



**VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ**

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY



**FAKULTA ELEKTROTECHNIKY A KOMUNIKAČNÍCH  
TECHNOLOGIÍ**

**ÚSTAV AUTOMATIZACE A MĚŘICÍ TECHNIKY**

FACULTY OF ELECTRICAL ENGINEERING AND COMMUNICATION  
DEPARTMENT OF CONTROL AND INSTRUMENTATION

## **LABORATORNÍ PŘÍPRAVEK PRO MĚŘENÍ OTÁČEK**

LABORATORY EQUIPMENT FOR SPEED MEASUREMENT

**DIPLOMOVÁ PRÁCE**

MASTER'S THESIS

**AUTOR PRÁCE**

AUTHOR

**Bc. JIŘÍ ZIKMUND**

**VEDOUCÍ PRÁCE**

SUPERVISOR

**doc. Ing. PETR BENEŠ, Ph.D.**

BRNO 2010



VYSOKÉ UČENÍ  
TECHNICKÉ V BRNĚ

Fakulta elektrotechniky  
a komunikačních technologií

Ústav automatizace a měřicí techniky

# Diplomová práce

magisterský navazující studijní obor  
**Kybernetika, automatizace a měření**

**Student:** Bc. Jiří Zikmund

**ID:** 78312

**Ročník:** 2

**Akademický rok:** 2009/2010

## NÁZEV TÉMATU:

**Laboratorní přípravek pro měření otáček**

## POKYNY PRO VYPRACOVÁNÍ:

Seznamte se s problematikou měření otáček, kontaktními i bezkontaktními metodami. Navrhněte a realizujte laboratorní přípravek pro demonstraci základních používaných principů. Laboratorní přípravek by měl demonstrovat funkci především inkrementálních snímačů, resolveru, indukčního snímače, snímače s Hallovou sondou, fotoelektrického snímače a případně i dalších.

Pro potřeby kurzu BMFV vytvořte vzorové laboratorní cvičení s tímto novým přípravkem.

## DOPORUČENÁ LITERATURA:

Dle vlastního literárního průzkumu a doporučení vedoucího práce.

**Termín zadání:** 8.2.2010

**Termín odevzdání:** 24.5.2010

**Vedoucí práce:** doc. Ing. Petr Beneš, Ph.D.

**prof. Ing. Pavel Jura, CSc.**

*Předseda oborové rady*

## UPOZORNĚNÍ:

Autor diplomové práce nesmí při vytváření diplomové práce porušit autorská práva třetích osob, zejména nesmí zasahovat nedovoleným způsobem do cizích autorských práv osobnostních a musí si být plně vědom následků porušení ustanovení § 11 a následujících autorského zákona č. 121/2000 Sb., včetně možných trestněprávních důsledků vyplývajících z ustanovení části druhé, hlavy VI. díl 4 Trestního zákoníku č.40/2009 Sb.

## **Abstrakt česky**

V práci je rozebírána tematika měření otáček a jednotlivé typy snímačů otáček. Je proveden návrh přípravku pro demonstraci principu snímačů. Dále je navrženo zadání úkolů pro kurz BMFV a jsou provedena měření na tomto přípravku.

## **Klíčová slova**

Snímače otáček, laboratorní přípravek, měření, demonstrace principů

## **Abstrakt anglicky**

This thesis deals with speed measuring and speed measurement sensors. It's designed equipment for the demonstration of the sensors principle. In the next part it's designed the assignment for BMFV lesson and it's made the measuring on this equipment.

## **Klíčová slova**

Speed sensors, laboratory equipment, measuring, principle demonstration

## **Bibliografická citace**

ZIKMUND, Jiří. *Laboratorní přípravek pro měření otáček*. Brno: Vysoké učení technické v Brně. Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií. Ústav automatizace a měřicí techniky, 2010. 51s., 7s příloh. Vedoucí diplomové práce doc. Ing. Petr Beneš Ph.D.

## Prohlášení

„Prohlašuji, že svou diplomovou práci na téma Laboratorní přípravek pro měření otáček jsem vypracoval samostatně pod vedením vedoucího diplomové práce a s použitím odborné literatury a dalších informačních zdrojů, které jsou všechny citovány v práci a uvedeny v seznamu literatury na konci práce.

Jako autor uvedené diplomové práce dále prohlašuji, že v souvislosti s vytvořením této diplomové práce jsem neporušil autorská práva třetích osob, zejména jsem nezasáhl nedovoleným způsobem do cizích autorských práv osobnostních a jsem si plně vědom následků porušení ustanovení § 11 a následujících autorského zákona č. 121/2000 Sb., včetně možných trestněprávních důsledků vyplývajících z ustanovení § 152 trestního zákona č. 140/1961 Sb.“

V Brně dne: **24. května 2010**

.....  
podpis autora

## Poděkování

Děkuji vedoucímu diplomové práce doc. Ing. Petrovi Benešovi, Ph.D. za účinnou metodickou, pedagogickou a odbornou pomoc a další cenné rady při zpracování mé diplomové práce.

V Brně dne: **24. května 2010**

.....  
podpis autora

## OBSAH

<b>1. ÚVOD .....</b>	<b>8</b>
<b>2. VYPRACOVÁNÍ.....</b>	<b>9</b>
2.1 Způsoby měření otáček .....	9
2.2 Snímače otáček .....	10
2.2.1 Resolver .....	11
2.2.2 Inkrementální snímač .....	12
2.2.3 Indukční snímač.....	12
2.2.4 Fotoelektrický snímač.....	13
2.2.5 Stroboskopické otáčkoměry .....	14
2.2.6 Magnetický snímač úhlu natočení .....	14
2.3 Konstrukce přípravku.....	15
2.3.1 Volba vhodné konstrukce .....	15
2.3.2 Volba motoru.....	16
2.3.3 Použité nastavení měniče.....	19
2.3.4 Použité snímače .....	21
2.4 Zadání úkolů pro předmět BMFV.....	23
2.4.1 Doporučený postup měření.....	23
2.4.2 Použité měřicí přístroje a pomůcky .....	24
2.5 Provedená měření.....	24
2.5.1 Magnetický rotační enkodér AS5040 .....	24
2.5.2 Měření na magnetickém rotačním enkodéru .....	31
2.5.3 Měření s indukčním snímačem.....	35
2.5.4 Měření na resolveru .....	39
2.5.5 Měření s inkrementálním snímačem.....	42
2.5.6 Kontaktní měření na PC ventilátoru .....	46
<b>3. ZÁVĚR.....</b>	<b>48</b>
<b>4. LITERATURA .....</b>	<b>49</b>

## SEZNAM OBRÁZKŮ

Obrázek 1 Resolver [4] .....	12
Obrázek 2 Indukční snímač [5] .....	13
Obrázek 3 SW pro ovládání měniče .....	19
Obrázek 4 Rozměrové podklady pro určení nerovnoměrnosti chodu [10] .....	22
Obrázek 5 Snímač AS5040 [6] .....	25
Obrázek 6 Blokové schéma AS5040 [6] .....	26
Obrázek 7 Dva režimy výstupu inkrementálního snímače [6] .....	26
Obrázek 8 Signály U, V a W pro EC motory [6] .....	27
Obrázek 9 PWM výstup snímače [6] .....	27
Obrázek 10 Měření $T_{on}$ pro $0^\circ$ .....	33
Obrázek 11 Měření $T_{on}+T_{off}$ pro $0^\circ$ .....	33
Obrázek 12 Měření $T_{on}$ pro $240^\circ$ .....	34
Obrázek 13 Měření $T_{on}$ pro $359^\circ$ .....	34
Obrázek 14 Přípravek s indukčním snímačem a clonami .....	35
Obrázek 15 Průběh pro clonu 1, oba směry otáčení .....	36
Obrázek 16 Průběh pro clonu 2, otáčení vlevo .....	37
Obrázek 17 Průběh pro clonu 2, otáčení vpravo .....	37
Obrázek 18 Průběh pro clonu 3, oba směry otáčení .....	38
Obrázek 19 Průběh pro clonu 4, otáčení vlevo .....	38
Obrázek 20 Průběh pro clonu 4, otáčení vpravo .....	39
Obrázek 21 Přípravek s resolverem .....	40
Obrázek 22 Vstupní (1) a výstupní (2,3) signály při otáčení resolveru .....	41
Obrázek 23 Vstupní (1) a výstupní (2,3) signály při otáčení druhým směrem .....	41
Obrázek 24 Určování $U_{sin}$ a $U_{cos}$ [11] .....	42
Obrázek 25 Přípravek s inkrementálním snímačem .....	43
Obrázek 26 Označení vybraných oblastí kurzory .....	44
Obrázek 27 Určení $t_{max}$ pro úhel zalomení $45^\circ$ .....	45
Obrázek 28 Určení $t_{min}$ pro úhel zalomení $45^\circ$ .....	45
Obrázek 29 Snímač otáček Lutron DT2236 .....	46

## SEZNAM TABULEK

Tabulka 1 Přehled magnetických rotačních enkodérů .....	14
Tabulka 2 Závislost nerovnoměrnosti chodu kardanu na úhlu vychýlení.....	23
Tabulka 3 Měření na AS5040 .....	32
Tabulka 4 Nerovnoměrnost chodu kardanu .....	43
Tabulka 5 Měření na modulárním přípravku .....	47

## 1. ÚVOD

V práci je rozebírána tematika měření otáček a jednotlivé typy snímačů otáček. Je proveden výčet různých snímačů otáček. Dále jsou vybrány snímače, na kterých by se mělo provádět měření a tím i demonstrace jejich funkce. Tyto snímače jsou v textu podrobněji popsány. Následuje diskuze vhodné koncepce přípravku. Je vybrán motor a řídicí jednotka s možností regulace i velmi malých otáček motoru, jsou zmíněny možnosti použití a nastavení v tomto konkrétním případě. Následuje stručný popis jednotlivých částí přípravku a měření, která by měla být realizována. Dále jsou popsána provedená měření.

První je měření na magnetickém rotačním enkodéru, kde jsou ověřovány parametry PWM výstupu. Následuje měření s indukčním snímačem, kde je zjišťováno, jaký vliv má tvar zubů clony na výstupní signál. Dále je provedeno měření na resolveru a způsob, jak z naměřených průběhů odvodit úhel natočení. Je provedeno měření s inkrementálním snímačem, kdy je určován vliv úhlu zalomení kardanova kloubu na nelinearitu otáček. Posledním měřením je kontaktní měření otáček motoru s cílem demonstrovat pokles otáček způsobený zvýšeným zatížením motoru kontaktním snímačem.



## 2. VYPRACOVÁNÍ

Rotační snímače otáček jsou používány v širokém rozpětí aplikací a jsou známy pod mnoha různými názvy: rychloměry, otáčkoměry, RPM měřidla, atd. Existují rozdílné principy měření:

- Rotační enkodéry poskytující absolutní úhel
- Inkrementální rotační enkodéry poskytující úhlovou rychlost

Základní technologie takových senzorů je založena na vodivých drahách, optických odrazech či změnách magnetického pole. Poslední dva zmíněné typy jsou dnes nejběžnější. Poslední zmíněný typ je nejvíce užíván v těžkých podmínkách jako např. v automobilovém průmyslu. Princip takovýchto snímačů otáček je založen na ozubeném kole, které je pevně spojeno s hřídelí motoru. Magnet umístěný na jedné straně kola způsobuje změny magnetického pole, které mohou být snímány např. halovou sondou umístěnou na straně druhé. Změna magnetického pole je převáděna na obdélníkový signál, jehož hrany odpovídají hranám ozubeného kola. Čas mezi dvěma či více hranami je zaznamenán a převeden na úhlovou rychlost. [1]

### 2.1 ZPŮSOBY MĚŘENÍ OTÁČEK

V zásadě je možné dotykové měření otáček nebo bezdotykové měření otáček. Pro první metodu, tedy kontaktní měření otáček jsou k dispozici ruční přístroje, které buď snímají rotační pohyb například řemenice nebo hřídele v její ose (často s využitím soustružnického vpichu), nebo obvodovou rychlost přiložením snímacího kolečka k obvodu rotující řemenice nebo kola. V tomto druhém případě lze použít takový přístroj nejen pro měření obvodové rychlosti rotujících součástí, ale i pro snímání lineárního pohybu, tedy například posuvu dopravního pásu. Pro snímání pohybu jsou tyto přístroje obvykle vybaveny různými výměnnými nástavci s pryžovým povrchem, uzpůsobenými pro jednotlivá měření.

Bezkontaktní měření otáček naproti tomu nevyžaduje dotyk a snímání pohybu je realizováno světelným paprskem. Je tedy v řadě případů jednodušší a praktičtější, nedá se ale říci, že je vždy výhodnější. Pro některé úlohy nebo podmínky měření je

vhodnější nebo dokonce jediné možné měření otáček kontaktním způsobem, například při měření obvodové rychlosti, při malém průměru hřídele nebo při uspořádání nevhodném pro bezdotykové měření otáček. Obě metody se tedy vzájemně nenahrazují, ale doplňují. Vhodným řešením pro univerzální použití jsou proto kombinované měřiče otáček. [2]

## 2.2 SNÍMAČE OTÁČEK

Pro snímání otáček je využíváno několik základních typů snímačů. Podle výstupního signálu je lze dělit na:

1) Snímače s neelektrickým výstupním signálem čidla:

- a) magnetické např. tachometr v automobilu
- b) stroboskopické

2) Snímače s elektrickým výstupním signálem čidla:

- a) indukční - tachodynamo
  - unipolární dynamo
  - tachoalternátor
  - tachoalternátor s vnějším buzením
- b) impulzní – indukční
  - impedanční
  - magnetické
  - fotoelektrické

3) Speciální čidla [3]

Podle použitého principu odměřování lze snímače dělit na snímače absolutní, inkrementální a cyklicky absolutní.

Absolutní snímače udávají absolutní hodnotu polohy v celém rozsahu odměřování, tj. každé poloze je přiřazena jednoznačně hodnota signálu snímače a naopak. Předností absolutního odměřování je existence informace o skutečné poloze hned po zapnutí zařízení. Absolutní snímače polohy se realizují jako optické s

kódovacími kotoučky nebo jako vícestupňové rotační cyklicky absolutní snímače (např. vzájemně zpřevodované selsyny).

Inkrementální snímače mají vysokou přesnost i rozlišitelnost, avšak informaci o absolutní poloze lze získat pouze tak, že po zapnutí servomechanismus najede na tzv. referenční bod – nulovou polohu v dané ose. Skutečná absolutní poloha je pak dána obsahem čítače odměřovacích impulsů. Z konstrukčního hlediska mohou být inkrementální snímače jak rotační, tak lineární.

Cyklicky absolutní snímače odměřují absolutní polohu pouze v omezené oblasti (např. v rozsahu jedné otáčky motoru). Údaj o absolutní poloze je opět pouze uložen v paměti řídicího systému. Cyklicky absolutní snímače polohy mohou být rovněž jak rotační (selsyny, resolvery), tak lineární (induktosyny). [4]

### 2.2.1 Resolver

Resolver je elektrický stroj, který má jedno vinutí na rotoru a dvě vinutí na statoru. Statorová vinutí jsou vzájemně prostorově pootočena o 90°. Se změnou úhlu natočení rotoru vůči statoru se sinusově mění i jejich vzájemná indukčnost, a tudíž i velikost napětí indukovaných z rotoru do obou statorových vinutí. Vzhledem ke vzájemnému posuvu statorových vinutí jsou vůči sobě posunuta i indukovaná napětí. Je-li do jednoho ze statorových vinutí indukováno napětí s maximální efektivní hodnotou (je-li tedy vzájemná indukčnost mezi tímto vinutím a rotorovým vinutím maximální), je indukované napětí ve druhém statorovém vinutí nulové díky nulové vzájemné indukčnosti mezi tímto vinutím a rotorovým vinutím.

Přenos signálu na pohybující se rotor je proveden pomocí indukční vazby.

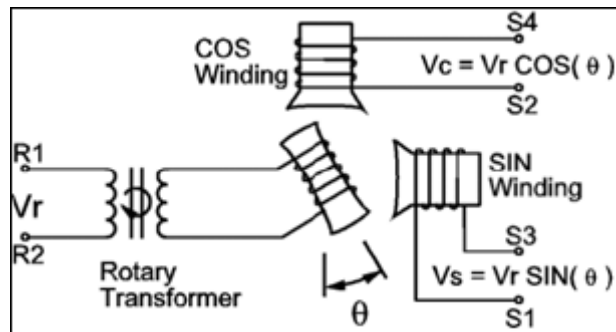
Je-li rotor napájen harmonickým průběhem

$$u(t) = U \sin(\omega t) \quad (1)$$

magnetické pole rotoru indukuje ve statorových vinutích složky napětí s amplitudami závislými na úhlu natočení rotoru  $\Phi$  vůči pevnému statoru.

$$U_1(t) = U \sin(\omega t) \cdot \sin \varphi \quad (2)$$

$$U_2(t) = U \sin(\omega t) \cdot \cos \varphi \quad (3) \quad [4]$$



Obrázek 1 Resolver [4]

### 2.2.2 Inkrementální snímač

Princip těchto snímačů spočívá ve clonění světelného toku mezi zdrojem světla a fotocitlivými prvky. Pro zjištění informace o rychlosti otáčení stačí zjistit počet impulzů za určitý časový úsek. Pro zjištění směru otáčení je nutno použít rotující kotouč, který má dvě řady otvorů, které jsou vůči sobě posunuty o polovinu šířky otvoru (obvykle kanál A a B). Pro zjištění úhlu natočení má rotující kotouč ještě jeden otvor, který je určen pro generování nulového impulzu (kanál Z, nulový kanál).

### 2.2.3 Indukční snímač

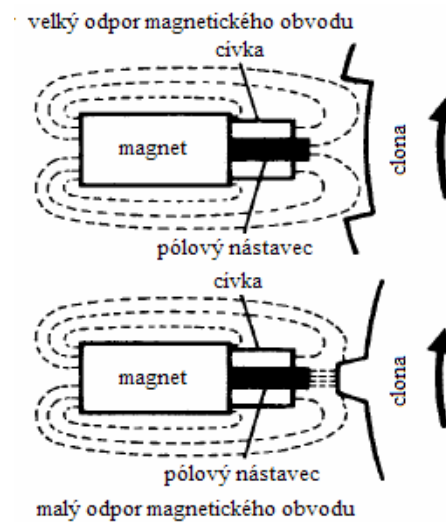
Indukční snímač nebo také pick-up senzor je generátorový aktivní snímač, který využívá indukčního zákona. Jde o cívku s jádrem z permanentního magnetu. Průchodem ozubené clony z magneticky vodivého materiálu před snímačem se v cívce indukují pulsy.

Kmitočet impulzů je přímo úměrný otáčkám. Pro elektromotorické napětí

$$\text{platí} \quad U_E = -\frac{d\Phi}{dt} \cdot N \quad [\text{V, Wb}] \quad (4)$$

Kde  $N$  je počet závitů cívky

$\frac{d\Phi}{dt}$  je změna magnetického toku



Obrázek 2 Indukční snímač [5]

Ze vztahu je patrné, že při kladné změně, tj. nárůstu magnetického toku je výsledné napětí záporné a při poklesu magnetického toku je napětí kladné. Nárůst magnetického toku je závislý na tvaru clony. Tvar clony se tedy projeví i na výstupním napětí snímače.

Indukčního snímače se hojně využívá u systému ABS v automobilech, kdy u každého kola je připevněna kovová clona s obdélníkovými zuby a indukční snímač. Při otáčení kol dochází ke generování impulzů. Výskyt impulzů je monitorován systémem ABS a při ztrátě impulzů je systémem snížen brzdný účinek na kolo u něžž došlo ke ztrátě impulzů.

#### 2.2.4 Fotoelektrický snímač

Fotoelektrické snímače vyhodnocují otáčení objektů, které odráží nebo přerušují světelný paprsek. Podle toho rozlišujeme reflexní a jednocestnou závoru.

Vysílané světlo je modulováno, což zamezuje ovlivňování jinými světelnými zdroji. Přijímač vyhodnocuje změnu množství dopadajícího světla a podle toho se mění stav výstupního obvodu.

### 2.2.5 Stroboskopické otáčkoměry

Jsou bezkontaktní přístroje, které porovnávají měřené otáčky hřídele s jiným periodicky opakovaným jevem, jelikož frekvenci známe. K měření je využito tzv. stroboskopického jevu, tj. schopnosti oka vnímat rychle po sobě následující obrazové vjemy jako ucelený obraz. Obrazy musí po sobě následovat s frekvencí nejméně dvanáct obrázků za sekundu.

### 2.2.6 Magnetický snímač úhlu natočení

Programovatelné magnetické rotační enkodéry se vyrábějí jako obvody s různým rozlišením a možností volby typu výstupu (viz tabulka 1). Tyto enkodéry jsou dodávány v různých typech SMD pouzder.

**Tabulka 1 Přehled magnetických rotačních enkodérů**

označení	rozlišení	výstup	pouzdro
AS5030	8bitů	absolutní sériový SSI, PWM	TSSOP-16
AS5035	8bitů	inkrementální	SSOP-16
AS5040	10bitů	absolutní sériový SSI, PWM, inkrementální, BLDC komutace	SSOP-16
AS5043	10bitů	analogový, absolutní sériový SSI	SSOP-16
AS5045	12bitů	absolutní sériový SSI, PWM	SSOP-16
AS5046	12bitů	absolutní sériový I2C, analogový	SSOP-16
AS5055	12bitů	SPI rozhraní	QFN-16
AS5115	sin&cos	analogový	SSOP-16
AS5130	8bitů	absolutní sériový SSI, PWM	SSOP-16
AS5134	8,5bitů	absolutní sériový SSI, PWM, inkrementální, BLDC komutace	SSOP-16
AS5140H	10bitů	absolutní sériový SSI, PWM, inkrementální, BLDC komutace	SSOP-16
AS5145	12bitů	SSI, PWM, inkrementální A/B/index	SSOP-16
AS5163	12bitů	PWM, analogový	TSSOP-14
AS5165	14bitů	J2716	TSSOP-14
AS5215	sin&cos	analogový	QFN-32
AS5245	12bitů	SSI, PWM, programovatelný inkrementální	QFN-32LD

Další text je věnován monolitickému magnetickému rotačnímu enkodéru s označením AS5040, který snímá nejen úhel natočení magnetického pole, ale i změnu jeho intenzity, která naznačuje změnu v poloze magnetu oproti pouzdru obvodu. Tato změna polohy je pro měření nežádoucí a je obvodem indikována jako chybový stav. Rotační enkodéry jsou používány v nejrůznějších aplikacích, kde je třeba snímat úhel

natočení – v robotice, v servech, ve spotřební elektronice a v mnoha dalších produktech. Tyto enkodéry jsou nejčastěji řešeny na mechanickém principu nebo na principu optickém.

Obvod AS5040 kombinuje na jednom čipu integrované Hallovy sondy, analogové rozhraní a digitální zpracování signálu. Poskytuje inkrementální výstupní signály a absolutní úhlovou pozici magnetu, který je umístěn nad nebo pod čipem. Zařízení může být konfigurováno podle uživatelských požadavků, a to naprogramováním vnitřních OTP registrů.

### 2.3 KONSTRUKCE PŘÍPRAVKU

Pro vlastní přípravek bylo uvažováno několik možných konstrukcí. Jelikož má být demonstrován princip několika snímačů, bylo uvažováno následující:

- bude sestaven jeden přípravek s motorem, kterým budou poháněny všechny snímače najednou
- bude sestaveno více přípravků, na každém bude motor a některý ze snímačů
- bude sestaven jeden přípravek s motorem a záměnnými snímači

Jako nejlepší z uvažovaných možností byl zvolen modulární přípravek, kdy je k jednomu motoru možno připojovat různé snímače. V dalším textu budou shrnuty výhody a nevýhody jednotlivých konstrukcí.

#### 2.3.1 Volba vhodné konstrukce

##### *2.3.1.1 Jeden přípravek se všemi snímači najednou*

V tomto případě by se jednalo o konstrukci, na které by byl upevněn motor, a proti motoru by byly v řadě vedle sebe umístěny jednotlivé snímače, které by byly s motorem spojeny pomocí ozubených kol, případně jiným způsobem. Z uvedených možností je tato nejméně náročná na místo, protože se vše realizuje pouze na jedné základně. Značnou nevýhodou je však provedení mechanického propojení všech

snímačů s motorem. Další nevýhodou je zbytečné točení všemi snímači i ve chvílích, kdy s nimi není pracováno.

### ***2.3.1.2 Více samostatných přípravků***

Zde by se jednalo o několik samostatných přípravků pro demonstraci snímačů. Tato konstrukce má nevýhody ve velkém počtu potřebných motorů, referenčních snímačů a ve velikosti prostoru, který každý přípravek zabere. Výhodou je možnost různých velikostí jednotlivých základů a snazší realizace přípravků.

### ***2.3.1.3 Jeden přípravek s výměnnými snímači***

V tomto případě jde o modulární přípravek. Přípravek se skládá ze dvou částí, na jedné části je umístěn motor. Na druhé části, kterou lze jednoduše připojit k části první, je umístěn snímač. Propojení motoru a snímače je realizováno pomocí rozebíratelné spojky. Základna s motorem je pouze jedna, zatímco základna se snímači je více a lze je dle potřeby zaměňovat. Výhodou této konstrukce je potřeba pouze jednoho motoru a jednoho referenčního snímače. Nevýhodou je potřeba jedné univerzální velikosti všech základů pro snímače.

## **2.3.2 Volba motoru**

Pro přípravek bylo třeba zvolit vhodný motor, u kterého lze jednoduše měnit otáčky v širokém rozsahu. Jako vhodné motory byly doporučeny motory firmy TGdrives, ke kterým lze zakoupit měnič pro regulaci od jednotek do tisíců otáček. Jde o střídavé synchronní motory opatřené snímačem polohy rotoru, jejichž statorové třífázové vinutí je napájeno proměnným kmitočtem a napětím z měniče kmitočtu.

### ***2.3.2.1 Motor***

Střídavé synchronní servomotory řady TG pro napětí 24VDC mají ve statoru rozložené trojfázové vinutí a permanentní magnety na rotoru. Vinutí je navrženo pro sinusové průběhy proudu a napětí. Tenká vrstva magnetů ze vzácných zemin



neodym/železo/bór je umístěna na povrchu rotorové hřídele, čímž je zaručen malý moment setrvačnosti motoru. Segmentové uspořádání magnetů na rotoru a zešíkmení drážek ve statoru snižuje momentové pulsace.

Motory jsou standardně šestipólové, což je optimum pro vztah mezi úhlovou rychlostí a kmitočtem napájecího napětí.

Střídavé synchronní servomotory řady TGT a TGH pro napětí 24V mají upravené vinutí tak, aby mohly být snáze řízené ze servozsilovačů TGA-24-9/20.

Servomotory TGT pro napětí 24V se vyrábí ve 3 osových výškách (TGT1, TGT2 a TGT3) a segmentové servomotory TGH rovněž ve 3 osových výškách TGH0, TGH2 a TGH3. [8]

Servomotory jsou vybaveny zpětnou vazbou polohy rotoru – resolverem.

Kabelové provedení silového přívodu a zpětné vazby umožňuje kvalitní odrušení při dodržení minimálních rozměrů.

Segmentové synchronní motory jsou vhodné pro aplikace vyžadující velkou rovnoměrnost chodu při nízkých otáčkách a při požadavku na co nejmenší rozměry motoru.

Pro vlastní přípravku byl vybrán motor TGH00-0009. Jmenovité parametry tohoto motoru:

- Moment 0,09 Nm
- Otáčky 3000 min<sup>-1</sup>
- Výkon 29 W
- Proud 3,2 A

### **2.3.2.2 Měnič**

Měniče (digitální servozsilovače) TGA-24-9/20 jsou určené k řízení střídavých synchronních servomotorů do výkonu 150 W. Napájecí napětí 24 VDC umožňuje instalovat tyto servozsilovače také do aplikací, kde je problém s přívodem síťového napětí 230/400V např. u mobilních zařízení a nebo do prostředí vyžadující bezpečné napětí. Výkonný procesor zajišťuje nejen velmi kvalitní řízení servomotorů a tím i vysokou přesnost a dynamiku pohonu, ale současně i řadu

uživatelských funkcí umožňujících univerzální využití servoměniče. Digitální proudová smyčka (měření proudu, vektorové řízení, měření polohy z resolveru) je realizována s frekvencí 16 kHz, rychlostní regulační smyčka se počítá s frekvencí 4 kHz, polohová regulační smyčka s frekvencí 1 kHz.

Servozesilovač TGA může pracovat v těchto operačních režimech:

- momentové řízení
- rychlostní řízení
- absolutní polohování
- relativní polohování
- řízení signály „krok“ a „směr“ (emulace krokového motoru)
- elektronická převodovka
- souvislé řízení po sběrnici CAN-BUS

#### Komunikace

Servozesilovač TGA může komunikovat přes sériovou linku RS 232 a sběrnici CAN BUS. Hardwarově je připraven komunikovat i po sériové lince RS 422/485.

#### Vstupy / výstupy

TGA má implementováno 10 digitálních vstupů, 4 digitální výstupy, 1 analogový vstup (0-5 V nebo 0-10 V), 2 konfigurovatelné čítačové vstupy.

Aktuální hodnotu otáček motoru lze zjišťovat jak softwarově, tak měřením přímo na měniči. Pomocí funkce simulace enkodéru, kterou lze použít v každém režimu, kromě módů "řízení přes enkodér" a "simulace krokového motoru", je totiž měnič schopný emulovat inkrementální výstup 512 inkrementů/ot. Tento signál je vyveden na svorkovnici X2. [9]

#### **2.3.2.3 Nastavování měniče**

Součástí dodávky měniče TGA je SETUP program umožňující nastavování parametrů a monitorování stavů přes PC. Program SETUP pracuje pod operačním systémem Windows a komunikuje s měničem TGA po sériové lince RS232.

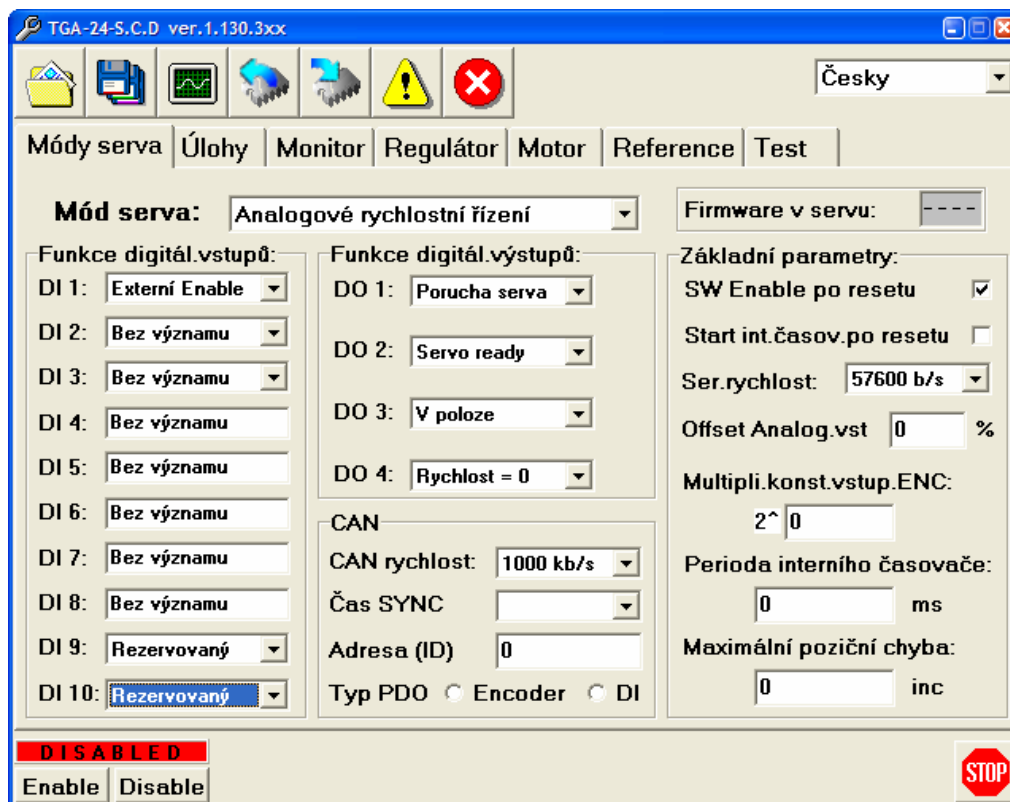
## Řízení

Měnič TGA je možno řídit:

- Analogovým napětím – moment nebo otáčky
- Signály pro krokové motory (krok a směr)
- Digitálními vstupy – spouštění naprogramovaných polohových nebo rychlostních profilů
- Digitální řízení po sériové lince RS 232 (422/485) nebo CAN-BUS (moment, otáčky, polohové profily apod.) [9]

### 2.3.3 Použité nastavení měniče

Měnič je využíván v režimu řízení otáček motoru analogovým napětím (obrázek 8). Na analogový vstup měniče je možno přivádět napětí  $\pm 10V$ , přičemž 0V odpovídá motoru v klidu, při napětí +10V se motor točí maximálními otáčkami vlevo, při -10V se motor točí maximálními otáčkami vpravo. Otáčky motoru lze napětím plynule nastavovat.



Obrázek 3 SW pro ovládání měniče

V menu módy serva je vhodné kromě nastavení módu serva ještě aktivovat funkci digitálního vstupu DI1 a SW enable po resetu. Toto nastavení zajistí, že pro ovládání motoru není třeba mít měnič připojen k PC, ale stačí přivést napětí 24V na digitální vstup DI1 pro aktivaci motoru a napětí v rozmezí  $\pm 10V$  na analogový vstup pro nastavení otáček motoru.

Po nastavení módu serva (viz obrázek 8) je třeba nastavit úlohy které má motor vykonávat. V tomto případě stačí aktivovat jednu úlohu a u ní nastavit analogové řízení, rychlost 3000 ot/min. Doba akcelerace a brzdění by neměla být příliš malá, aby nedocházelo k nadměrnému zatěžování motoru. V případě, že je nastavena pouze jedna úloha není nutné posílat na digitální vstup signál, který by úlohu aktivoval, stačí používat vstup DI1 pro aktivaci a deaktivaci motoru.

Pro správnou funkci měniče je třeba vhodně nastavit regulační smyčku. Pro nastavení parametrů regulace jsou v softwaru předdefinované některé motory řady TGT. Při jejich použití se všechny potřebné parametry automaticky přednastaví. Motor použitý na přípravku však není předdefinován (motor je z řady TGH). Parametry motoru a regulační smyčky je tedy třeba nastavit ručně. Nastavené parametry motoru jsou:

Jmenovitý proud 3,2 A

Maximální proud 5,6 A

Maximální rychlost 3000 ot/min

Počet pólů 6

Fáze resolveru 2

Počet pólů resolveru 2

Po nastavení a uložení parametrů motoru se automaticky doplní nastavení regulačních smyček. Toto nastavení je však jen jakýsi univerzální výpočet, který ne vždy dosáhne uspokojivých výsledků. Při testování kvality regulace bylo zjištěno, že s tímto nastavením nelze měnič provozovat. Motor se s původním nastavením choval nestabilně, prudce kmítal a dosahoval tak velkých proudů, až překonal nastavený maximální proud. Měnič v takovém případě odpojí výstupní obvod od motoru a hlásí chybu, takže nemůže dojít k jeho poškození. Postupným nastavováním a

dolaďováním parametrů pro jednotlivé přípravky bylo nalezeno následující nastavení regulačních smyček:

Na nastavení proudové „d“ smyčky v tomto režimu nezáleží

Pro proudovou „q“ smyčku vyhovují parametry  $K_p=7$ ,  $K_i=50$

Pro rychlostní smyčku  $K_p=15$ ,  $K_i=5$

Pro polohovou smyčku  $K_p=1$

Ostatní parametry mohou zůstat tak, jak byly nastaveny po vyplnění parametrů motoru. Nastavené parametry je třeba uložit.

Nastavení regulačních smyček je možné dolaďovat i za chodu motoru. Je však třeba postupovat s rozvahou a vyhnout se nestabilním stavům motoru, kdy dochází k jeho nadměrnému zahřívání motoru.

#### **2.3.4 Použité snímače**

Pro demonstraci funkce snímačů byl vytvořen jeden modul s motorem a měničem. Dále byly vytvořeny tři moduly pro upevnění různých snímačů. Podrobnější dokumentace ke konstrukci je uvedena v příloze.

##### ***2.3.4.1 Modul s resolverem***

Na první základně je umístěn resolver, na kterém se bude zjišťovat závislost statorových napětí na úhlu natočení.

##### ***2.3.4.2 Modul s indukčním snímačem***

Na tomto modulu jsou umístěna čtyři ozubená kola s různými tvary zubů. V minimální vzdálenosti od zubů je umístěn indukční snímač, který lze posouvat mezi jednotlivými koly. Na přípravku bude měřen vliv tvaru zubů na průběh signálu generovaného snímačem a vliv umístění snímače na amplitudu generovaného signálu.

Dále je možno na přípravek umístit clonu pro měření s fotoelektrickými snímači nebo magnet pro měření s magnetickým snímačem úhlu natočení. Na přípravku je možné provádět i měření stroboskopem.

### 2.3.4.3 Modul s inkrementálním snímačem

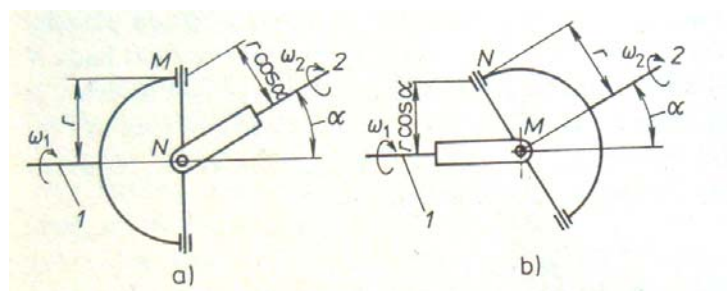
Tento modul obsahuje inkrementální snímač, který je umístěn na pohyblivé konstrukci a je připojen k motoru přes kardanův kloub. Snímač je možno aretovat v různých úhlech vůči motoru. Úhel zalomení kloubu lze plynule nastavovat od  $-45^\circ$  do  $+45^\circ$ . Na přípravku se bude ověřovat vliv úhlu zalomení kardanova kloubu na nelinearitu chodu výstupního hřídele.

Pokud je úhlová rychlost hnacího hřídele stálá, bude úhlová rychlost hnaného hřídele odkloněného o úhel  $\alpha$  v průběhu jedné otáčky kolísat. Úhlová rychlost  $\omega_2$  kolísá při konstantní úhlové rychlosti  $\omega_1$  v průběhu jedné půlotáčky mezi

$$\omega_{2\min} = \omega_1 \cdot \cos \alpha \quad \text{a} \quad \omega_{2\max} = \frac{\omega_1}{\cos \alpha}$$

(viz obrázek 9). Nerovnoměrnost chodu poháněného hřídele je pak

$$\delta = \frac{\omega_{2\max} - \omega_{2\min}}{\omega_1} = \frac{\frac{\omega_1}{\cos \alpha} - \omega_1 \cdot \cos \alpha}{\omega_1} = \operatorname{tg} \alpha \cdot \sin \alpha \quad (5)$$



Obrázek 4 Rozměrové podklady pro určení nerovnoměrnosti chodu [10]

**Tabulka 2 Závislost nerovnoměrnosti chodu kardanu na úhlu vychýlení**

$\alpha[^\circ]$	$\delta[\%]$
10	3
20	12,5
30	29
40	54
45	71

V tabulce 2 je uveden přehled nerovnoměrnosti chodu pro některé úhly. Údaje v tabulce jsou vypočteny podle vztahu (5).

## 2.4 ZADÁNÍ ÚKOLŮ PRO PŘEDMĚT BMFV

- 1) Seznamte se s činností snímačů otáček.
- 2) Změřte závislost výstupních napětí resolveru na úhlu natočení.
- 3) Zjistěte jaký vliv má tvar zubů na výstupní signál indukčního snímače.
- 4) Určete vliv umístění indukčního snímače na amplitudu výstupního signálu
- 5) Změřte vliv úhlu zalomení kardanova kloubu na nelinearitu chodu inkrementálního snímače.

### 2.4.1 Doporučený postup měření

Do modulu s motorem vsuňte modul s resolverem a řádně zajistěte. Na svorky s referenčními otáčkami motoru připojte osciloskop. Na vstupní svorky resolveru připojte generátor sinusového napětí 10V/400Hz. Výstupy resolveru připojte na osciloskop. Naměřené průběhy zaznamenejte a určete závislost výstupního napětí na úhlu natočení resolveru.

Vyměňte modul s resolverem za modul s indukčním snímačem a clonami. Na referenční výstup motoru připojte čítač. Na osciloskopu sledujte vliv tvaru zubů na výstupní signál snímače. Průběhy zakreslete a přiřaďte jim jednotlivé tvary zubů. Proveďte při nízkých otáčkách pro všechny clony. Pro zjištění používaných otáček je

třeba údaj na čítači (pulzy/s) přepočíst na otáčky za minutu. Měnič generuje 512 pulzů na jednu otáčku motoru.

Na stejném modulu změřte amplitudu signálu při různém umístění indukčního snímače oproti cloně. Použijte clonu s obdélníkovými zuby. Snímač posouvejte po 0,5 mm. Do grafu vynesete vliv umístění snímače na amplitudu signálu.

Připojte modul s inkrementálním snímačem a kardanovým kloubem. Na osciloskopu sledujte vliv nastaveného úhlu na signál inkrementálního snímače. Pro úhly 0°, 10°, 20°, 30° a 40° odečtěte minimální a maximální časy trvání impulzu snímače. Z naměřených hodnot určete nelinearitu chodu kardanu. Porovnejte s teoretickými hodnotami.

Při výměně modulů nezapomeňte do spojky vložit plastový mezikus a modul řádně zajistit.

#### **2.4.2 Použité měřicí přístroje a pomůcky**

Osciloskop Tektronix DPO 3014

Funkční generátor HP 33120A

Zdroj MN 40V-10A

Stabilizovaný zdroj TESLA BK126

Stabilizovaný zdroj TESLA BK127

Přípravky s motorem a snímači

Snímač otáček Lutron DT2236

Otočný stolek

### **2.5 PROVEDENÁ MĚŘENÍ**

#### **2.5.1 Magnetický rotační enkodér AS5040**

##### ***2.5.1.1 Základní vlastnosti***

- Bezkontaktní snímání úhlu natočení v rozsahu 360°
- Dva digitální výstupy: PWM a sériové rozhraní



- Tři výstupní módy: Quadrature A/B a Index, Step / Direction a Index nebo třífázový
- Programovatelná přesnost na 10,9,8 nebo 7 bitů
- Uživatelsky programovatelná pozice nuly (indexu)
- Detekce chybových stavů
- Rychlost otáčení až 10.000 ot/m
- Pouzdro SSOP 16 s rozměry 5.3 x 6.2 mm



**Obrázek 5 Snímač AS5040 [6]**

### ***2.5.1.2 Typické aplikace***

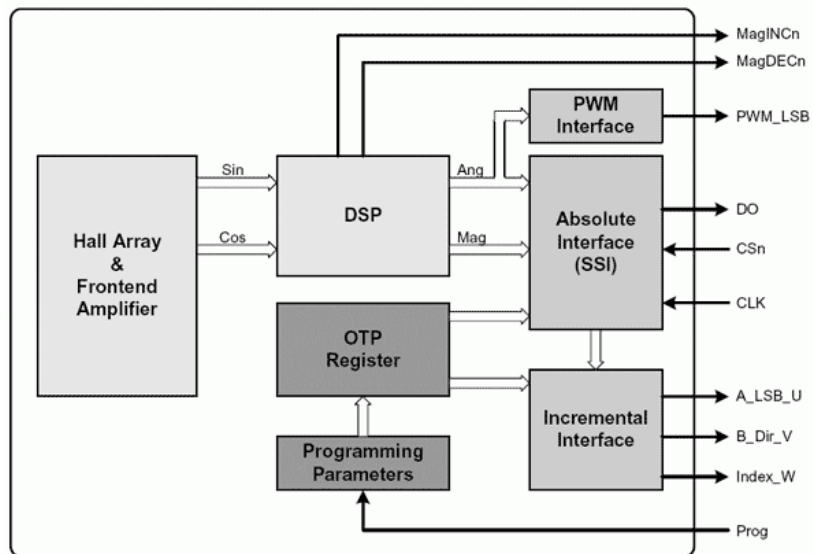
- Bezkontaktní snímání natočení
- Robotika
- Snímání pozice volantu
- Snímání pozice plynového pedálu
- Náhrada optických enkodérů
- Otočné přepínače v přístrojích
- Náhrada potenciometrů

[6]

### ***2.5.1.3 Absolutní informace o úhlu natočení***

AS5040 může poskytovat desetibitový absolutní údaj o úhlu natočení po sériovém rozhraní SSI. V tomto módu posílá 16 bitů, z toho 10 udává absolutní úhel natočení (s rozlišením  $360 / 1024 = 0.35$  stupně), následují tři stavové bity, pak dva bity, udávající zda se magnetické pole nemění, zvětšuje (magnet se přibližuje), zmenšuje (magnet se vzdaluje) nebo zda je mimo meze (např. není přítomno). Zpráva končí paritou.

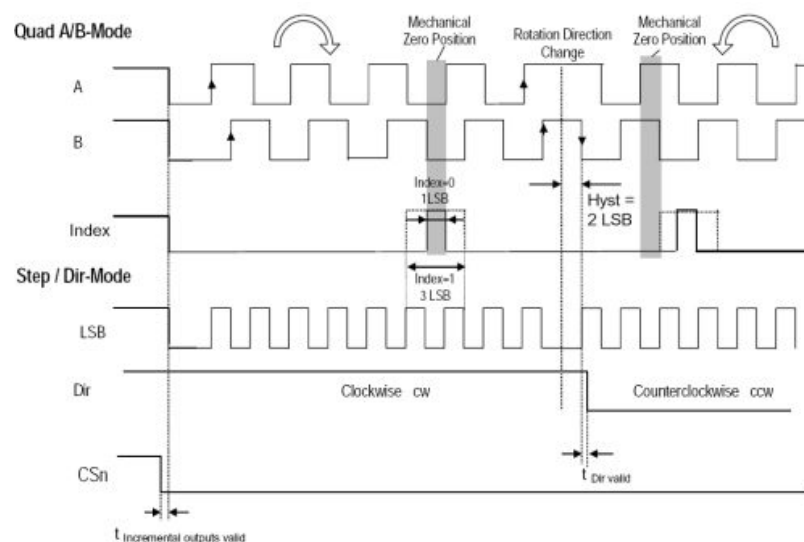
[6]



Obrázek 6 Blokové schéma AS5040 [6]

#### 2.5.1.4 Inkrementální výstup

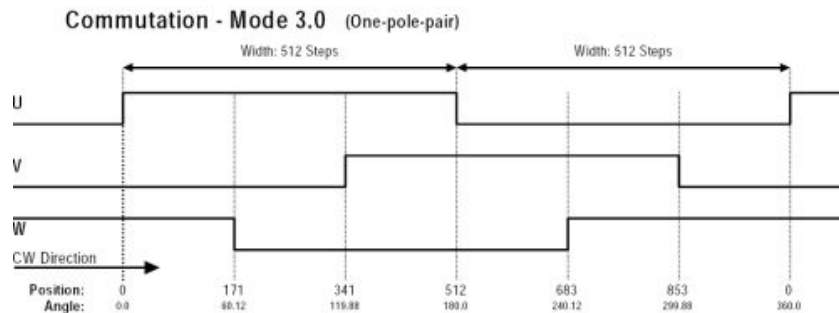
V tomto módu poskytuje AS5040 buď Kvadrurní A/B výstup (dva fázově posunuté signály, jejichž změny oznamují pohyb a fázový posun směr pohybu) nebo Krok / Směr, kdy jeden výstup oznamuje pohyb a druhý směr pohybu. K těmto výstupům se přidává výstup Index, který oznamuje "nulové" natočení magnetického pole.



Obrázek 7 Dva režimy výstupu inkrementálního snímače [6]

### 2.5.1.5 Fázový výstup pro komutované motory

V tomto módu slouží AS5040 jako řídicí prvek pro bezkomutátorové motory a poskytuje tři výstupní signály: U, V a W, které jsou navzájem posunuty buď o  $120^\circ$  nebo o  $30^\circ$  a tím umožňují řídit jak jednopólové, tak i dvoupólové motory. [6]

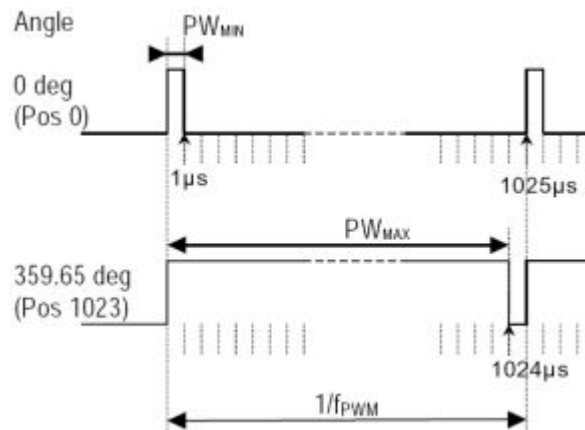


Obrázek 8 Signály U, V a W pro EC motory [6]

### 2.5.1.6 PWM výstup

AS5040 může informaci o natočení magnetického pole poskytovat i formou PWM výstupu, při kterém je úhel natočení definován poměrem mezi dobou trvání jedničkového a dobou trvání nulového impulsu. Frekvence výstupu PWM je zhruba 1 kHz.

PWM výstup lze připojit na integrátor (RC dolní propust) a získat tak analogové hodnoty úhlu natočení (0 – 5 V). Takto upravený výstup se pak využívá ve specifických aplikacích jako náhrada potenciometru.



Obrázek 9 PWM výstup snímače [6]

### 2.5.1.7 Programování

Obvod obsahuje OTP (One-Time Programmable, jednou programovatelné) registry, které mohou být naprogramovány po sériovém rozhraní, a které určují mód, v němž bude obvod pracovat. U každého módu lze ještě volit rozlišení a výchozí polohu.

V základním nastavení je ve všech registrech logická nula. Tyto registry jsou realizovány za pomoci Zennerových diod. Při programování se vyšším napětím prorazí požadované diody a dané registry tím navždy získají hodnotu logické jedničky. Obvod lze sice dále programovat, je však možné pouze přiřadit dalším doposud nepoužitým registrům hodnotu log. 1.

Obvod lze programovat také krátkodobě. Krátkodobé programování se provádí po zapnutí napájecího napětí. S odpojením napájecího napětí je program ztracen a obvod je po zapnutí opět ve výchozím nastavení.

Krátkodobé programování lze používat dvěma způsoby. Prvním z nich je možnost, kdy je po zapnutí obvodu zvolen mód, rozlišení a počáteční natočení. Toto nastavení pak nelze měnit a zůstává zachováno až do odpojení napájení. Při tomto způsobu programování je zasíláno nastavení formou 16 bitů na programovací vstup obvodu. Rozdíl oproti trvalému programování je v použití standardního napájecího napětí a v návratu programovacího vstupu, hodin a výběru čipu na úroveň log. 0 po skončení odesílání programovacích bitů.

Příklad kódu, který je možno pro popsany způsob programování použít:

```
void writeOTP(BYTE* buffer,BYTE num_bits)
{
    BYTE *current_byte;
    BYTE current_bit = 0;
    BYTE temp = 0;
    current_byte = buffer + ((num_bits-1)>>3);//8 ;
    temp = *current_byte;
    if(num_bits % 8){
        temp <<= 8 - (num_bits % 8);
    }
}
```

```
OUT_PROG_IN();
CLEAR_PROG_IN();
//-- Inicializace zápisu OTP
CLEAR_CSN();
wait(500);
CLEAR_CLK();
wait(500);
SET_PROG_OUT();
wait(500);
SET_CSN();
wait(500);
//-- Zaslání OTP dat
for(current_bit = num_bits; current_bit; current_bit--){
    if(temp & 0x80)
        {SET_PROG_OUT();
        wait(600);
        }
    else
        {CLEAR_PROG_OUT();
        wait(600);
        }
    SET_CLK();
    wait(300); // delay
    CLEAR_CLK();
    wait(50);
    temp <<= 1;
    if(((current_bit-1) & 0x07) == 0)
    {
        temp = *(--current_byte);
    }
}
```

```
// ukončení zápisu OTP
CLEAR_PROG_OUT(); // set PROG_OUT=0
wait(600);
CLEAR_CSN(); //set CSN=0
wait(600);
SET_CSN(); //set CSN=1
wait(600);
SET_CLK();
wait(100);
} [7]
```

Druhou možností krátkodobého programování je měnitelné nastavení, kdy může být obvod přenastaven do jiného módu (rozlišení, počátečního natočení) kdykoli je třeba a není nutno předtím obvod vypínat. Programování obvodu tímto způsobem je o něco složitější. Nejprve je třeba vyčíst 32 bitů OTP registru (16b uživatelského nastavení a 16b továrního nastavení), poté je možné změnit část s uživatelským nastavením, ale část s továrním nastavením musí zůstat nezměněna. Takto vzniklých 32 bitů nastavení se zapíše zpět do obvodu. Nastavení je možno kdykoli měnit zasláním patřičně upravených programovacích bitů.

Pro možnost přeprogramování obvodu by bylo ideální implementovat druhý způsob krátkodobého programování do jednočipu, který by měl umístěna na vstupech tři tlačítka a po stisku některého z tlačítek by změnil mód obvodu. Obdobným způsobem by šlo řešit i nastavování rozlišení a počátečního natočení magnetu.

Další možností je pak zakoupení demodesky, kterou nabízí výrobce. Tato demodeska je určena přímo pro programování obvodů s magnetickými rotačními enkodéry a umožňuje některé základní operace. Nevýhodou této desky oproti řešení s jednočipem je nutnost zadávání požadovaného nastavení přes PC.

### 2.5.2 Měření na magnetickém rotačním enkodéru

Bylo provedeno měření s cílem potvrdit vlastnosti obvodu AS5040 udávané výrobcem. Měřením byla kontrolována přesnost PWM výstupu. Jak je vidět na obrázku 7, minimální šířka pulsu je  $1\mu\text{s}$ , což odpovídá úhlu  $0^\circ$ , maximální šířka pulsu je pak  $1024\mu\text{s}$ , což odpovídá úhlu  $359,65^\circ$ . Rozlišovací schopnost PWM výstupu je 10 bitů, což umožňuje rozlišovat změnu úhlu o  $0,35^\circ$ . Přesnost výstupu je však závislá také na použitém magnetu a na přesnosti umístění magnetu proti pouzdru obvodu.

Použitý magnet by měl mít průměr 6 mm, tloušťku minimálně 2,5 mm, magnetické pole v rozsahu 0,75 až 0,45 mT, měl by být umístěn ve vzdálenosti 0,5 až 1,8 mm nad obvodem a střed magnetu musí být ve vzdálenosti maximálně  $\pm 0,235$  mm od středu obvodu.

Pro převod mezi šířkou pulsu a úhlem natočení platí vztah

$$\varphi = \frac{T_{on} - 1}{T_{on} + T_{off}} \cdot 360 \quad (6)$$

Kde  $\varphi$  - úhel natočení magnetu

$T_{on}$  – doba trvání pulsu

$T_{off}$  – doba mezi pulzy

Měření na obvodu bylo provedeno tak, že na otočném stolku byl ve středu umístěn válcový magnet o rozměrech 6 x 2,5 mm. Nad magnetem byl ve vzdálenosti 1,5 mm umístěn obvod AS5040 tak, aby jeho střed byl co nejpřesněji nad středem magnetu a stolku. Měření bylo prováděno pomocí osciloskopu s možností záznamu průběhů. Byl nastaven počáteční úhel, kdy PWM signál má nejmenší možnou šířku pulzů a od tohoto úhlu bylo provedeno měření. Se stolkem a magnetem se otáčelo po patnácti stupních a pomocí kurzorů osciloskopu byly odečítány hodnoty šířky pulzů. Z těchto hodnot byl následně vypočten úhel natočení a porovnán s úhlem nastaveným na stolku.

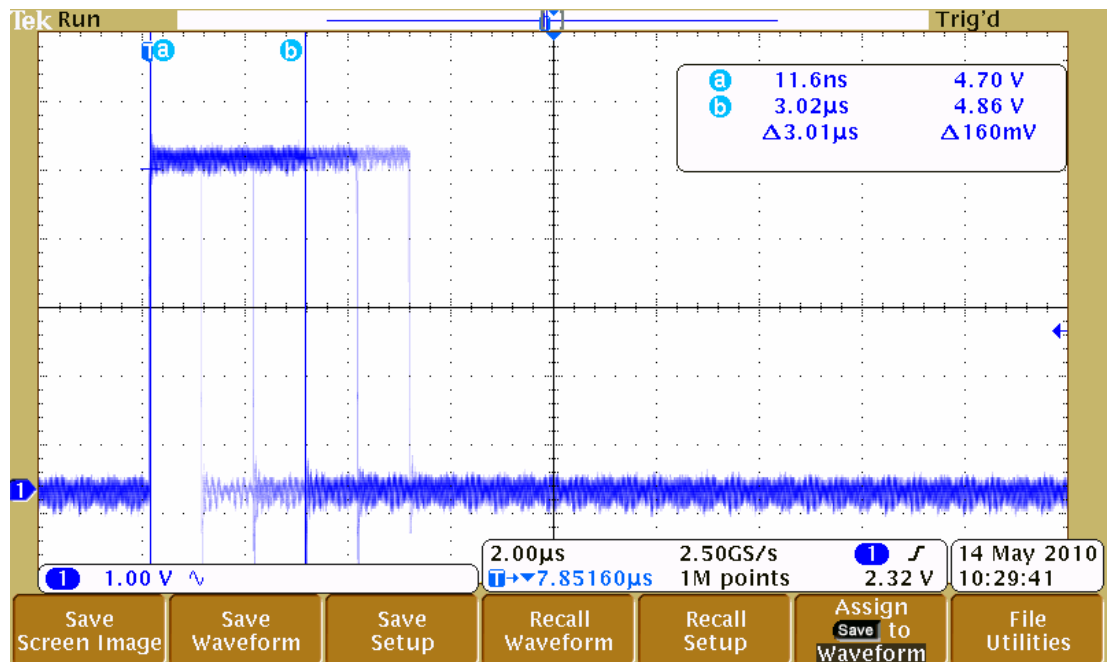
**Tabulka 3 Měření na AS5040**

$\varphi$ [°]	$T_{on}$ [ $\mu$ S]	$T_{on}+T_{off}$ [ $\mu$ S]	$\varphi_{vvp}$ [°]	$\Delta$ [°]	$\delta$ [%]
0	3	1040	0,69	-0,69	-
15	41,7	1040	14,09	0,91	6,47
30	90,5	1040	30,98	-0,98	-3,17
45	130	1040	44,65	0,35	0,78
60	176	1040	60,58	-0,58	-0,95
75	215	1040	74,08	0,92	1,25
90	260	1040	89,65	0,35	0,39
105	303	1040	104,54	0,46	0,44
120	344	1040	118,73	1,27	1,07
135	386	1040	133,27	1,73	1,30
150	431	1040	148,85	1,15	0,78
165	474	1040	163,73	1,27	0,78
180	515	1040	177,92	2,08	1,17
195	559	1040	193,15	1,85	0,96
210	604	1040	208,73	1,27	0,61
225	644	1040	222,58	2,42	1,09
240	688	1040	237,81	2,19	0,92
255	730	1040	252,35	2,65	1,05
270	772	1040	266,88	3,12	1,17
285	818	1040	282,81	2,19	0,78
300	864	1040	298,73	1,27	0,42
315	906	1040	313,27	1,73	0,55
330	948	1040	327,81	2,19	0,67
345	991	1040	342,69	2,31	0,67
359	1030	1040	356,19	2,81	0,79

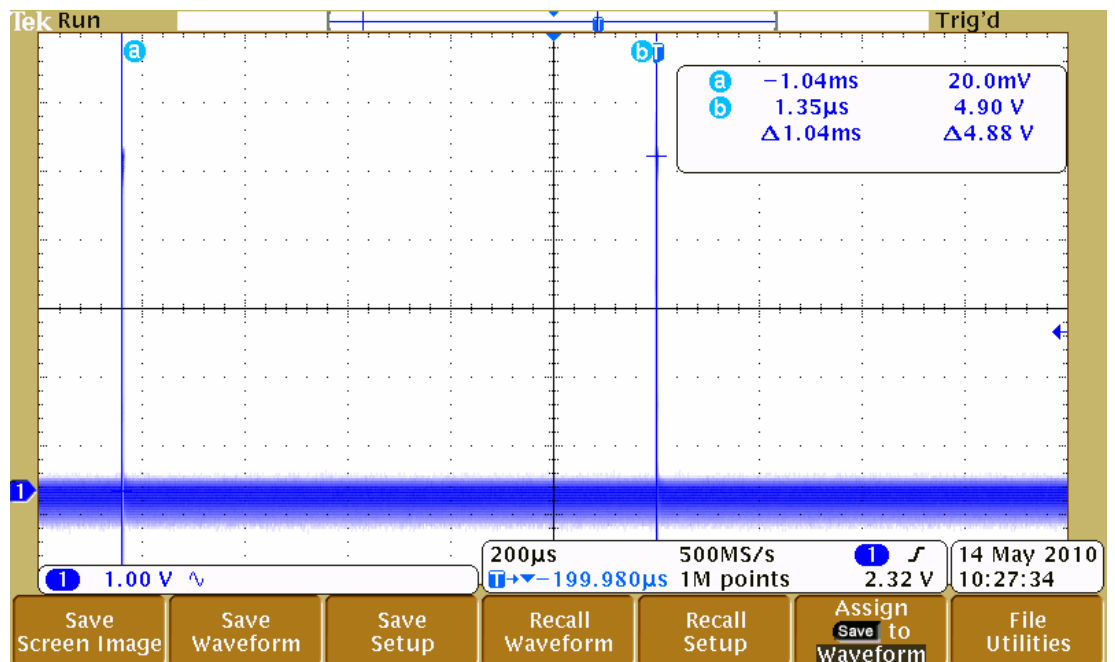
Výpočet dle rovnice (6)

Z tabulky je vidět, že dosažená chyba měření je značně vzdálena chybě vzniklé samotným rozlišením obvodu. Při rozlišení 10 bitů by se chyba měla pohybovat okolo 0,1%. Vzniklá chyba se však většinou pohybuje okolo 1%. To je způsobeno především nepřesným nastavením kurzorů při odečítání jednotlivých časů a také nepřesným usazením magnetu oproti pouzdru snímacího obvodu. K nepřesnostem v odečítání docházelo jak při malých úhlech, kdy nebylo možno zcela jasně rozeznat aktuální hranu pulzu (viz obrázek 10), tak při velkých úhlech (velkých časových úsecích), kdy nebylo možno kurzory dostatečně přesně umístit (viz obrázek 11).

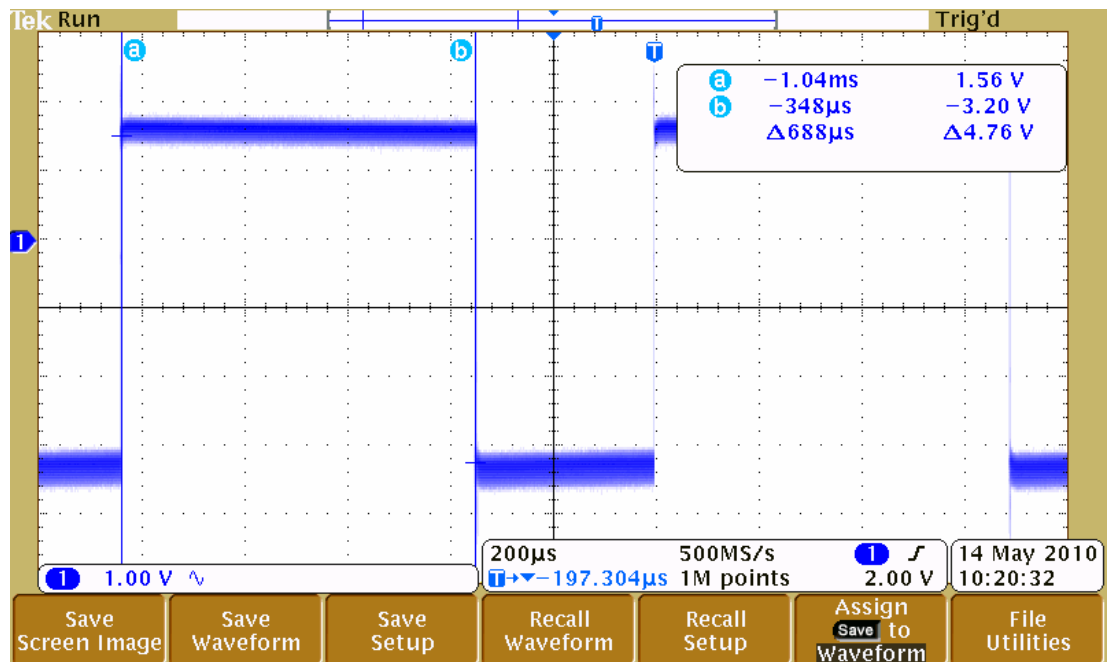




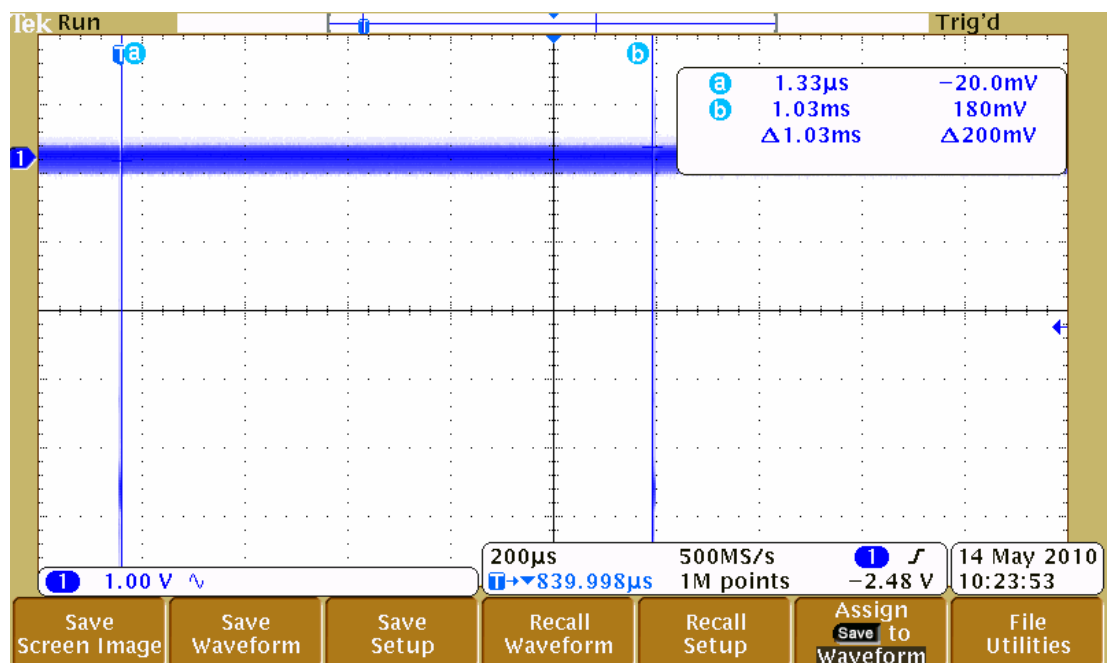
Obrázek 10 Měření  $T_{on}$  pro  $0^\circ$



Obrázek 11 Měření  $T_{on}+T_{off}$  pro  $0^\circ$



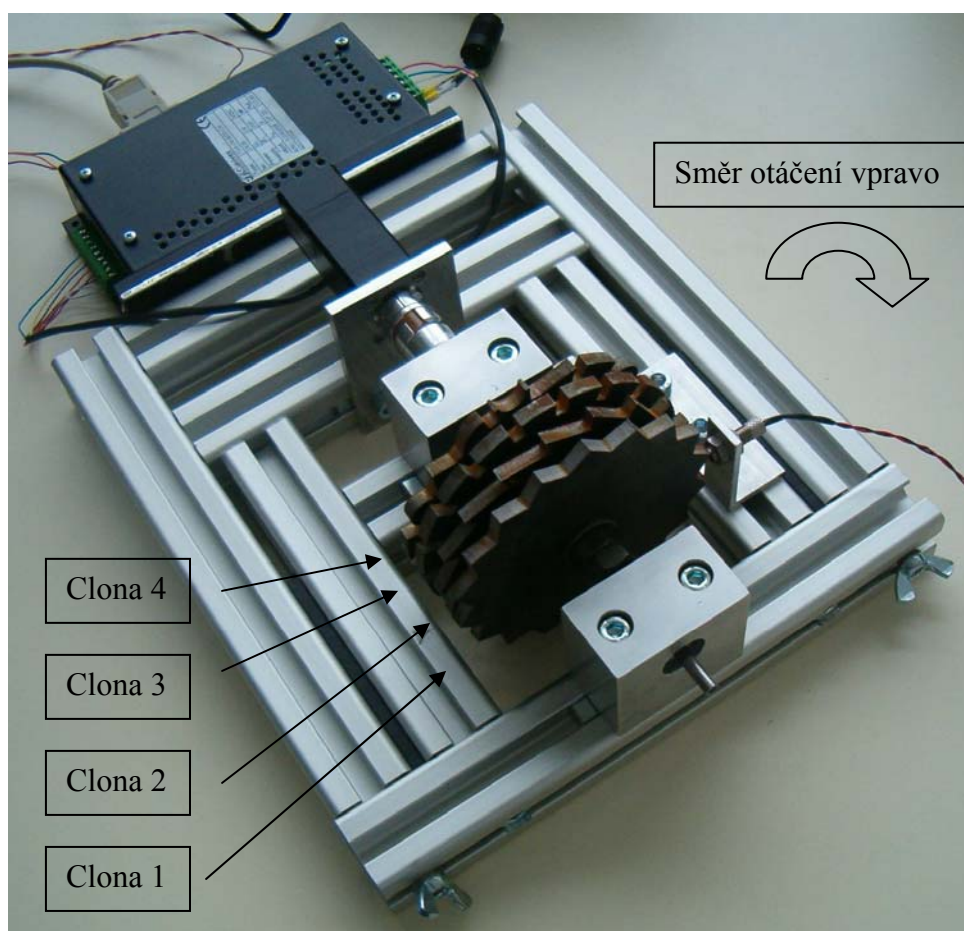
Obrázek 12 Měření  $T_{on}$  pro  $240^\circ$



Obrázek 13 Měření  $T_{on}$  pro  $359^\circ$

### 2.5.3 Měření s indukčním snímačem

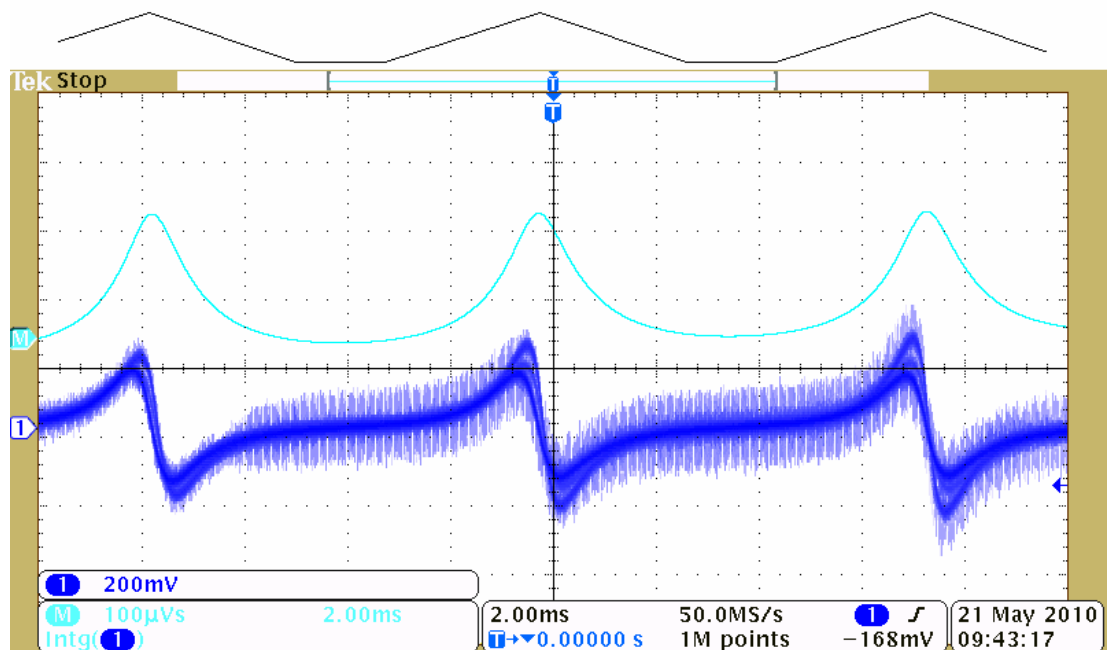
Na zhotoveném přípravku s indukčním snímačem (obrázek 14) byl osciloskopem zjišťován vliv tvaru zubů clony na výstupní signál. Měření bylo provedeno při konstantních otáčkách na všech čtyřech clonách pro oba směry otáčení motoru. Přesný tvar jednotlivých clon je uveden v příloze.



**Obrázek 14 Přípravek s indukčním snímačem a clonami**

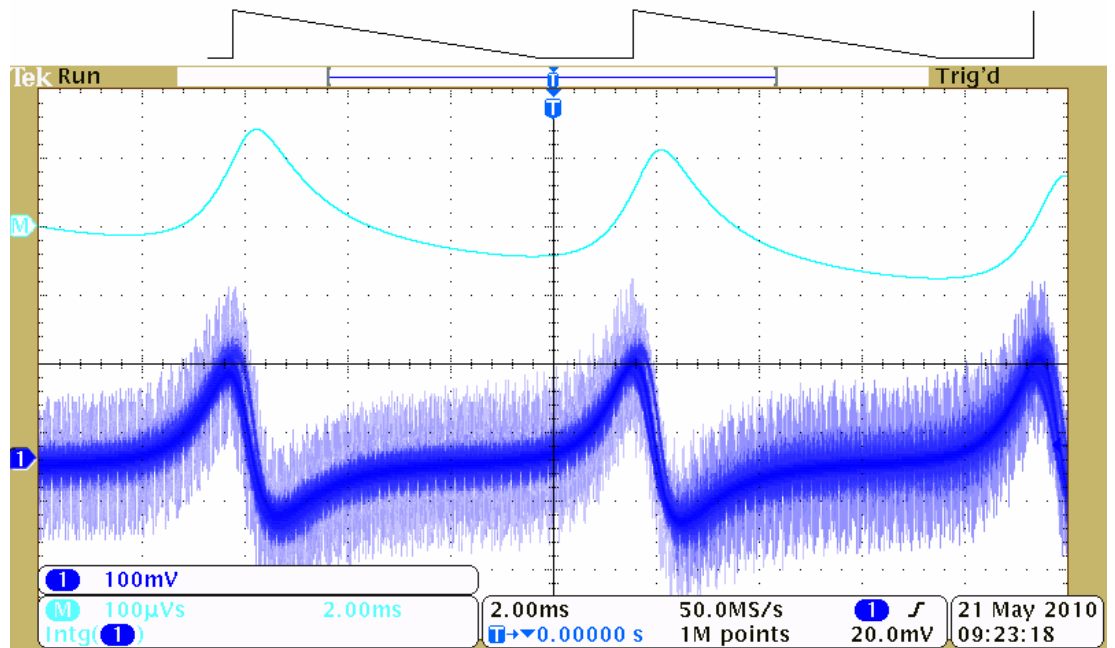
Na obrázcích 15 až 20 jsou zobrazeny zaznamenané průběhy. U clon 1 a 3, jejichž zuby mají náběžnou i sestupnou hranu stejnou (jsou symetrické), nelze rozlišit směr otáčení motoru. Pro oba směry otáčení je generovaný signál stejný. U clon 2 a 4 je možné zjistit směr otáčení přímo z tvaru výstupního signálu.

V kapitole 2.4 je uveden návrh na měření vlivu posunutí snímače na amplitudu výstupního signálu. Pro toto měření je třeba posouvat snímačem podél clony, aniž by se přitom měnila jeho vzdálenost od clony. Vzhledem k tomu, že tuto podmínku nebylo možné v danou chvíli splnit, nebylo toto měření na přípravku provedeno.

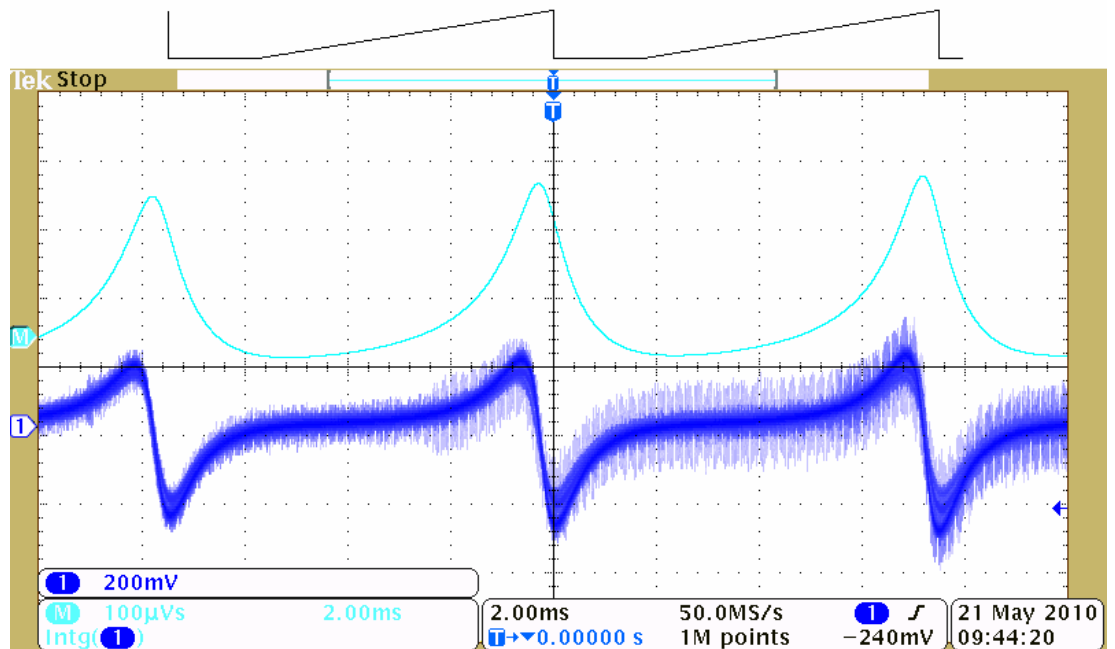


**Obrázek 15 Průběh pro clonu 1, oba směry otáčení**

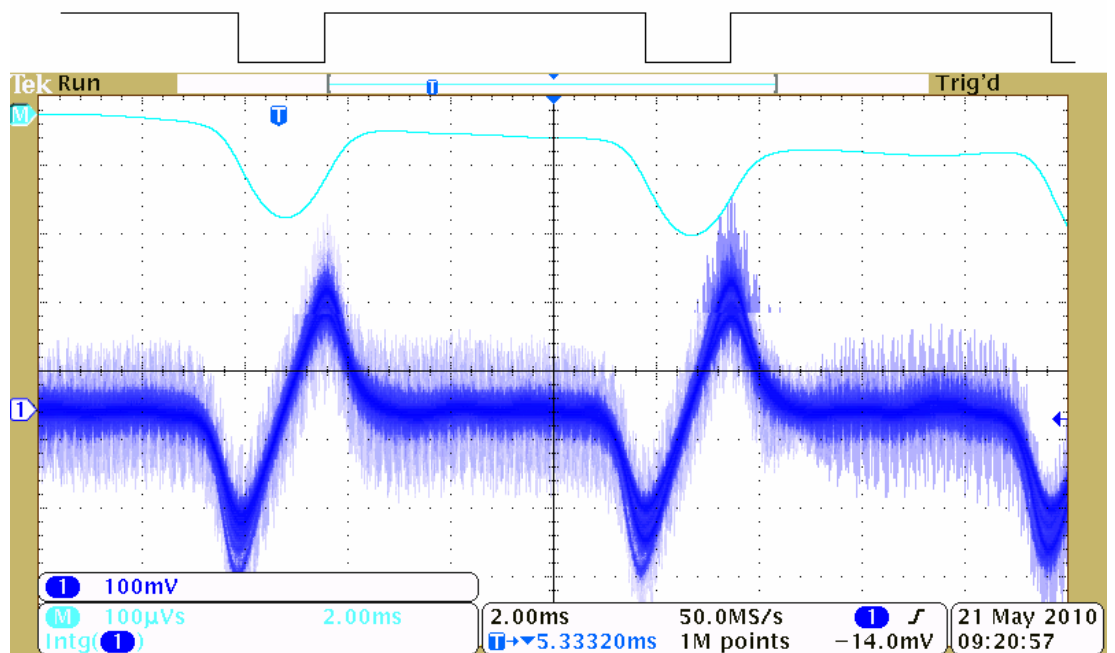
Na obrázcích 15 až 20 je vždy zachycen výstupní signál snímače (označený 1), zintegrováný výstupní signál snímače (označený M) a nad obrázkem jsou v odpovídající poloze zakresleny tvary zubů clony.



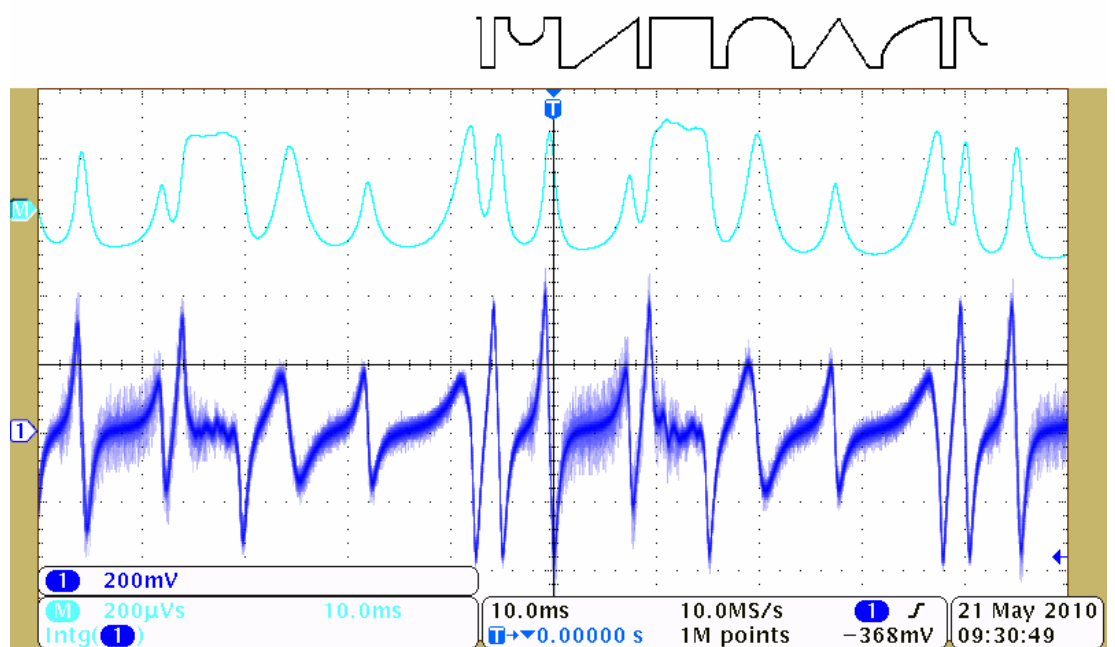
Obrázek 16 Průběh pro clonu 2, otáčení vlevo



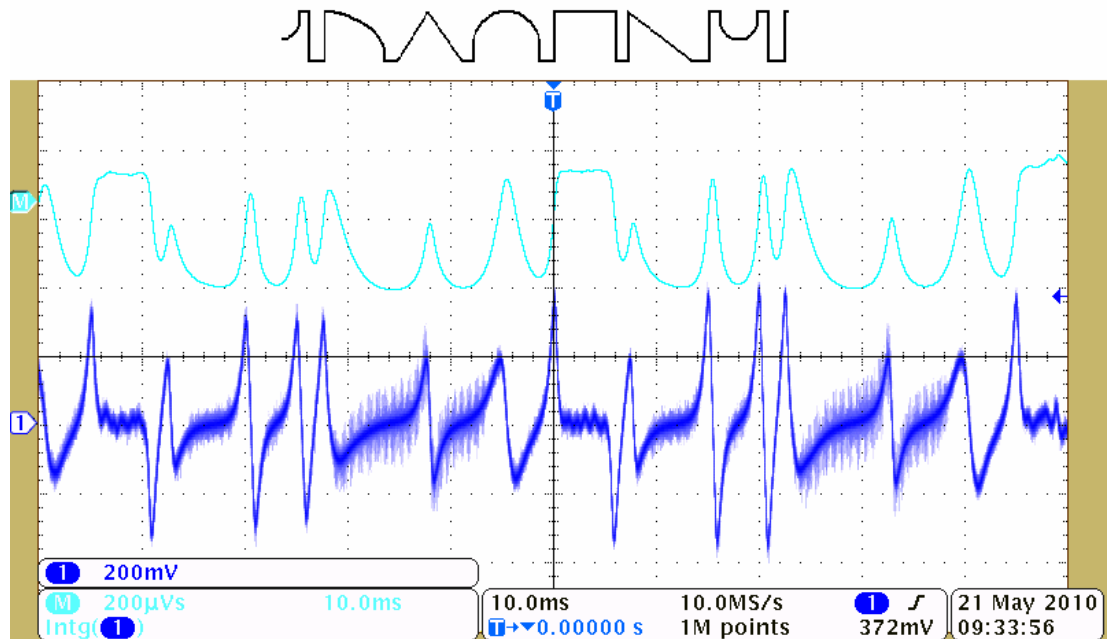
Obrázek 17 Průběh pro clonu 2, otáčení vpravo



Obrázek 18 Průběh pro clonu 3, oba směry otáčení



Obrázek 19 Průběh pro clonu 4, otáčení vlevo

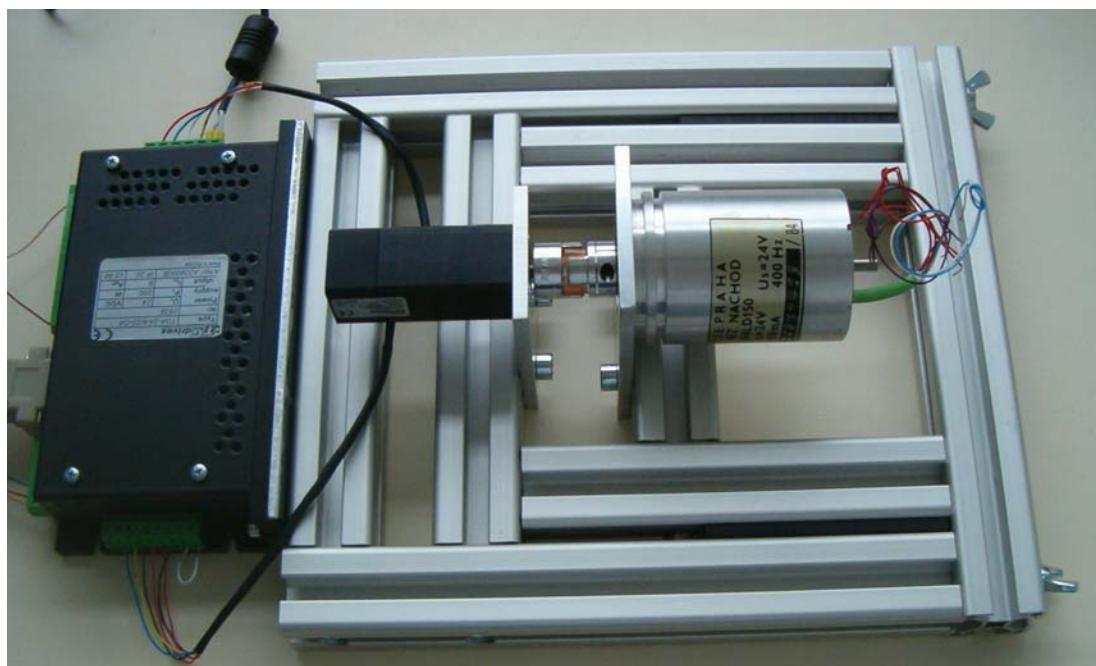


**Obrázek 20 Průběh pro clonu 4, otáčení vpravo**

U průběhů výstupního signálu je pro všechny clony zakresleno, kterému tvaru zubu odpovídají jednotlivé části průběhu. Vychází se ze vzorce (4). Změna magnetického toku závisí na strmosti hran zubů. Čím je strmější hrana zubu, tím je větší změna magnetického toku. Na rychlosti změny magnetického toku pak závisí velikost indukovaného napětí. K největším změnám dochází v okamžiku, kdy je snímač z poloviny nad zubem a z druhé poloviny nad mezerou. Této situaci také odpovídá nejstrmější nárůst nebo pokles indukovaného napětí. V obrázcích je tedy možné velmi dobře rozeznat kolmé hrany jednotlivých zubů. V oblastech, kde nedochází k žádným změnám magnetického toku, je výstupní signál snímače nulový.

#### 2.5.4 Měření na resolveru

Měření na resolveru (obrázek 21) bylo omezeno pouze na zobrazení a zaznamenání průběhů pro oba směry otáčení a následné zhodnocení. Měření bylo provedeno při 2200ot/min.



**Obrázek 21 Přípravek s resolverem**

Resolver byl napájen harmonickým signálem o frekvenci 400Hz a amplitudě 10V. Osciloskopem byly zachyceny průběhy na výstupních cívkách (obrázek 22 a 23). Kurzory na obrázcích vymezují oblast jedné otáčky resolveru. V rozsahu jedné otáčky se po 90° vždy mění fáze na jedné z výstupních cívek. Ze sledu jednotlivých signálů lze určit směr otáčení. Ve vybraných částech na obrázcích je vidět vliv směru otáčení na fázi výstupního signálu 2.

Průběhy v obrázcích 22 a 23 odpovídají vztahům (1) a (2). Z těchto průběhů lze vypočítat úhel natočení resolveru podle vztahu

$$\Phi = \arctan \frac{U_{\sin}}{U_{\cos}} \quad (7)$$

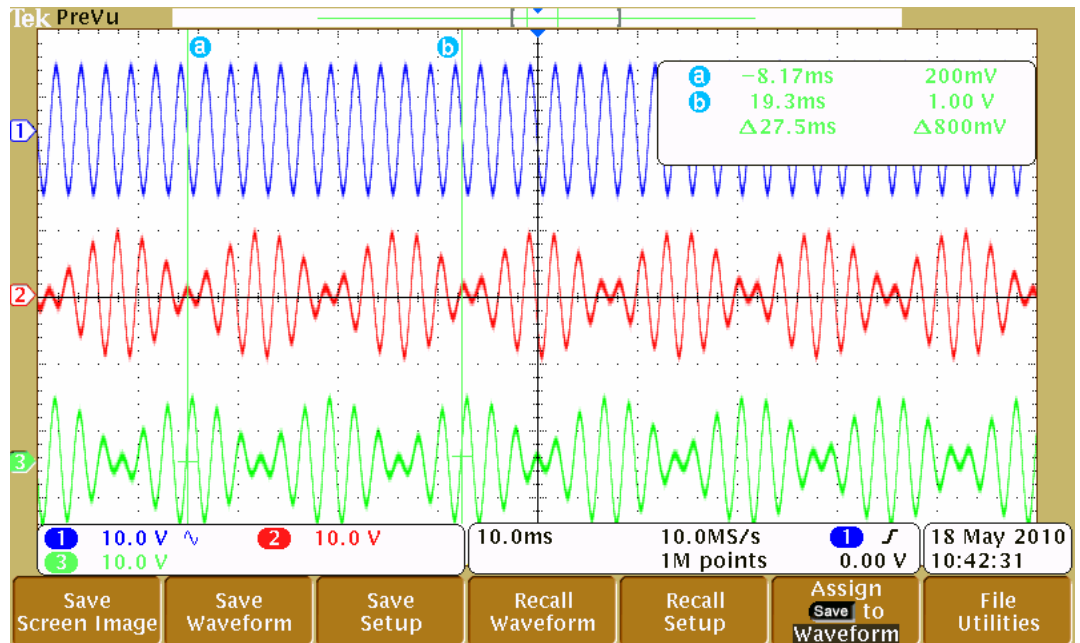
Kde  $\phi$  je úhel natočení

$U_{\sin}$  je hodnota demodulovaného napětí  $U_1$

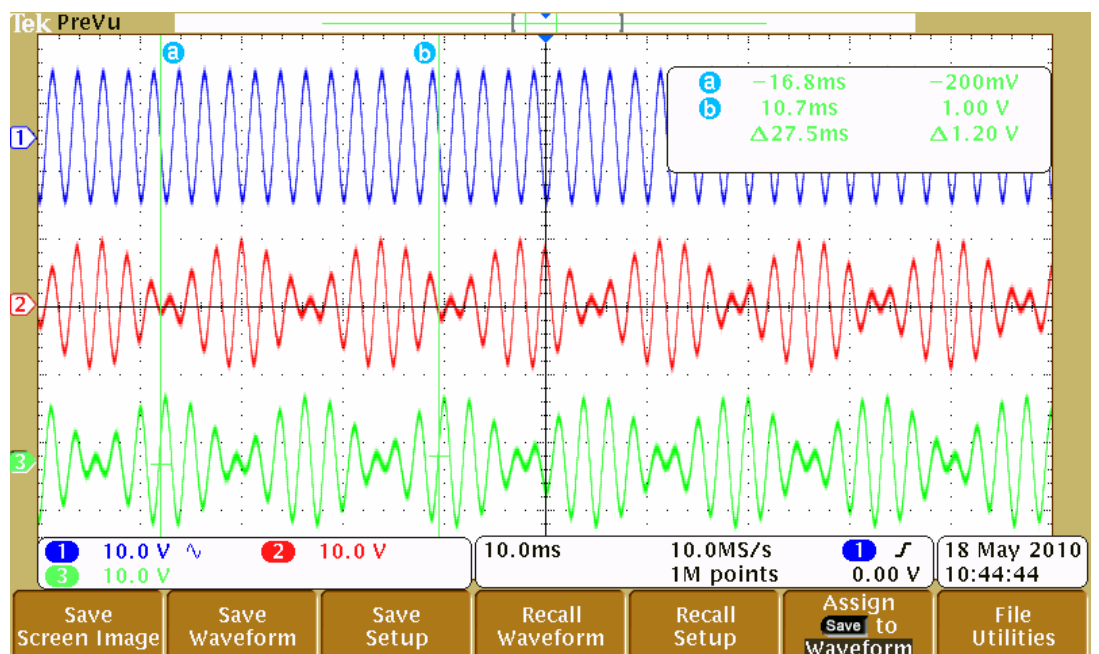
$U_{\cos}$  je hodnota demodulovaného napětí  $U_2$  (viz obrázek 24) [11]

Tohoto jednoduchého vztahu využívá ke konverzi signálu resolveru na digitální signál (R/D konverze).

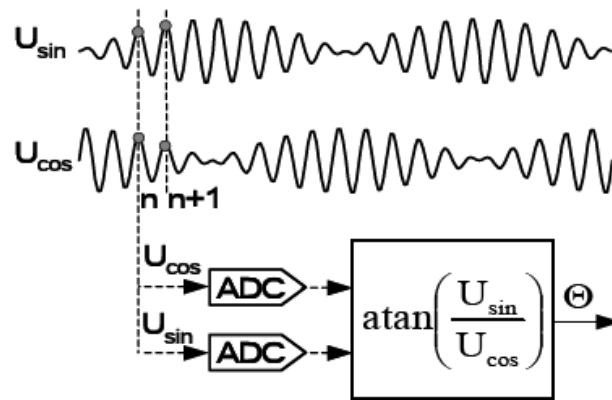




Obrázek 22 Vstupní (1) a výstupní (2,3) signály při otáčení resolveru



Obrázek 23 Vstupní (1) a výstupní (2,3) signály při otáčení druhým směrem



Obrázek 24 Určování  $U_{\sin}$  a  $U_{\cos}$  [11]

Další často užívanou možností, jak určovat úhel natočení resolveru je metoda vyhodnocování fázové chyby, kdy se průběhy  $U_1$  a  $U_2$  odpovídající vztahům (1) a (2) upraví do tvaru

$$v_1 = U_1 \cdot \cos \phi \quad (8)$$

$$v_2 = U_2 \cdot \sin \phi \quad (9)$$

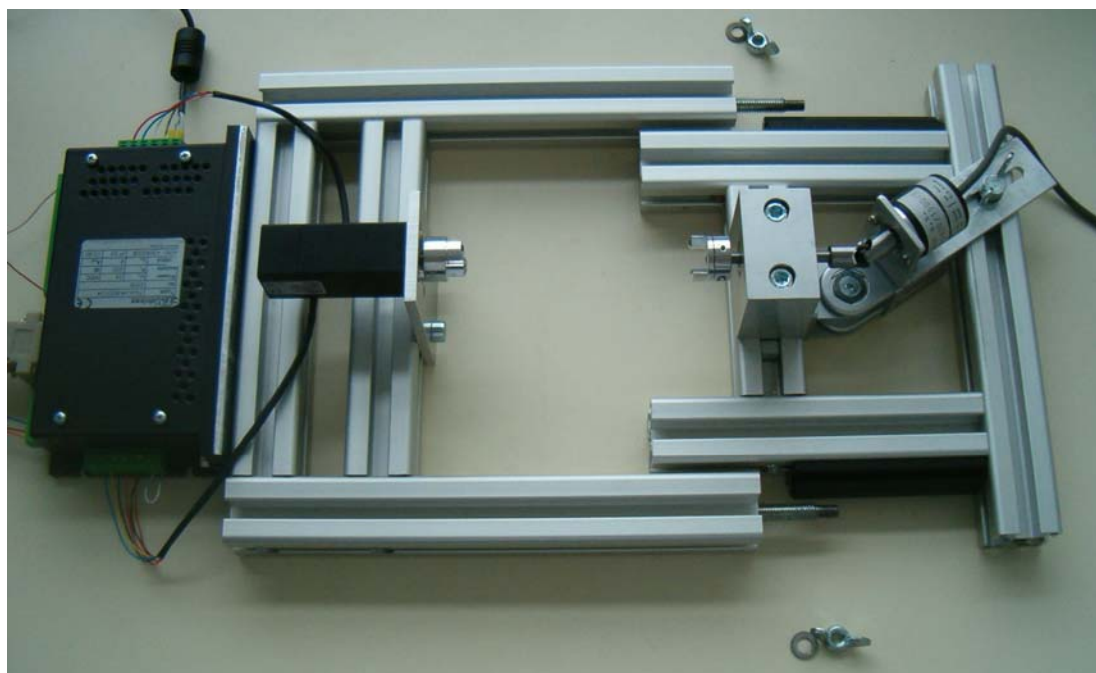
Vzájemným odečtením rovnic dostaneme vztah

$$v_1 - v_2 = U \sin(\omega t) \cdot \sin(\phi - \phi) \quad (10)$$

Při vyhodnocování výstupů resolveru se vzorkují napětí  $U_1$  a  $U_2$  pomocí A/D převodníků, tyto hodnoty se upraví podle výše uvedených vztahů, odfiltruje se střídavá složka  $U \sin(\omega t)$  a vyhodnotí se rozdíl  $\phi - \phi$ . Po překročení určité hodnoty rozdílu se indikuje nová aktuální poloha  $\phi$ . [12]

### 2.5.5 Měření s inkrementálním snímačem

Na přípravku s inkrementálním snímačem (obrázek 24) byla proměřována nelinearita kardanova kloubu při jeho přílišném zalomení. Měření bylo prováděno při konstantních otáčkách pro úhly  $0^\circ$ ,  $10^\circ$ ,  $20^\circ$ ,  $30^\circ$ ,  $40^\circ$  a  $45^\circ$ .



**Obrázek 25 Přípravek s inkrementálním snímačem**

Pro každý úhel byly měřeny hodnoty nejkratšího a nejdelšího trvání pulzu snímače. Nejprve bylo nutno zaznamenat dostatečně dlouhý úsek dat, v úseku jedné otáčky pak vyhledat a pomocí kurzorů označit oblasti s větším a menším výskytem impulzů (viz obrázek 25). V těchto oblastech byla následně určena doba trvání impulzů v kanálu A. Ze získaných hodnot byla následně počítána nerovnoměrnost chodu kardanu.

**Tabulka 4 Nerovnoměrnost chodu kardanu**

$\alpha$ [°]	$t_{\max}$ [μs]	$t_{\min}$ [μs]	$\delta$ [%]	$\delta_{\text{kor}}$ [%]
0	48	36	28,57	0,0
10	52	36	36,36	7,8
20	55	37	39,13	10,6
30	64	38	50,98	22,4
40	75	32	80,37	51,8
45	85	28	100,88	72,3

Příklad výpočtu:

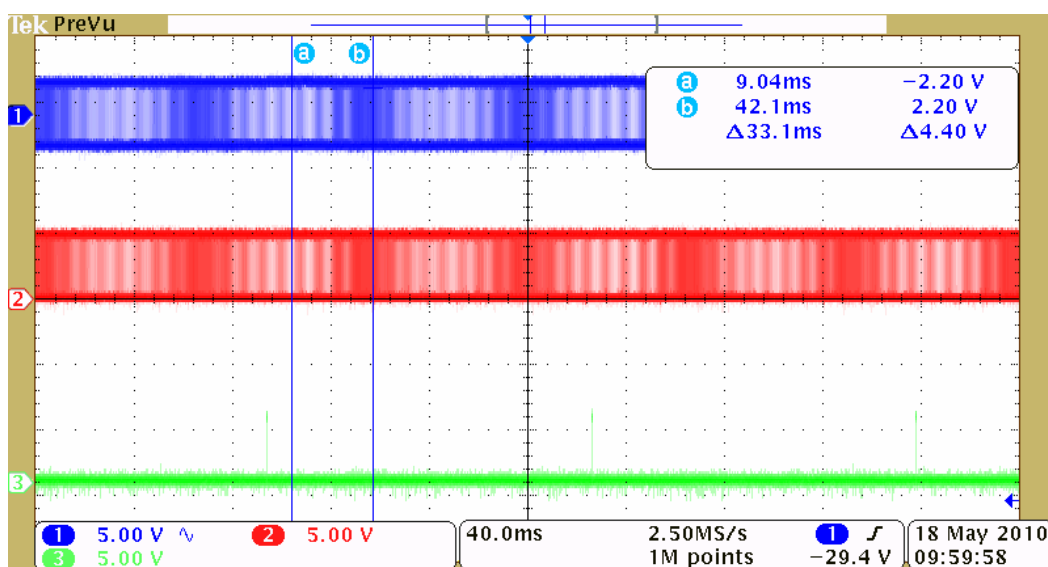
$$\delta = \frac{t_{\max} - t_{\min}}{\sum t} \cdot 100 = \frac{52 - 36}{44} \cdot 100 = 36,36\%$$

$$\delta_{\text{kor}} = \delta - \delta_0 = 36,36 - 28,57 = 7,85\%$$

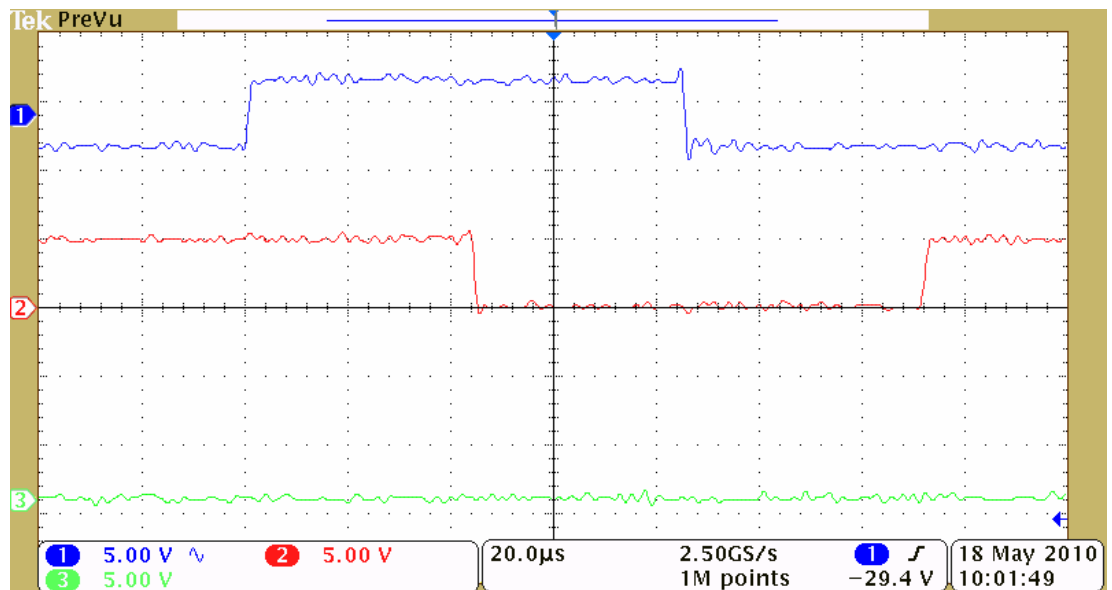
Při výpočtech nerovnoměrnosti  $\delta$  nebylo dosaženo výsledků, které by odpovídaly původním předpokladům. Hodnoty kolísání jsou značně vyšší než by měly být. Z výsledků bylo usouzeno, že k měřené nerovnoměrnosti chodu kardanu se přidává ještě další nerovnoměrnost chodu, která vzniká patrně na spojce. Za důvod vzniku je považována nepřesnost konstrukce, která má za následek špatnou polohu osy motoru oproti ose uložení ložisek. Další příčinou pak je použití neoriginálního mezikusu spojky.

Tato nepřesnost se následně projevuje jako nelinearita na spojce, která zavádí do měření další přidanou nerovnoměrnost chodu. Nerovnoměrnost  $\delta_{sp}$  se projevuje i při nulovém úhlu zalomení kardanu. Jejím vlivem je tak i pro nezalomený kardan naměřeno kolísání otáček inkrementálního snímače asi 28,5%.

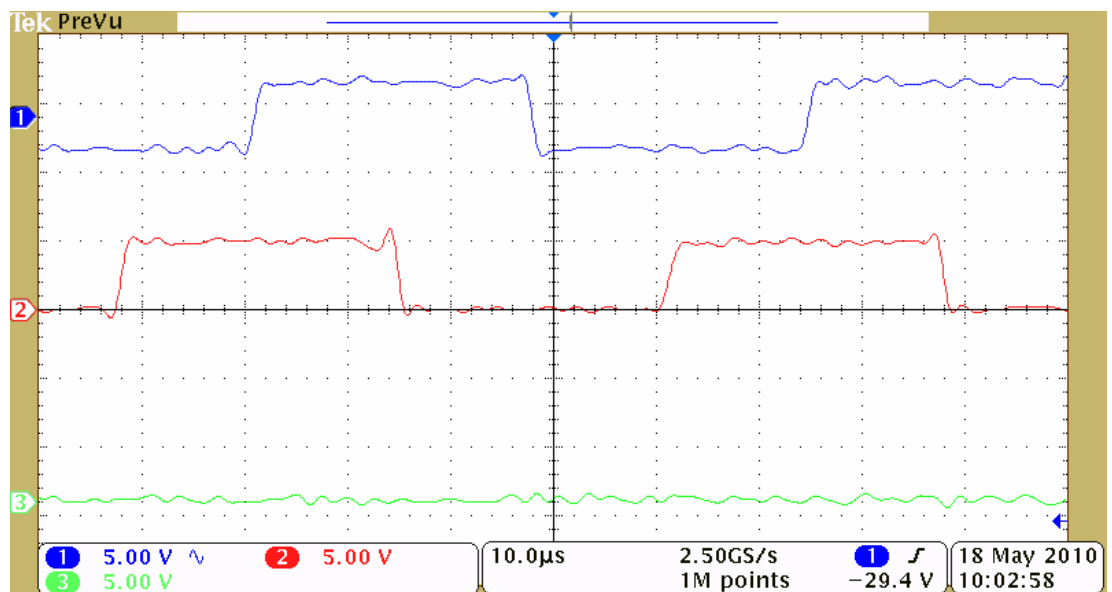
Byla proto provedena korekce výsledků. Od vypočtené nerovnoměrnosti  $\delta$  byla odečtena hodnota  $\delta_{sp}$ . Vypočtená hodnota  $\delta_{kor}$  již přibližně odpovídá hodnotám určeným ze vztahu (1), které jsou uvedené v tabulce 1.



Obrázek 26 Označení vybraných oblastí kurzory



Obrázek 27 Určení  $t_{\max}$  pro úhel zalomení  $45^\circ$



Obrázek 28 Určení  $t_{\min}$  pro úhel zalomení  $45^\circ$

### 2.5.6 Kontaktní měření na PC ventilátoru

Jako další možné měření bylo uvažováno kontaktní a bezkontaktní měření otáček motoru s cílem demonstrovat vliv zatížení motoru kontaktním snímačem a následně vyhodnotit takto vzniklou chybu měření. K tomuto je zapotřebí motor, který by umožnil přiložení kontaktního snímače a zároveň měl takovou charakteristiku a výkon, aby přiložením kontaktního snímače vznikl malý ale dostatečně znatelný pokles otáček. Pro tuto aplikaci bylo zkoušeno několik PC ventilátorů, protože mají většinou výkon okolo 1W, který se jevil pro dané potřeby ekvivalentní. Další výhodou těchto motorků je dnes již běžná přítomnost RPM senzoru. Vzniká tedy možnost měřit otáčky bezkontaktně, kontaktně a navíc ještě naměřené hodnoty srovnávat s hodnotami RPM senzoru.

Při pokusech o popsané měření kontaktním snímačem otáček Lutron DT2236 (viz obrázek 28) bylo zjištěno, že není žádný vhodný způsob, jak snímač přiložit přímo na motor. Byl proto vyroben nástavec se soustružnickým vpichem, který byl na motor nalepen. Při následném měření však bylo zjištěno, že zatížení způsobené kontaktním snímačem přesahuje možnosti motoru, který se při jakékoli snaze o měření prakticky zastaví.



Obrázek 29 Snímač otáček Lutron DT2236

V dalším kroku bylo provedeno kontaktní měření otáček na přípravku s resolverem (viz obrázek 21), který toto měření umožňuje. Resolver má totiž průchozí hřídel, který je na obou koncích opatřen vpichem. Toto měření však také

nepřineslo požadované výsledky (viz tabulka 5), protože motor modulárního přípravku je zapojen v proudové a otáčkové regulační smyčce.

**Tabulka 5 Měření na modulárním přípravku**

č. měření	$n_{\text{bez}}$ [ot/min]	$n_{\text{kont}}$ [ot/min]
1	331,7	327
2	648,5	648
3	929,6	927,3
4	1232	1229
5	1519	1517
6	1812	1809
7	2145	2140
8	2445	2444
9	2743	2749
10	2891	2888

Regulátor snadno vykompenzuje přidaný zatěžovací moment a udrží otáčky motoru stejné při kontaktním i bezkontaktním měření. Rozdíly v hodnotách naměřených kontaktně a bezkontaktně pak odpovídají chybě přístroje. Měření na tomto přípravku tedy také nelze demonstrovat vliv zatížení kontaktním snímačem. Další motor, který by byl na toto měření vhodný, nebyl prozatím nalezen.

### 3. ZÁVĚR

V průběhu vypracovávání práce byly vybrány snímače, jejichž funkce je demonstrována. Byl navržen modulární přípravek s univerzální základnou pro motor a výměnnými základnami pro snímače. Výhodou je možnost v případě potřeby kdykoli přípravek doplnit o další základny se snímači různých typů.

Po zkonstruování přípravků byla na všech přípravcích provedena měření.

Měření na magnetickém rotačním enkodéru prokázalo použitelnost PWM výstupu pro měření úhlu natočení. Při aplikaci RC integračního filtru je pak možné obvod použít jako náhradu v aplikacích, kde je úhel odměřován pomocí potenciometru.

Měření s indukčním snímačem je možno demonstrovat vliv tvaru zubů clony na výstupní signál. Při použití osciloskopu s funkcí integrování je přímo vidět, jaký tvar výstupního signálu odpovídá jednotlivým zubům clony.

Měření na resolveru byly zjištěny tvary signálů na výstupních cívkách a byl popsán způsob, jak z naměřených průběhů odvodit úhel natočení.

Při měření s inkrementálním snímačem se uplatňovala nelinearita spojky, u které nebyl použit originální polyuretanový kříž. Tato nelinearita zavedla do měření značnou chybu. Po korekci chyby však byly získány přijatelné výsledky, které potvrdily, že je možné pomocí inkrementálního snímače určovat vliv úhlu zalomení kardanova kloubu na nelinearitu otáček.

Kontaktním měřením na motorech uvedených níže nelze demonstrovat vliv použití kontaktního snímače na pokles otáček. Použitý ventilátor je pro měření příliš slabý a při snímání otáček se prakticky zastaví. Při měření na základně s motorem naopak k poklesu otáček vůbec nedojde, protože motor je zapojen v regulační smyčce, která udržuje konstantní otáčky. Při snaze realizovat toto měření by bylo třeba nalézt motor, u kterého by při použití kontaktního měření dobře znatelný pokles otáček.



## 4. LITERATURA

- [1] GUSTAFSSON, Fredrik. Rotational speed sensors. IEEE Instrumentation & Measurement Magazine [online]. 2010, roč. 13, č.2 [cit 2010-05-16] Dostupné z: <http://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?tp=&arnumber=5438333>
- [2] HUŠEK, Miloš. Měření otáček [online]. 2009, [cit.2009-04-25] Dostupné z: <<http://www.qtest.cz/mereni-otacek/mereni-otacek.htm>>
- [3] Měření fyzikálních veličin [online výuková skripta]. [cit.2009-04-25] Dostupné z: [https://www.feec.vutbr.cz/et/skripta/uamt/Mereni\\_fyzikalnich\\_velicin\\_S.pdf2](https://www.feec.vutbr.cz/et/skripta/uamt/Mereni_fyzikalnich_velicin_S.pdf2)
- [4] Elektrické regulované pohony [online výuková skripta]. [cit.2010-04-15] Dostupné z: <https://www.vutbr.cz/elearning/>
- [5] Transducer System inc. Magnetic pickups [online]. [cit. 2010-05-10] Dostupné z: <http://docs-europe.electrocomponents.com/webdocs/0031/0900766b800319c3.pdf>
- [6] MALÝ, Martin. Magnetický rotační enkodér AS5040 [online]. 2005 [cit.2010-05-10] Dostupné z: <http://hw.cz/Produkty/Nove-soucastky/ART1288-Magneticky-rotacni-ekoder-AS5040.html>
- [7] Austriamicrosystems AG. Application Note AN5000-20 [online]. 2007 [cit. 2010-05-08] Dostupné z: <http://www.austriamicrosystems.com/eng/Products/Magnetic-Encoders/Rotary-Encoders/AS5040/AS5040-Downloads/AS5040-Downloads>
- [8] TGdrives s.r.o. Servomotory řady TGT [on-line]. 2010 [cit.2010-05-10] Dostupné z: <<http://www.tgdrives.cz/servomotory/servomotory-rady-tgt>>
- [9] TGdrives s.r.o. Digitální servozesilovače TGA-24-9/20 [online]. [cit.2010-05-10] Dostupné z: [http://www.tgdrives.cz/fileadmin/user\\_upload/download/servopohony\\_tga/Letak\\_TGA.pdf](http://www.tgdrives.cz/fileadmin/user_upload/download/servopohony_tga/Letak_TGA.pdf)
- [10] KYSELA, František - KLEPŠ, Zdeněk - KOVÁŘ, Otakar – RAJČOK, Matúš. Strojní prvky a systémy. 1. vyd. Praha: SNTL, 1989. 467s.
- [11] Freescale Semiconductor. Application note AN1942 [online]. 2005 [cit. 2010-05-16] Dostupné z: <http://www.freescale.com/files/product/doc/AN1942.pdf>

- [12] ČAMBÁL, Marek – NOVÁK, Martin – NOVÁK, Jaroslav. Vyhodnocování výstupního signálu resolveru pro určování polohy rotoru synchronního stroje [online]. 2005 [cit. 2010-05-18] Dostupné z: [http://www3.fs.cvut.cz/web/fileadmin/documents/12241-BOZEK/publikace/2005/2005\\_017.pdf](http://www3.fs.cvut.cz/web/fileadmin/documents/12241-BOZEK/publikace/2005/2005_017.pdf)

## SEZNAM ZKRATEK, SYMBOLŮ

Zkratka/Symbol	Jednotka	Popis
EC		Elektronicky komutovaný
$\alpha$	°	Úhel zalomení kardanu
$d\phi/dt$	Wb	Změna magnetického toku
$\varphi$	°	Úhel natočení snímače

## SEZNAM PŘÍLOH

Příloha 1 Výkres Základna pro snímače

Příloha 2 Výkres Základna pro motor

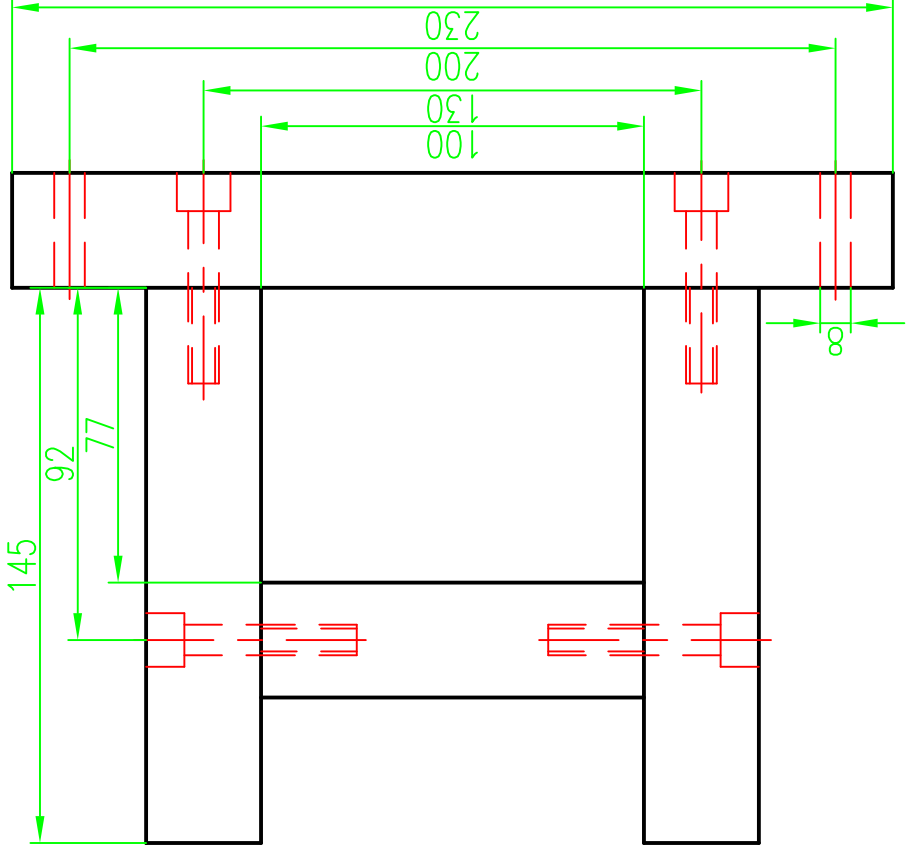
Příloha 3 Výkres Uložení ložisek

Příloha 4 Výkres Uchycení motoru a reslveru

Příloha 5 Výkres Uchycení indukčního a inkrementálního snímače

Příloha 6 Výkres Ozubená kola

Příloha 7 Výkres Ozubená kola



KRESLIL

Jiří Zikmund

TŘÍDA

DATUM

02.05.2010

MĚŘÍTKO

1:2

NÁZEV

Základna pro snímače

ČÍSLO VÝKRESU

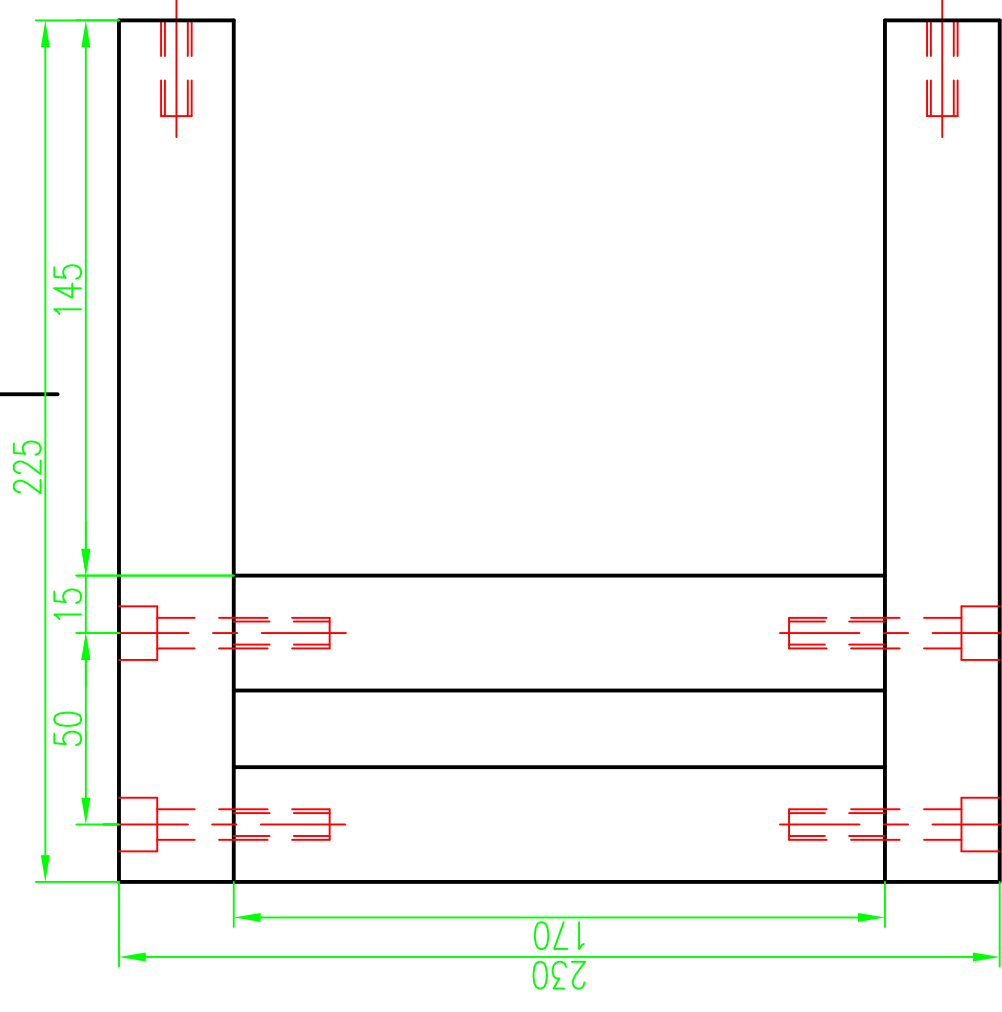
1

LISTŮ

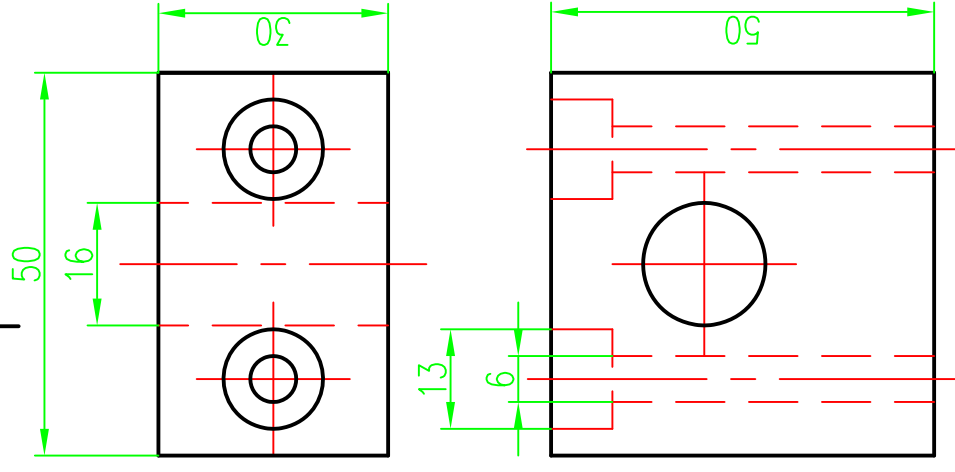
LIST

VUT

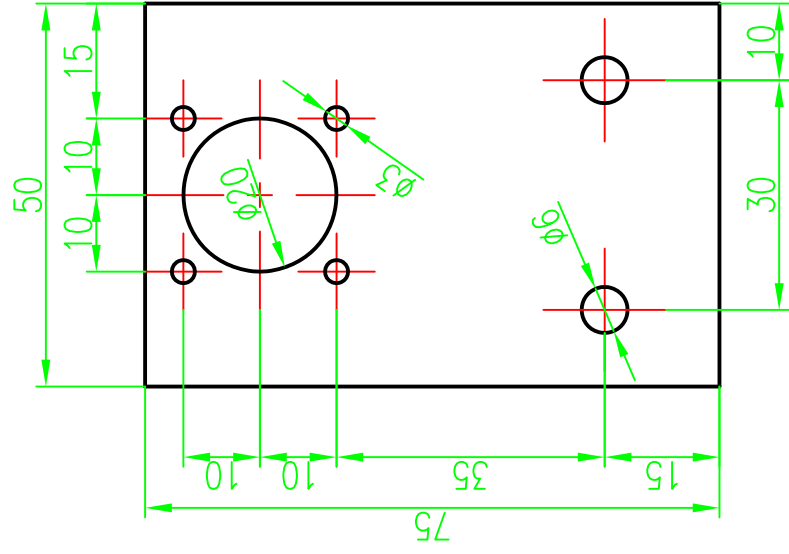
FEKT



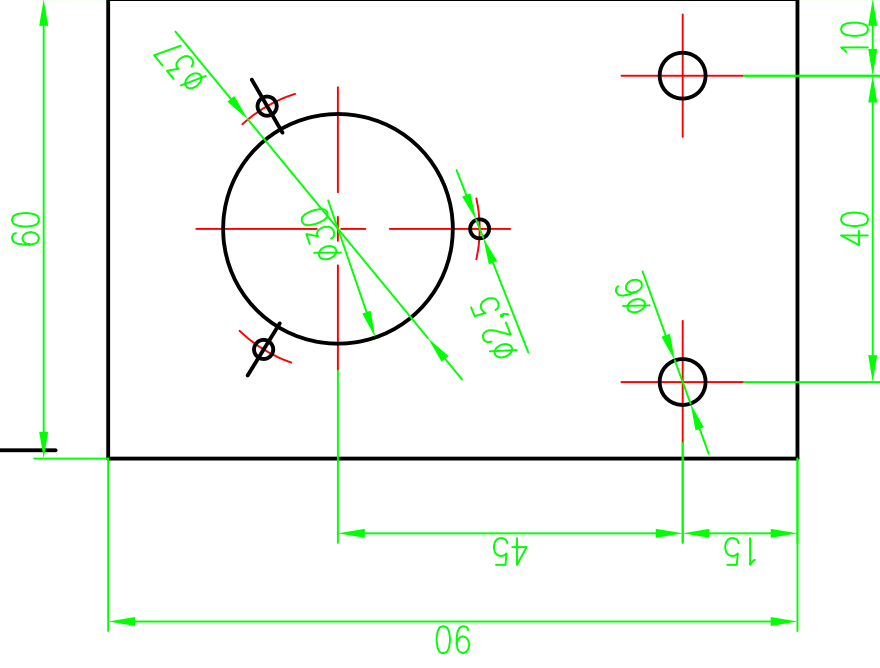
KRESLIL	Jiří Zikmund	TŘÍDA	DATUM	02.05.2010	MĚŘÍTKO	1:2
VUT			NÁZEV			
FEKT			Základna pro motor			
			ČÍSLO VÝKRESU			
			2			
			LISTŮ		LIST	



KRESLIL	Jiří Zikmund	TŘÍDA	DATUM	02.05.2010	MĚŘÍTKO	1:1
VUT			NÁZEV			
FEKT			Uložení ložisek			
			ČÍSLO VÝKRESU			
			3			
			LIST		LIST	

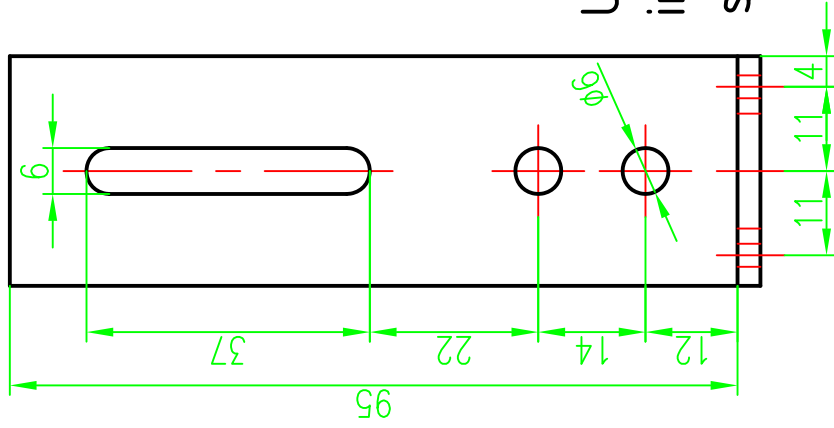


Uchytení motoru

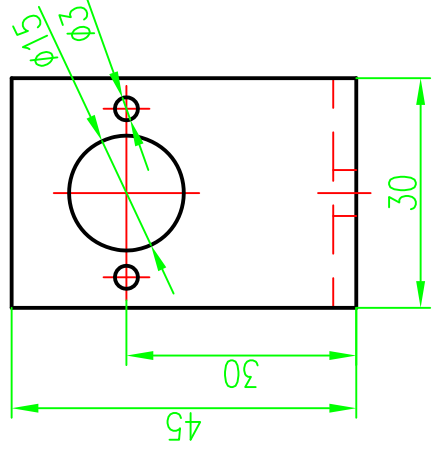
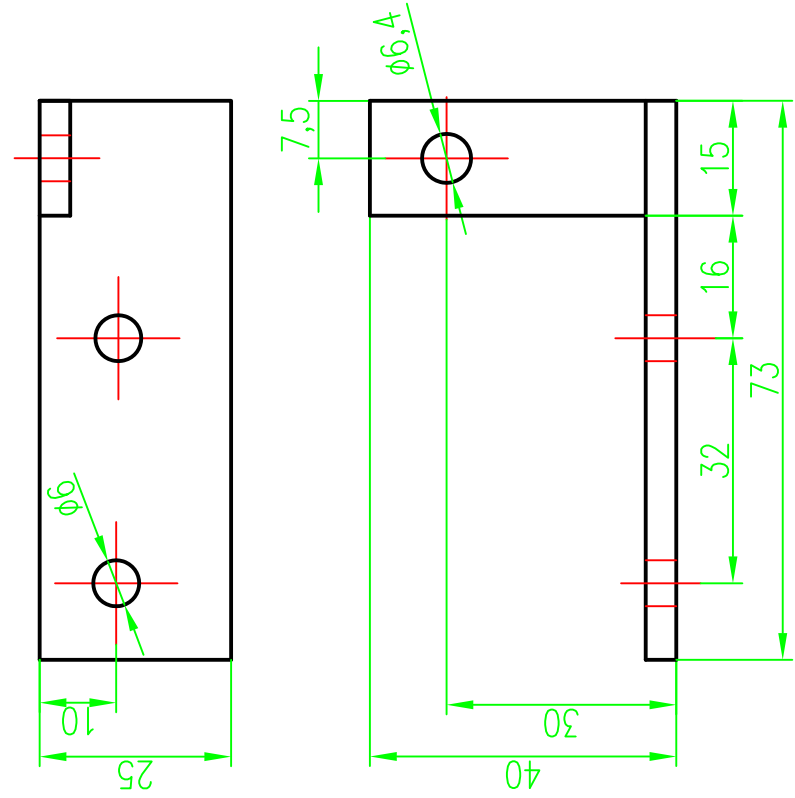


Uchytení resolveru

KRESLIL	Jiří Zikmund	TŘÍDA	DATUM	02.05.2010	MĚŘÍTKO	1:1
VUT			NÁZEV			
FEKT			Uchytení motoru a resolveru			
			ČÍSLO VÝKRESU			
			4			
			LISTŮ		LIST	



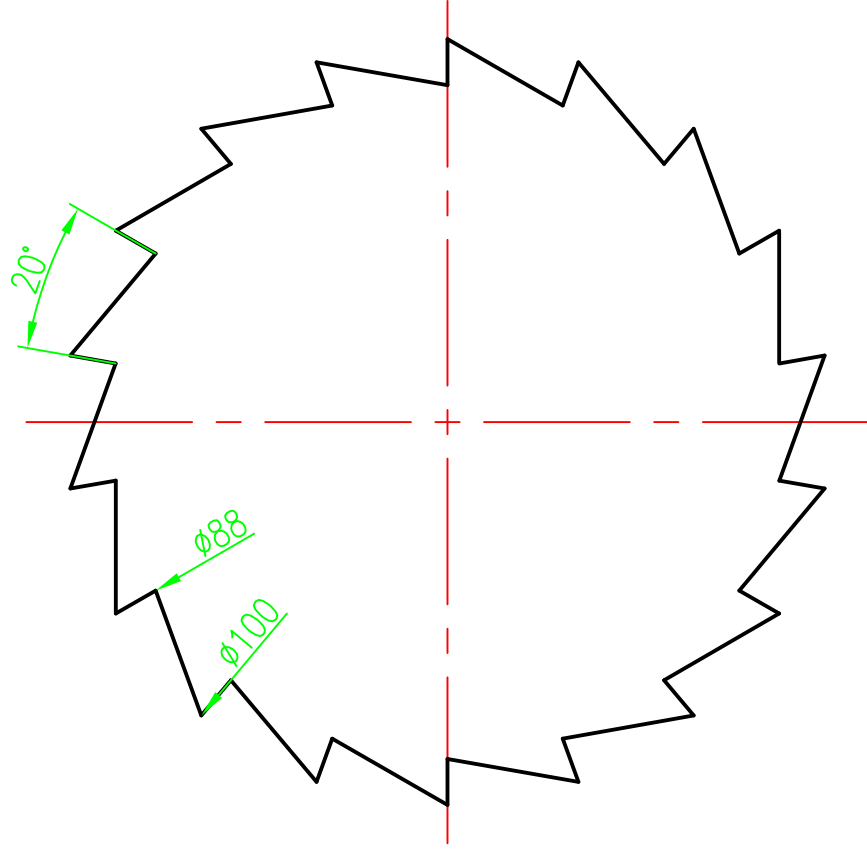
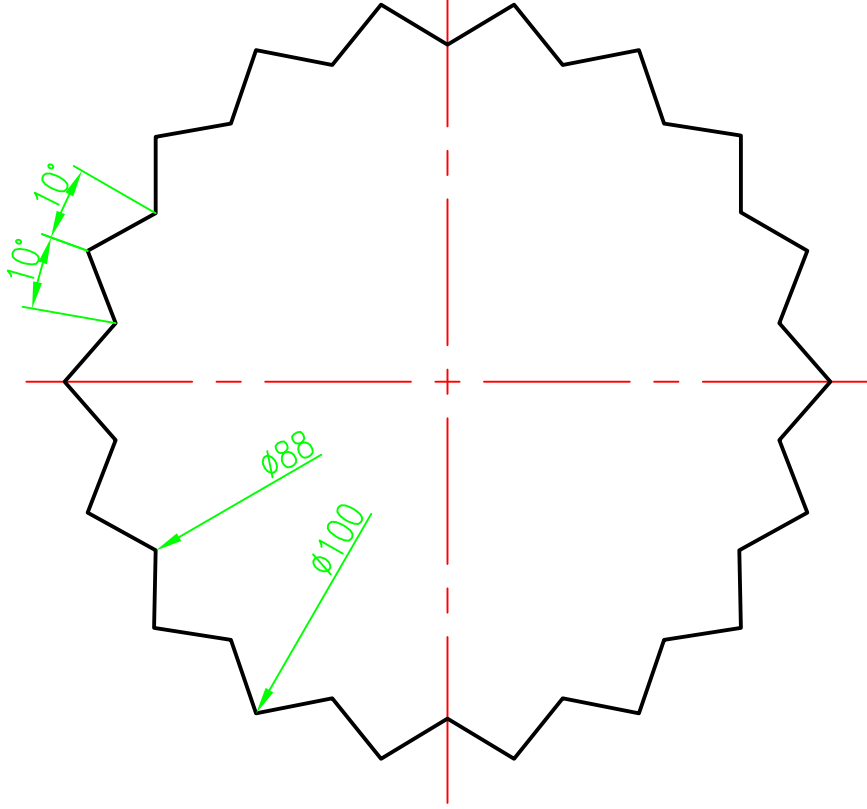
Uchytení inkrementálního snímače



Uchytení indukčního snímače

KRESLIL	Jiří Zikmund	TŘÍDA	DATUM	10.05.2010	MĚŘÍTKO	1:1
VUT			Uchytení snímačů			
FEKT			ČÍSLO VÝKRESU 5			
					LISTŮ	LIST





KRESLIL

Jiří Zikmund

TŘÍDA

DATUM

12.05.2010

MĚŘÍTKO

1:1

NÁZEV

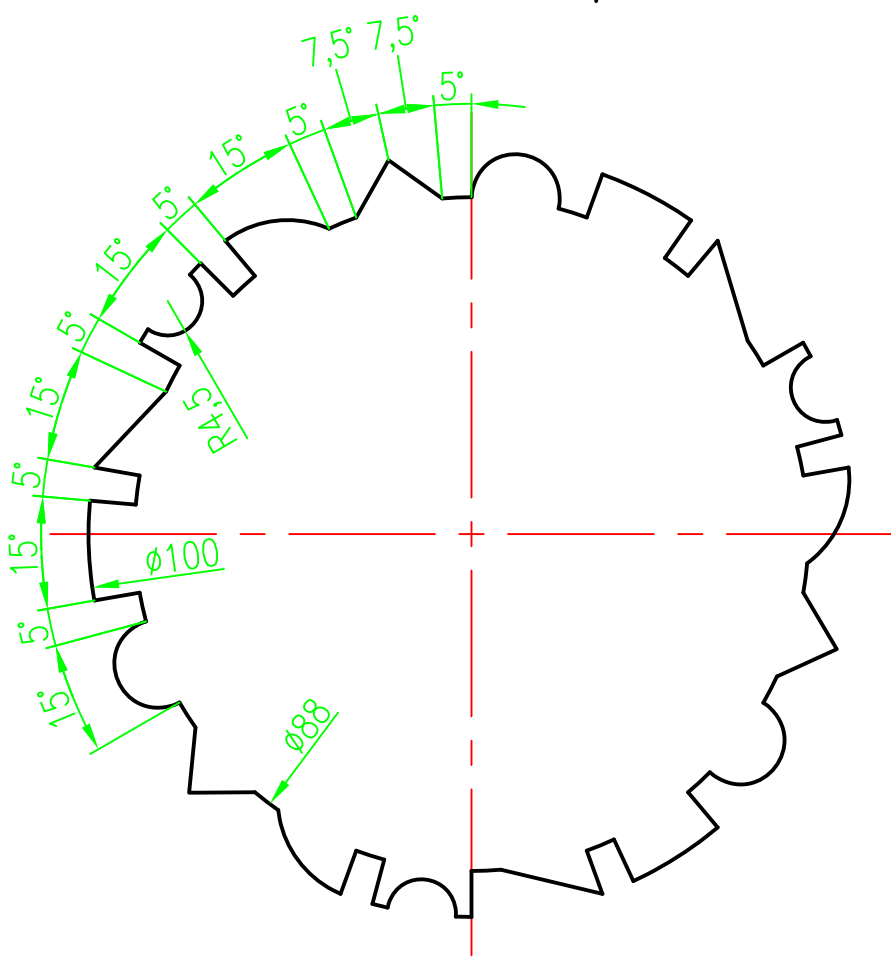
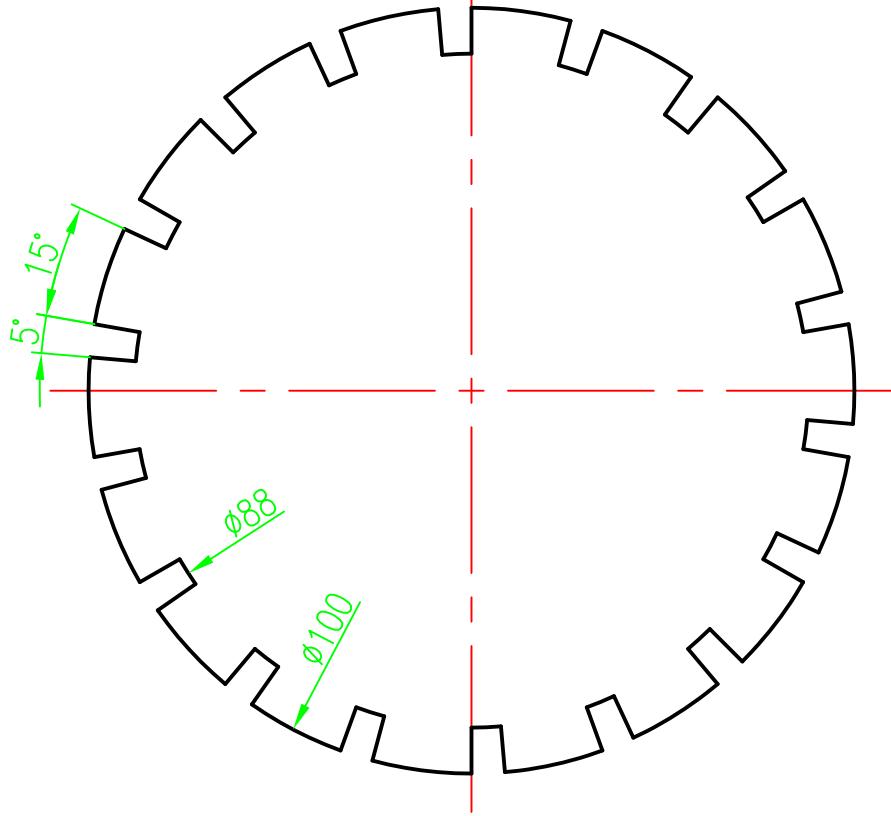
Ozubená kola

ČÍSLO VÝKRESU

6

LISTŮ

LIST



KRESLIL Jirí Zikmund

TŘÍDA

DATUM

12.05.2010

MĚŘÍTKO

1:1

NÁZEV

Ozubená kola

VUT

ČÍSLO VÝKRESU

7

FEKT

LISTŮ

LIST