1 \text{ mA}$	$V_{CEO}$	70			V
Emitter collector voltage	$I_E = 100 \text{ } \mu\text{A}$	$V_{ECO}$	7			V
Collector dark current	$V_{CE} = 20 \text{ V}, I_F = 0, E = 0$	$I_{CEO}$		10	200	nA

Tab A.03 – Tabulky elektrických charakteristik KTIR0611s(13)

Parameter		Symbol	Conditions	Min.	Typ.	Max.	Unit
Input	Forward voltage	$V_F$	$I_F=20\text{mA}$	–	1.2	1.5	V
	Reverse current	$I_R$	$V_R=5\text{V}$	–	–	10	$\mu\text{A}$
Output	Collector dark current	$I_{CEO}$	$V_{CE}=20\text{V}$	–	–	100	nA
Transfer characteristics	Collector-emitter saturation voltage	$V_{CE(sat)}$	$I_C=1\text{mA}$ $I_F=40\text{mA}$	–	–	0.4	V
	Current transfer ratio	CTR	$V_{CE}=5\text{V}$ $I_F=20\text{mA}$	–	14	–	%
	Response time	Rise time	$t_r$	$V_{CE}=2\text{V}$ $I_C=2\text{mA}$ $R_L=100\Omega$	–	5	25
Fall time		$t_f$	–		4	20	$\mu\text{sec}$

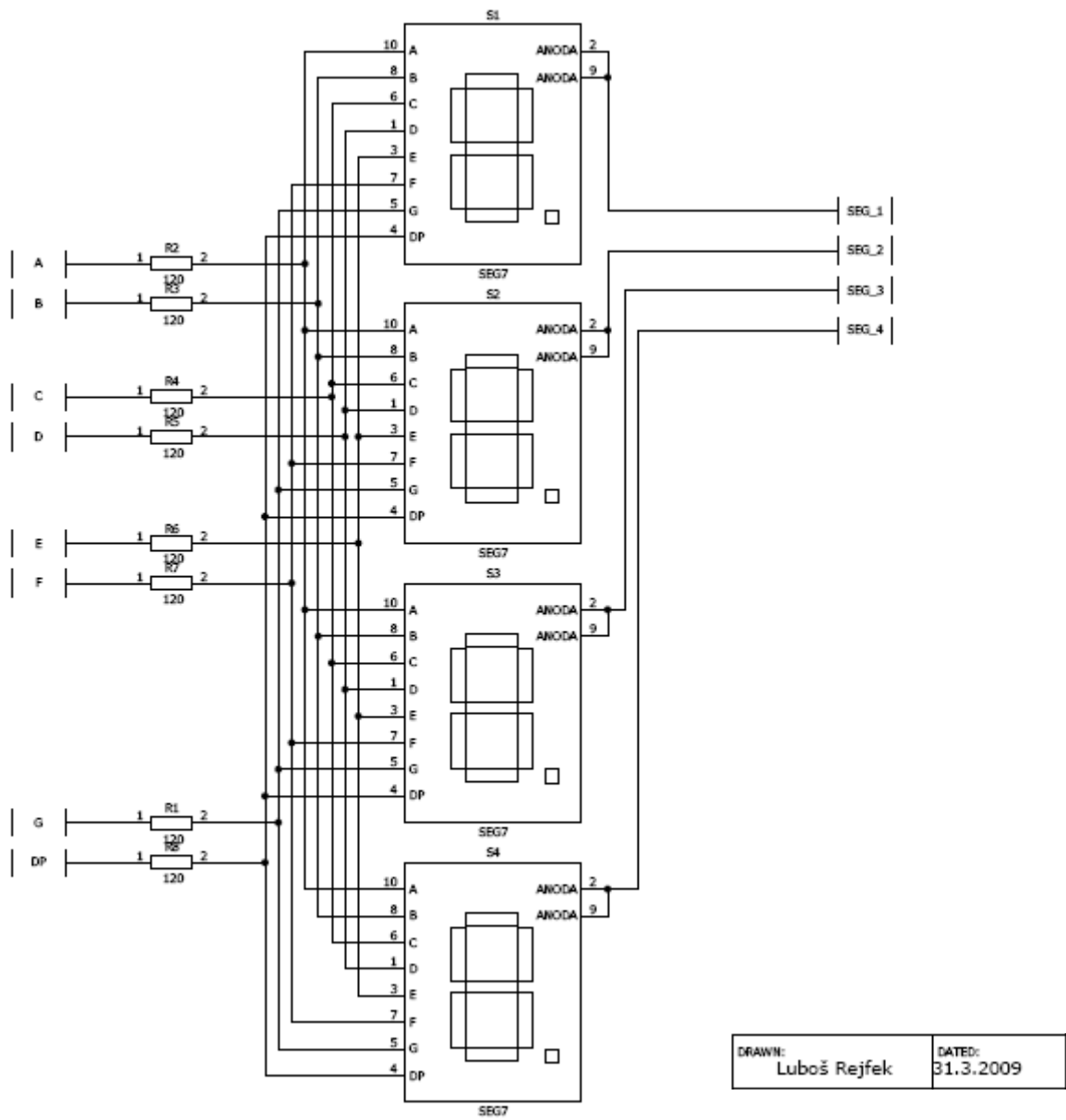
## Příloha B:

Tab B.01 – Vztahy pro metody na zpracování naměřených dat

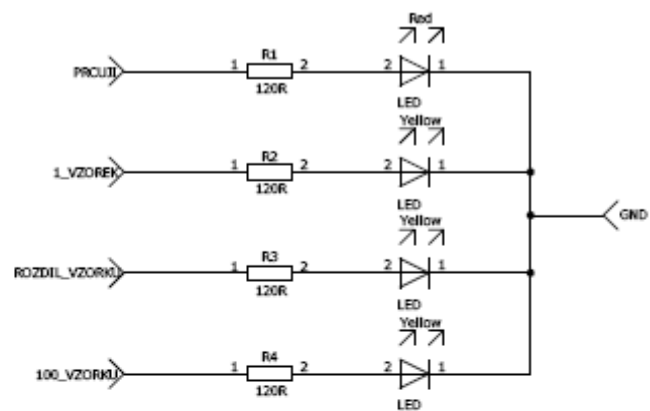
	Princip	Vztah	Vlastnosti
A	Změna proti předchozímu vzorku	$V = V_{n-1} - V_n$	Určuje jak se změnil nový vzorek od předchozího, při konstantní rychlosti je 0 a při rovnoměrném zrychlení je konstantní na hodnotě zrychlení
B	Aktuální průměrná hodnota	$V = \frac{Z \cdot V_p + V_n}{Z + 1}$	Určuje průměr naměřených hodnot a určuje tendenci změny rychlosti, kde Z je počet dosavadních vzorků
C	Rozdíl proti aktuální průměrné hodnotě	$V = V_p - V_n$	Určuje odchylku od postupně ustálené tendence změny rychlosti
D	Aktuální rychlost	$V = V_n$	Vynáší aktuální rychlost otáčení
E	X vzorková průměrná hodnota	$V = \frac{V_{n-x} + \dots + V_{n-1} + V_n}{X}$	Určuje tendenci změny rychlosti a postupně odlučuje extrémní výchyly v měření. X je počet požadovaných vzorků na výpočet průměru
F	Rozdíl proti X vzorkové průměrné hodnotě	$V = V_{px} - V_n$	Rozdíl od krátkodobé tendence změny rychlosti otáčení
G	Rozdíl od požadované hodnoty	$V = V_{pož.} - V_n$	Určuje jak se aktuální rychlost vyvíjí oproti rychlosti požadované uživatelem



# Příloha C:

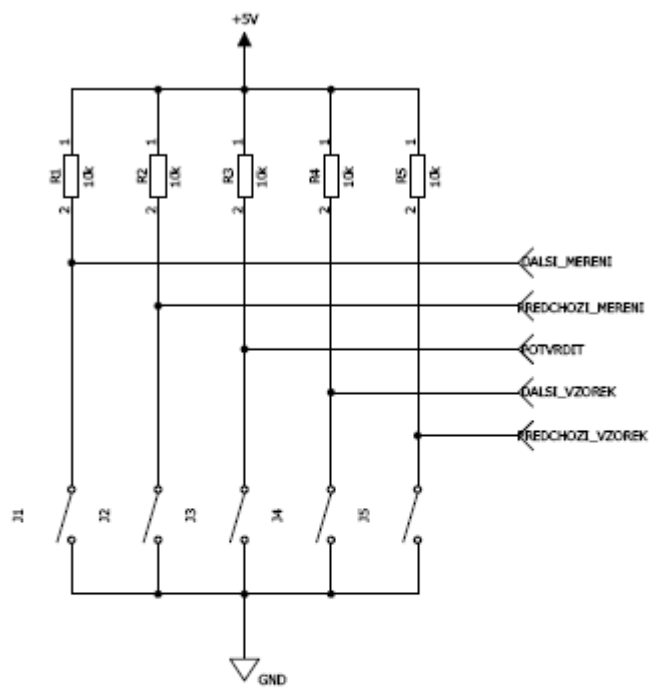


Obr C.01 – Zobrazovací modul



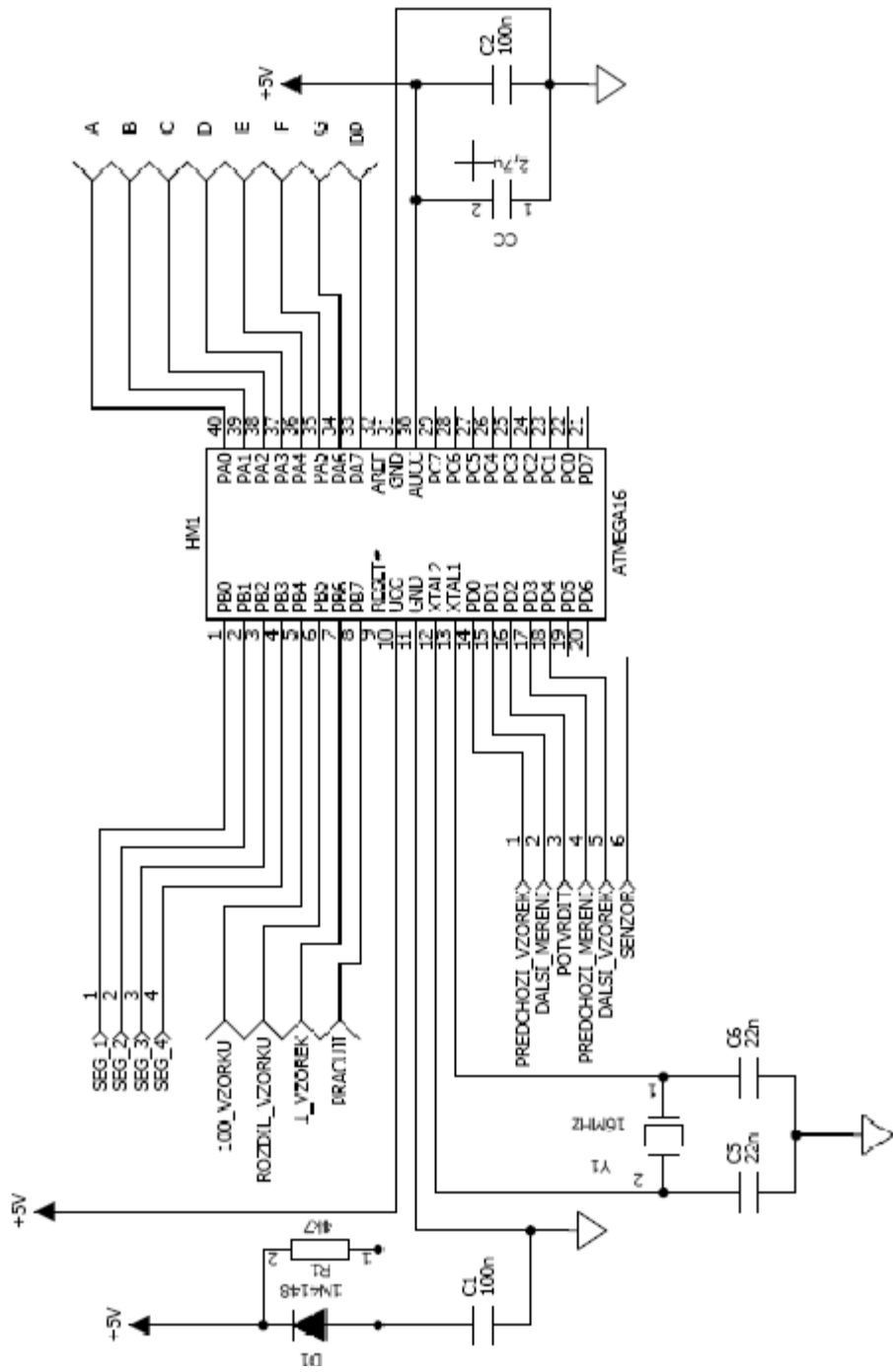
DRAWN: Luboš Rejtek	DATED: 31.3.2009
------------------------	---------------------

Obr C.02 – Modul výběru měřicí metody

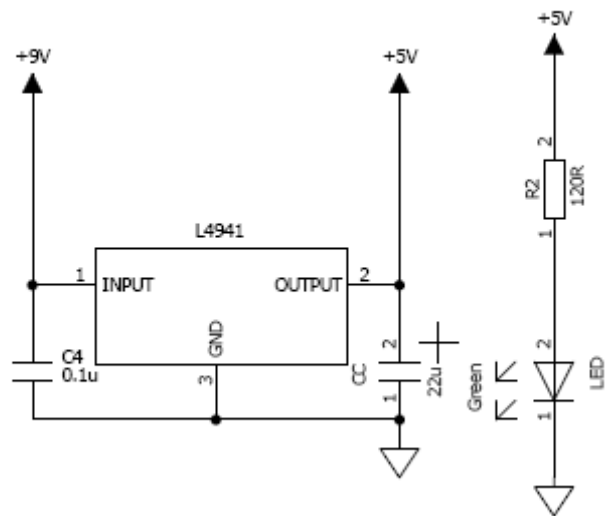


DRAWN: Luboš Rejček	DATE: 31.3.2009
------------------------	--------------------

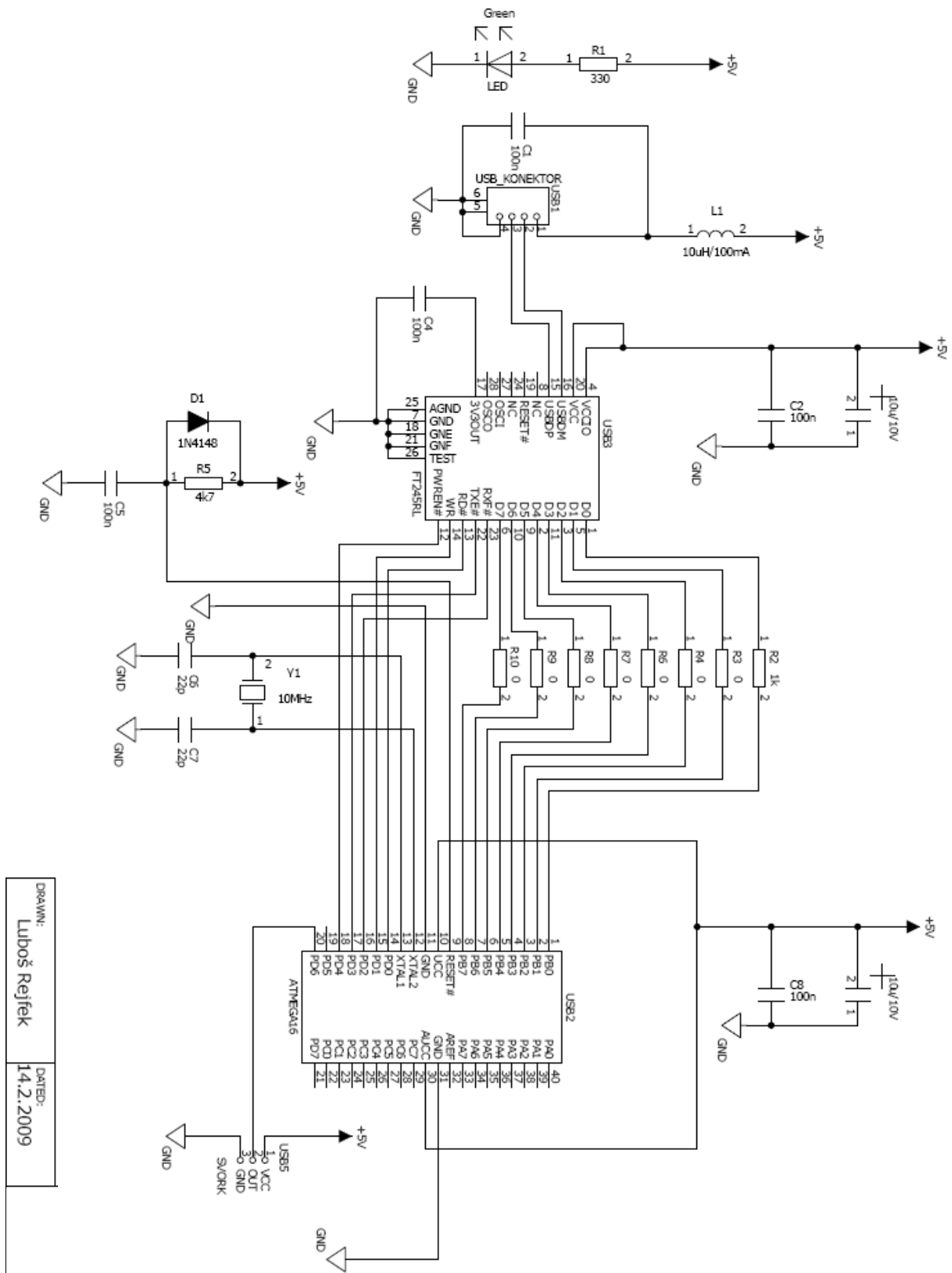
Obr C.03 – Modul ovládání



Obr C.04 – Základní modul bez zdroje

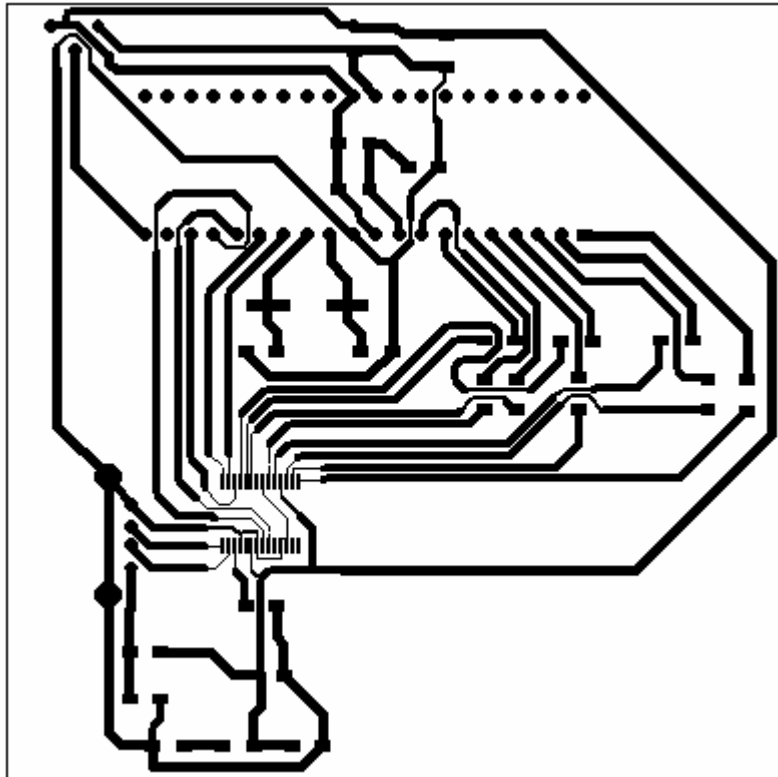


*Obr C.05 – Zdroj umístěný na desce základního modulu*



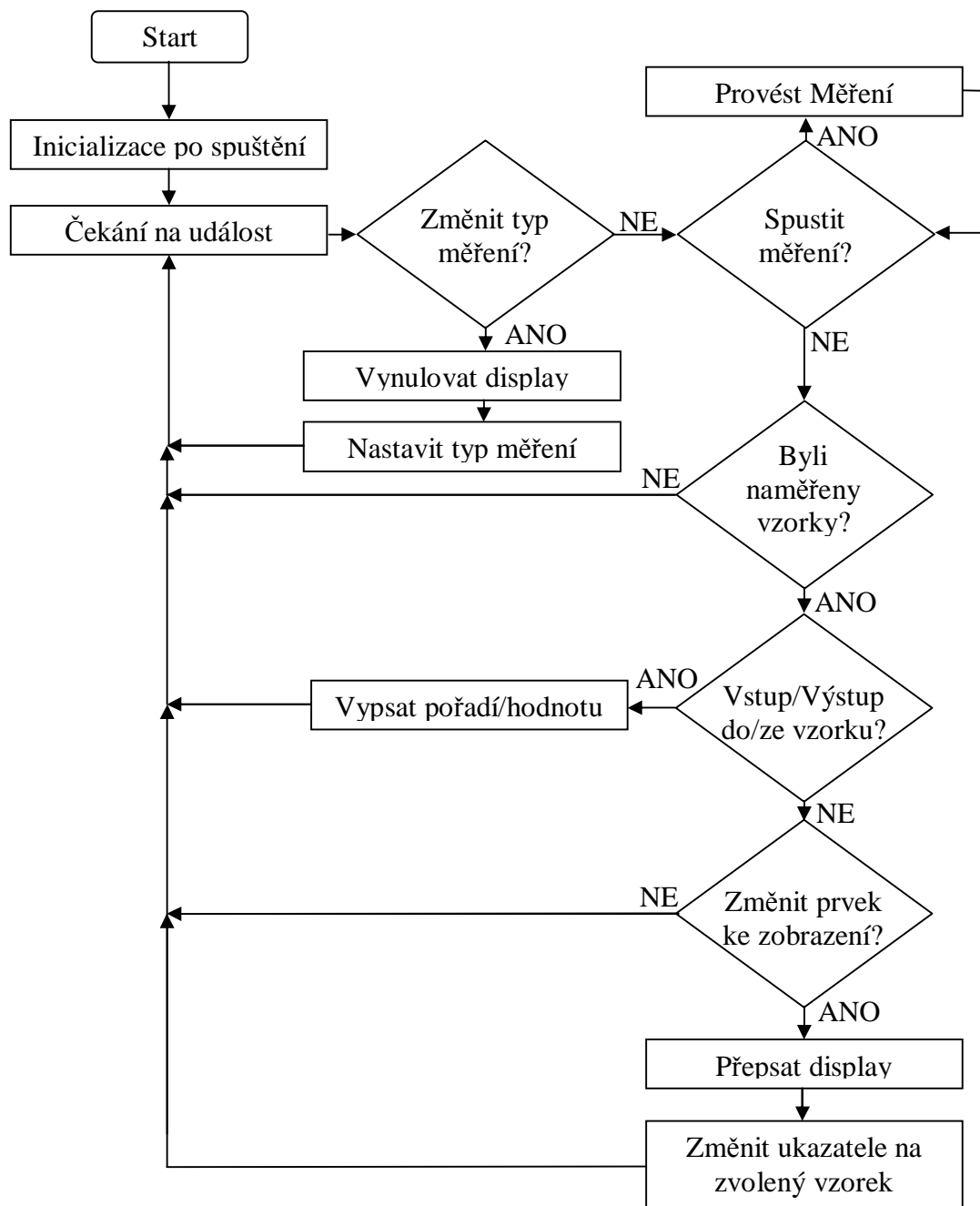
DRAWN: Luboš Rejček  
 DATED: 14.2.2009

Obr C.06 – Schéma zařízení pro zapojení do USB



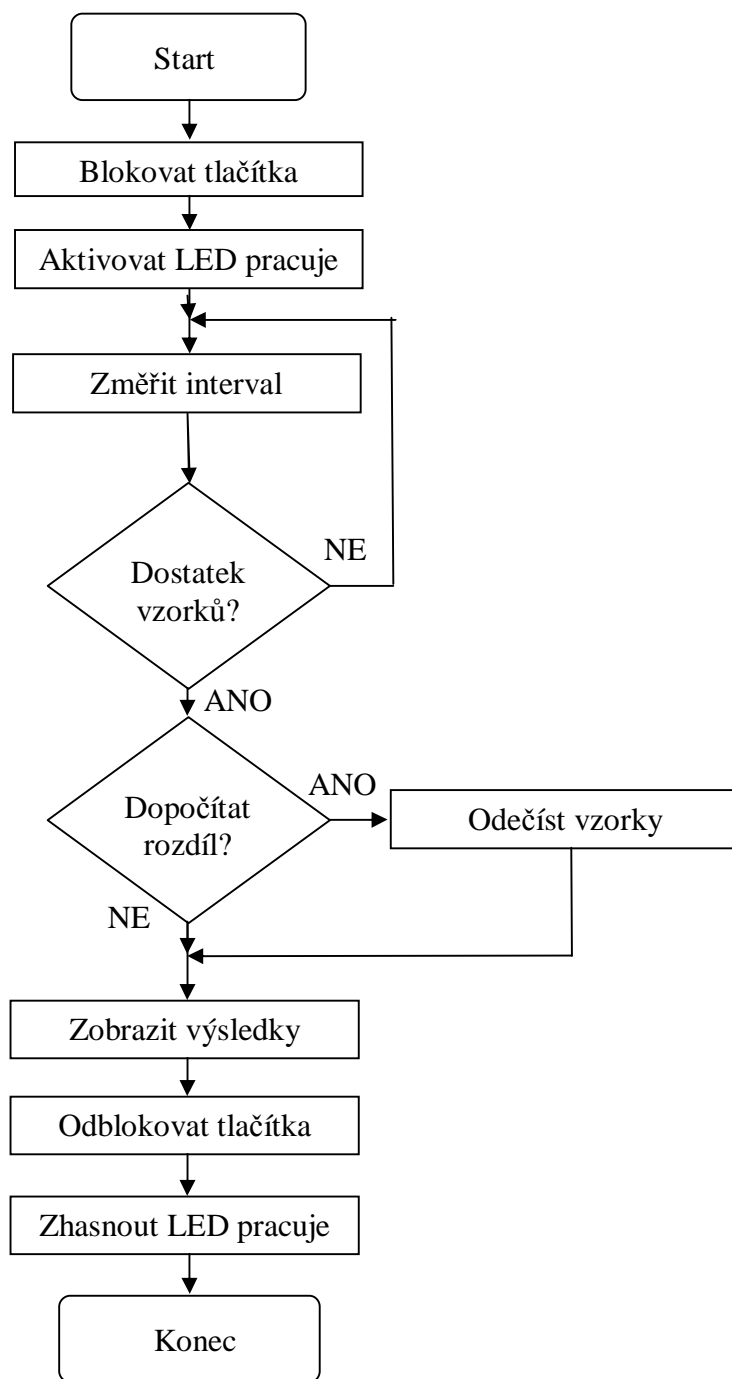
*Obr C.06 – Deska plošného spoje zařízení pro zapojení do USB*

## Příloha D:



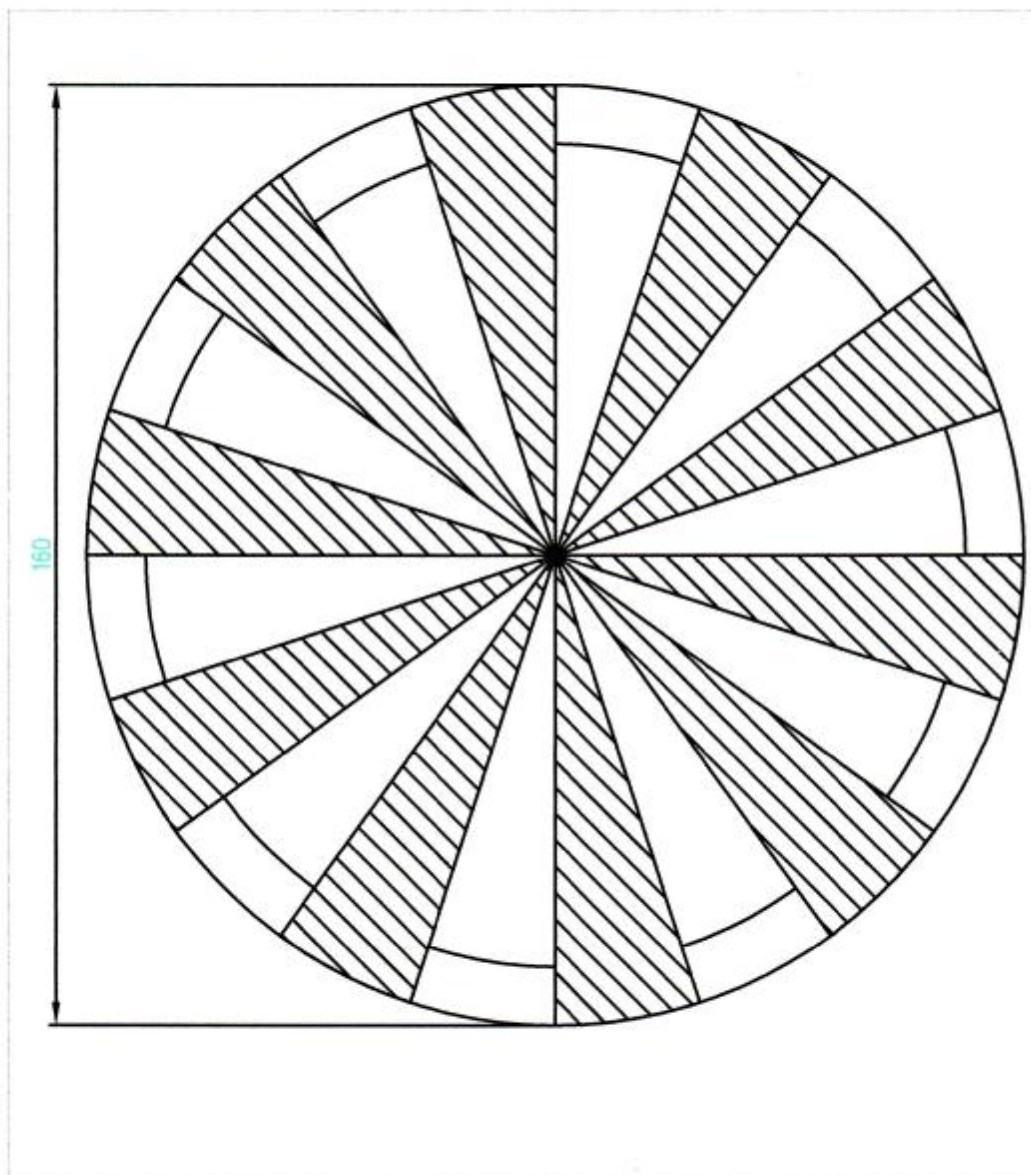
Obr D.01 – Hlavní algoritmus programu





*Obr D.02 – Algoritmus postupu při měření*

Příloha E:



*Obr E.01 – Měřicí kotouč pro měření na gramofonu*

## Příloha F:

Tab F.01 – Postup pro výpočet otáček za minutu z naměřených dat

Pořadí kroku	Co se vypočítá	Vztah
1.	Výpočet času jednoho intervalu z počtu naměřených budících pulsů čítače.	$T_{segmentu} = \check{C}as\_Pulsu * Nam\check{r}en\acute{a}\_Data$ $T_{segmentu} = \frac{f_{p\check{r}edd\check{e}l\check{i}cky}}{f_{clk}} * Nam\check{r}en\acute{a}\_Data$ $T_{segmentu} = 0,0000256 * Nam\check{r}en\acute{a}\_Data$
2.	Výpočet doby celé otáčky kotouče při dodržení doby jednoho segmentu pro všechny segmenty.	$T_{periody} = T_{segmentu} * Po\check{c}et\_Segment\acute{u}$ $T_{periody\_Pr\ vni\_Gramofon} = T_{segmentu} * 10 \text{ [s]}$ $T_{periody\_Druh\acute{y}\_Gramofon} = T_{segmentu} * 4 \text{ [s]}$
3.	Výpočet rychlosti otáčení kotouče umístěného na gramofonu v otáčkách za minutu.	$v_{Gramofonu} = \frac{Sekundy\_v\_Minut\check{e}}{T_{periody}}$ $v_{Gramofonu} = \frac{60}{T_{periody}} [rpm]$