

ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE

Fakulta strojní – Ústav mechaniky, biomechaniky a mechatroniky



BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

**Absolutní úhlový
snímací systém IMAS**

Absolute angle system IMAS

Jaroslav Průcha

2017

Prohlašuji, že jsem tuto práci vypracoval samostatně s použitím literárních zdrojů a informací, které cituji a uvádím v seznamu použité literatury a zdrojů.

Datum:

.....
Podpis

Poděkování

Děkuji vedoucímu své bakalářské práce Ing. Martinovi Nečasovi, MSc., Ph.D. za zajímavé téma, odborné vedení práce, trpělivost a věnovaný čas.

I. OSOBNÍ A STUDIJNÍ ÚDAJE

Příjmení: **Průcha** Jméno: **Jaroslav** Osobní číslo: **422807**
Fakulta/ústav: **Fakulta strojní**
Zadávající katedra/ústav: **Ústav mechaniky, biomechaniky a mechatroniky**
Studijní program: **Teoretický základ strojního inženýrství**
Studijní obor: **bez oboru**

II. ÚDAJE K BAKALÁŘSKÉ PRÁCI

Název bakalářské práce:

Absolutní úhlový snímací systém IMAS

Název bakalářské práce anglicky:

Absolute angle system IMAS

Pokyny pro vypracování:

1. Seznamte se s problematikou úhlových sensorů pro servopohony
2. Proveďte reverse-engineering existujícího absolutního odměřovacího systému IMAS a vypracujte jeho jednoduchý simulační model.
3. Proveďte oživení systému a demonstруйте jeho funkčnost.
4. Kriticky zhodnoťte dosažené výsledky

Seznam doporučené literatury:

R. Doncker, D.W.J. Pulle, A.Veltman: Advanced Electrical Drives, Springer Netherlands, 2011
D.G. Alciatore, M.. Hstrand: Introduction to Mechatronics and Measurement systems

Jméno a pracoviště vedoucí(ho) bakalářské práce:

Ing. Martin Nečas MSc., Ph.D., ústav mechaniky, biomechaniky a mechatroniky FS

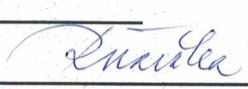
Jméno a pracoviště druhé(ho) vedoucí(ho) nebo konzultanta(ky) bakalářské práce:

Datum zadání bakalářské práce: **19.04.2017**

Termín odevzdání bakalářské práce: **18.08.2017**

Platnost zadání bakalářské práce: _____


Podpis vedoucí(ho) práce

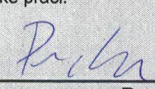

Podpis vedoucí(ho) ústavu/katedry


Podpis děkana(ky)

III. PŘEVZETÍ ZADÁNÍ

Student bere na vědomí, že je povinen vypracovat bakalářskou práci samostatně, bez cizí pomoci, s výjimkou poskytnutých konzultací. Seznam použité literatury, jiných pramenů a jmen konzultantů je třeba uvést v bakalářské práci.

28.4.2017
Datum převzetí zadání


Podpis studenta

Anotační list

Jméno autora: Jaroslav Průcha

Název BP: Absolutní úhlový snímací systém IMAS

Anglický název: Absolute angle system IMAS

Rok: 2017

Obor: Teoretický základ strojního inženýrství

Ústav: Ústav mechaniky, biomechaniky a mechatroniky

Vedoucí práce: Ing. Martin Nečas, MSc., Ph.D.

Bibliografické údaje: Počet stran 55
Počet obrázků 34
Počet tabulek 1

Klíčová slova: měření úhlu, IMAS, vůle, mechatronika
Keywords: angle measurement, IMAS, backlash, mechatronics

Anotace

Tématem této práce jsou absolutní úhlové snímací systémy. V rešeršní části byly stručně shrnuty hlavní principy měření úhlu natočení. Nejprve je uveden obecný fyzikální princip a dále je představena nejpodstatnější problematika charakteristická pro jednotlivé principy měření úhlu.

V praktické části byl analyzován absolutní úhlový snímací systém IMAS a byly prozkoumány možnosti jeho oživení. Především šlo o objasnění vlivu vůle a důvodu použití tří resolverů při jeho konstrukci.

Abstract

The theoretical part of this thesis explores the problematics of angle measurement. The major principles of angle measurement are introduced, a brief summary of their respective physical nature is given and the most important problematics of each principle is briefly investigated.

The practical part aims to analyze and reuse an absolute angle measurement system IMAS, with the biggest emphasis being put on identifying the role of backlash in the functionality of the system and illumination of the reasoning behind the use of three resolvers in the original design.

Obsah

1	Úvod	9
2	Odporové úhlové senzory	10
2.1	Fyzikální princip	10
2.2	Rozdělení druhů realizace odporového potenciometru	11
2.3	Linearita	11
2.4	Výhody a omezení odporových úhlových sensorů	12
3	Optické úhlové senzory	13
3.1	Fyzikální princip	13
3.2	Přenos informace v optickém úhlovém senzoru	13
3.2.1	Rozdělení druhů kódu nesoucího informaci o poloze	15
3.3	Vlivy na využitelnost optických úhlových sensorů v různých aplikacích	16
4	Elektromagnetické úhlové senzory	18
4.1	Fyzikální princip	18
4.2	Rozdělení základních typů úhlových sensorů pracujících na elektro- magnetickém principu	19
4.2.1	Synchro	19
4.2.2	Indukční potenciometr	20
4.2.3	Resolver	21
4.3	Výhody a omezení elektromagnetických sensorů	23
5	Komunikace se senzory	25
5.1	Protokoly	25
5.1.1	Uzavřené protokoly	25
5.1.2	Otevřené protokoly	25
5.1.3	Srovnání protokolů	26
5.2	Základní principy přenosu dat	26
5.2.1	Inkrementální signál $\sim V_{PP}$	26
5.2.2	Inkrementální signál \square TTL	28
5.2.3	Přenos signálů pro sinusoidální komunikaci	28
5.3	Protokol EnDat	29
5.3.1	EnDat 2.1 a 2.2	30
5.3.2	AD převod a diskretizace dat	32
6	Teoretický návrh oživení absolutního úhlového snímacího systému IMAS	34
6.1	Popis soustavy	34
6.2	Přesnost a možnosti resolveru a přenosu dat	36

6.2.1	Kvantizační chyba výstupu signálu z resolveru	36
6.2.2	Povaha výstupu z resolveru a chyba způsobená šumem	36
6.3	Multi-turn detekce úhlu	36
6.4	Multi-turn detekce za použití resolverů R1 a R3	38
6.4.1	Multi-turn detekce za použití resolverů R1, R2 a R3	38
6.5	Vůle a její vliv na funkci a přesnost systému	40
6.5.1	Zhodnocení možných hodnot vůle a vliv na funkčnost soustavy	40
6.6	Teoretické řešení za použití dvou resolverů	42
6.6.1	Případ dostatečně nízké velikosti vůle umožňující určit přesně absolutní úhel	42
6.6.2	Případ příliš vysoké velikosti vůle omezující schopnost určit přesně absolutní úhel	44
6.7	Teoretické řešení za použití tří resolverů	47
6.7.1	Zhodnocení možných hodnot vůle na funkčnost soustavy tří resolverů	47
6.7.2	Případ dostatečně nízké velikosti vůle umožňující určit přesně absolutní úhel v případě systému tří resolverů	47

7 Závěr

1 Úvod

Schopnost přesně měřit úhlové natočení a s ním související úhlovou rychlost je v technické praxi velmi důležitá. S rostoucí úrovní techniky a zvyšujícím se užitím automatického řízení v prakticky všech odvětvích roste i poptávka po úhlových senzorech. Příkladem takového užití může být například absolutní úhlový snímač. Rotační enkodéry se často používají pro sledování pozice hřídele brushless elektromotorů, které se běžně používají v CNC strojích, robotech a dalším průmyslovém vybavení. V těchto aplikacích slouží enkodér jako zařízení pro zpětnou vazbu a hraje zásadní roli k zajištění správné funkce zařízení. Zajišťuje synchronizaci polohy hřídele a napájení vinutí cívek proudem. Je důležité zajistit správnost a co největší přesnost informace o rotaci hřídele, aby bylo dosaženo maximálního kroutícího momentu. Pokud není dosaženo dostatečné synchronizace, dochází v lepším případě ke zhoršení efektivity motoru, v horším k až potenciálně nebezpečným situacím vzniklým nežádoucím chodem motoru.[6]

Z komerčně-průmyslového hlediska můžeme senzor hodnotit především ze tří hledisek: cena výroby, přesnost a odolnost vůči vlivům prostředí. Základní principy měření úhlu natočení lze rozdělit na odporové, elektromagnetické a optické. Jejich uplatnění se liší vzhledem k požadované odolnosti proti vlivu prostředí a pohybu celé součásti, která zahrnuje dynamickou odolnost, teplotní stálost, odolnost proti znečištění prostředí a řadu dalších vlivů.

Rotační senzory jsou nezbytné pro automatizaci v průmyslu, která hýbe světem a jejich význam zcela jistě v následujících letech dále poroste. Užívají se v leteckém a kosmickém průmyslu, jako součásti již zmíněných systému zpětné vazby, při balení produktů, nacházejí své využití i ve zpracování textilií, v technologii, tisku v průmyslovém měřítku, v potravinářském a zpracovatelském průmyslu a mnoha dalších odvětvích.

2 Odporové úhlové senzory

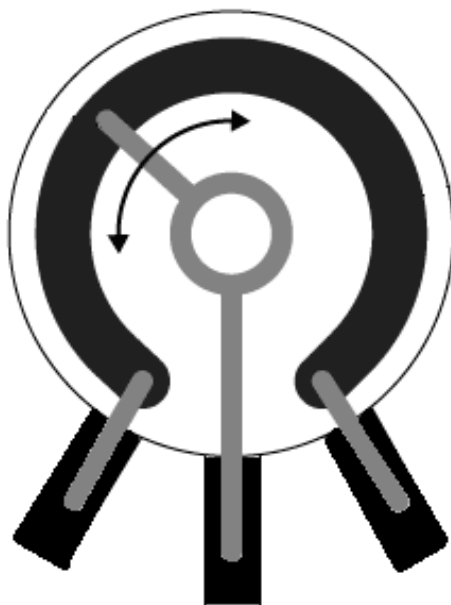
2.1 Fyzikální princip

Fyzikální princip funkce odporových senzorů je stejný pro úhlové i lineární senzory. Odporové senzory fungují na principu potenciometru, kde jezdec jede po vodivé spojitě ploše, čímž se mění délka vodiče zapojená do obvodu, jak je znázorněno na obr. 1. Posunutím jezdcе spojitě zvyšujeme zapojený odpor, což lze reprezentovat vztahem ¹

$$dR = K \cdot d\varphi \quad (1)$$

kde R je odpor, φ úhel natočení a K je konstanta závislá na řadě faktorů. Například na materiálu, teplotě, ploše a formě kontaktu.

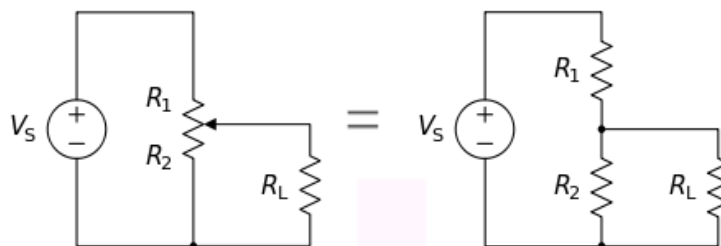
Základní princip měření zapojení odporu je velmi jednoduchý a spočívá v měření napětí, jak je znázorněno na obr. 2. Pro obvod na obr. 2 platí rovnice



Obrázek 1: Schéma rotačního potenciometru[12]

$$V_L = \frac{R_2 R_L}{R_1 R_L + R_2 R_L + R_1 R_2} \cdot V_S \quad (2)$$

¹V případě realizace odporového kotouče se odpor mění s úhlem v diskrétních skocích a tato rovnice pro ni neplatí.



Obrázek 2: Schéma elektrického obvodu zapojení potenciometru[1]

pro lineární měření je žádoucí, aby byly ostatní odpory ve srovnání s R_L zanedbatelné a tedy $\frac{R_1 R_2}{R_L} \rightarrow 0$. V takovém případě lze rovnici zjednodušit na

$$V_L = \frac{R_2}{R_1 + R_2} \cdot V_S. \quad (3)$$

2.2 Rozdělení druhů realizace odporového potenciometru

Základní rozdělení těchto potenciometrů spočívá ve struktuře použitého odporu.

- Drátový - jedná se o těsně navinutou cívku. Hodnota odporu je diskrétní.
- Spojitý - jedná se o spojitou vrstvu vodivého materiálu. Hodnota odporu je spojitá, rozlišení tedy závisí na naší schopnosti přesně změřit změnu odporu.
- Hybridní - realizuje se pokrytím drátového potenciometru vrstvou vodivého plastu.

Pro výrobu vodivého materiálu se používají různé materiály, dle nároků na stabilitu vzhledem k okolním podmínkám, množství elektrického šumu, cenu aj.

V závislosti na konstrukci může mít napětí lineární, logaritmický, sinusoidní, či jiný průběh.

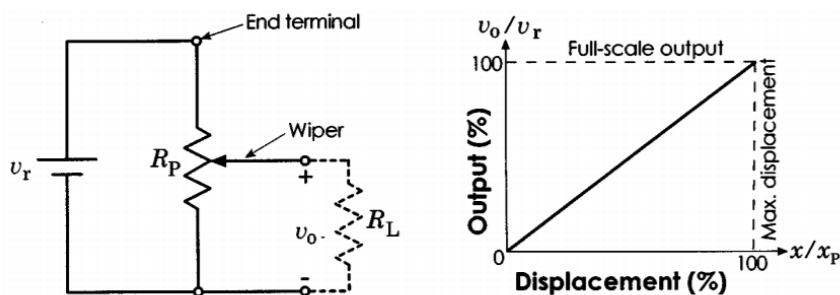
2.3 Linearita

Linearita je maximální odchylka od proložené lineární funkce.

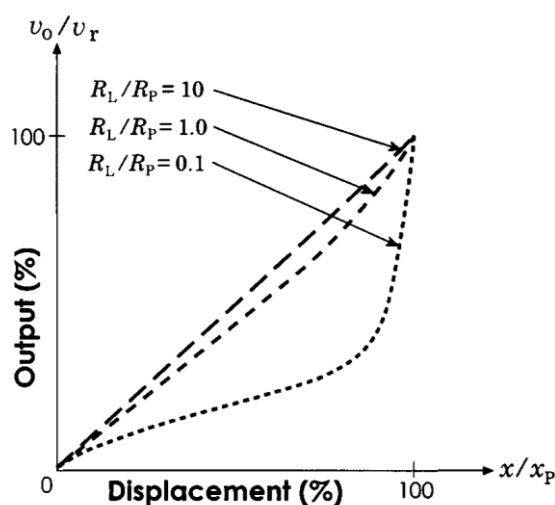
Nezávislá linearita je definována jako přímka s minimální chybou linearity v naměřených bodech. Ne nutně na celém rozsahu potenciometru. Řádové hodnoty nezávislé linearity se pohybují okolo 0.1% - 1%.

Závislost je idealizovaná pro případ, kdy je $\frac{R_L}{R_P} \rightarrow \infty$

Ve skutečnosti bude přes R_L procházet část proudu, čímž se bude měnit i průběh výstupu. Pro dosažení co nejvyšší linearity je potřeba maximalizovat poměr $\frac{R_L}{R_P}$.



Obrázek 3: Schéma zapojení potenciometru a idealizovaný lineární výstup[1]



Obrázek 4: Vliv poměrů odporů na linearitu výstupu[1]

Pro tuto závilost platí vztah

$$\frac{v_o}{v_r} = \frac{(x/x_P)(R_L/R_P)}{(R_L/R_P) + (x/x_P) - (x/x_P)^2} \quad (4)$$

2.4 Výhody a omezení odporových úhlových senzorů

Ačkoli existuje řada sofistikovaných moderních senzorů, potenciometry stále mají své místo mezi úhlovými senzory a tuto pozici si udrží i v budoucnu.

Výhody

Jejich výhodou je především jednoduchost a s ní související nízká cena. Absolutní poloha jezdce je dána mechanicky a tedy v případě výpadku proudu dokáže opět vysílat informaci o poloze ihned po obnovení měřícího proudu. Spotřeba elektrické

energie je ve srovnání s jinými možnostmi nízká.

Nevýhody

Mezi nevýhody potenciometru patří již zmíněná nelinearita. Dále je potřeba počítat s postupným opotřebením odporového pásu. S tím souvisí zhoršující se šum způsobený nerovnostmi na povrchu odporu. Při práci ve znečištěném prostředí je důležité izolovat senzor od okolního prostředí, jinak hrozí znečištění povrchu a vzniku mrtvých míst. Nevýhodou je též citlivost vůči teplotě, je tedy třeba při výběru senzoru pro danou aplikaci počítat s předpokládanou pracovní teplotou. Použití ve velmi citlivých aplikacích limituje tření mezi jezdcem a odporovým pásem, který je sice nízký, ale může vnášet v určitých případech nežádoucí chybu.

Odporové senzory mají široké užití, za které vděčí převážně své jednoduchosti a ceně. Hojně se používají například k ovládání různých elektrických zařízení.

3 Optické úhlové senzory

3.1 Fyzikální princip

Optické úhlové senzory využívají k přenosu informace o poloze světlo, které je vysíláno přes kotouč se vzorkem a detekováno na druhé straně. Ve většině případů je tento systém realizován pomocí disku propouštějícím světlo a na něm nanosenou vrstvou nepropustného materiálu. Tato vrstva je nanese na určitý obrazec, který nese informaci potřebnou pro detekci pohybu a polohy, základní možnosti jsou uvedeny dále.

Zpravidla je tedy senzor realizován třemi základními částmi: průhledným kotoučem se vzorkem, zdrojem světla a detektorem světla, který tedy snímá natočení a pohyb vzorku na kotouči.

Samotná fyzikální podstata světla a nebodovost světla jsou prvním zdrojem chyby, jelikož tyto jevy způsobují neostrost hran promítaného vzorku.

Existují také další možnosti, například pomocí Moirových obrazců, kterými se ale v této rešerši nezabývám.

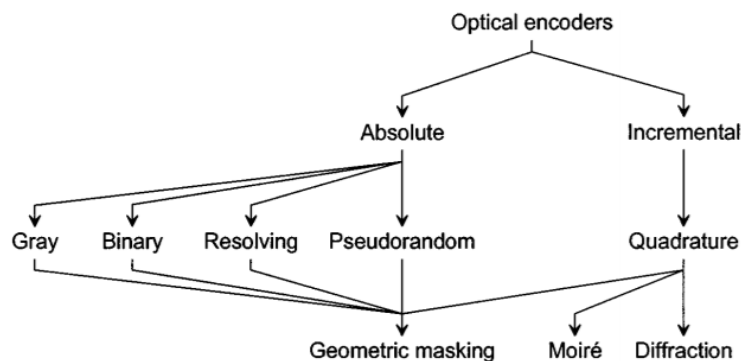
3.2 Přenos informace v optickém úhlovém senzoru

Optické úhlové senzory jsou oblíbenou volbou v řadě systémů. Jednou z jejich předností, a důvodem jejich popularity, je jednoduchost s jakou je lze zakomponovat do digitálních systémů. Optické úhlové enkodéry využívají světlo jako prostředek, pomocí kterého transformují informaci o pohybu do elektrického signálu. Všechna zařízení tohoto typu mají dvě základní součásti: hlavní mřížku a detekční systém. Vzájemná poloha těchto dvou prvků je měřenou veličinou. Infor-

mace uložená a následně měřená detekčním systémem může být zapsána několika odlišnými způsoby. Na obr. 5 je znázorněno rozdělení optických enkóderů podle povahy generované informace pro úhlové i lineární senzory.

Jak je z rozdělení na obr. 5 vidět, optické úhlové senzory mohou být buď absolutní nebo inkrementální.

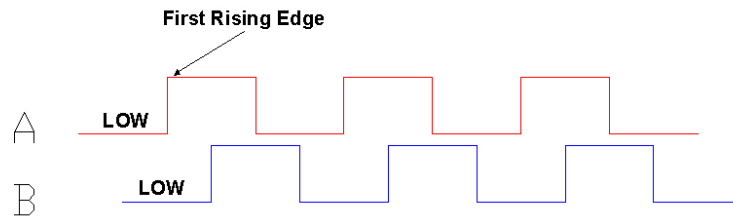
- *Inkrementální* varianta je schopna určit pouze natočení v rámci jedné otáčky. V případě, že je potřeba měřit úhel $\alpha > 2\pi$ musíme přičíst, resp. odečíst, 2π za každou otáčku. V případě chyby v přenosu dat, či výpadku proudu do zařízení, které tuto operaci obstarává, dojde ke ztrátě dat a tedy i informace o absolutním natočení.
- *Absolutní* varianta je vybavena zařízením, které je schopno odečíst počet otočení z výchozí polohy přímo z jeho vlastní polohy. Absolutní poloha je známa ihned po zapnutí a nevyžaduje žádnou znalost předchozího pohybu soustavy. Typickým příkladem je převod pomocí soustavy několika ozubených kol, z jejichž vzájemného otočení lze určit celkový úhel natočení. Nevýhodou tohoto systému je jeho velikost, komplexita a malá odolnost proti rázům, díky čemuž není příliš vhodná do některých aplikací.[2]



Obrázek 5: Zjednodušená klasifikace optických enkóderů v závislosti na povaze a typu generovaného signálu [1]

Pro základní detekci pohybu se většinou používá buď kvadrurní nebo binární, čtvercový signál. V obou případech se jedná o stejnorodou sérii hodnot High a Low, které se detekují a na základě měření změny těchto hodnot se určuje rychlost otáčení. A to buď pomocí speciálních obvodů nebo softwarově.

Kvadrurní signál umožňuje detekci jak pohybu, tak jeho směru. Při rotačním pohybu měření součásti zaznamenáváme změny hodnot signálu A a B.



Obrázek 6: Vizualizace průběhu kvadrurního signálu [3]

Směr otáčení určíme porovnáním změny hodnoty. Například, pokud se při stavu $A = L$ a $B = L$ změní $A = H$, můžeme prohlásit, že pohyb doprava je po směru hodinových ručiček, za předpokladu, že je na obr. 6 rozvinuta mezikruhová plocha tak, že směr doprava odpovídá směru hodinových ručiček. **Binární signál** je jednodušší a odpovídá pouze hodnotě A (či B) na obr. 5. Jeho výhodou je jednodušší realizace oproti kvadrurnímu signálu a tedy je vhodné jej použít v aplikacích, kde nepotřebujeme znát směr otáčení.

3.2.1 Rozdělení druhů kódu nesoucího informaci o poloze

Existují čtyři základní formy kódu, nesoucí informaci o poloze: Grayův kód, binární kód, optické resolvoání a pseudonáhodný kód.

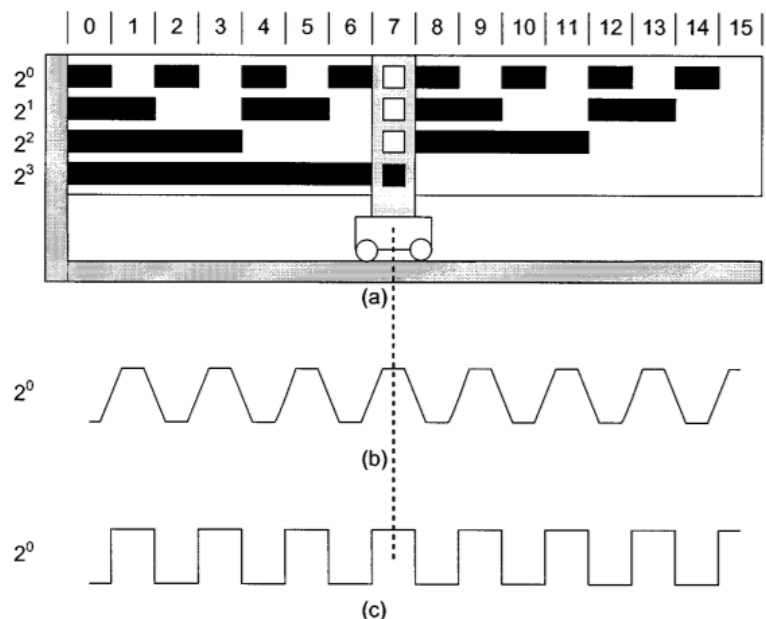
Standardní binární kód udává pozici pomocí kombinace hodnot 1 a 0 v několika drahách. Pro aplikaci rozebíranou v této rešerši je sám o sobě nevhodný, jelikož se může najednou měnit více než jedna hodnota. V takovém případě můžeme dostávat v průběhu času mezi registrací jednotlivých změn hodnot chybné hodnoty. Intenzita světla, díky nebodovému charakteru světelného zdroje, nestoupá z nuly do maximální hodnoty v jednom okamžiku, ale zvyšuje se postupně, jak je znázorněno v bodu b) obr. 7.

Pro sensor se čtyřmi drahami lze kód popsat rovnicí

$$n = i \times 2^0 + j \times 2^1 + k \times 2^2 + l \times 2^3 \quad (5)$$

kde i, j, k, l nabývají hodnoty 0 nebo 1 a představují výstup snímače pro jednotlivé dráhy - například, v závislosti na použité technologii, světlo prochází, či neprochází. Výsledná hodnota pak leží v intervalu $n \in \langle 0; 15 \rangle, n \in \mathbb{Z}$. V případě měření úhlu tedy rozděluje kruh na 16 částí v rozmezí úhlu

$\varphi \in \langle 0 + k \times \frac{\pi}{8}; \frac{\pi}{8} + k \times \frac{\pi}{8} \rangle$ pro $k \in \langle 0; 15 \rangle, k \in \mathbb{Z}$. Výše popsaný problém s nesimultánní změnou hodnot se řeší použitím metody *vee-scan*. Jedná se o metodu, kde se snímací jednotky umístí do tvaru písmene V. Jednoduchou logickou operací



Obrázek 7: Zápis polohy pomocí přirozené binární soustavy [1]

se předejde nežádoucí postupné změně u jednotlivých snímačů. Princip konstrukce vee-scanu a logických operací je znázorněn na obr. 8.

Grayův kód je podobný binárnímu kódu, ale dochází vždy ke změně pouze jednoho bitu dat. Tím se předchází výše popsanému problému při změně několika hodnot najednou.

Za zmínku stojí také optické resolvování (angl. optical resolving). Tato metoda nepracuje pouze z hodnotou 1 nebo 0, ale se spojitě se měnícím vzorem, jehož výstup lze přirovnat k analogii elektromagnetického resolveru, a jeho průběh tedy k sinusoidě.

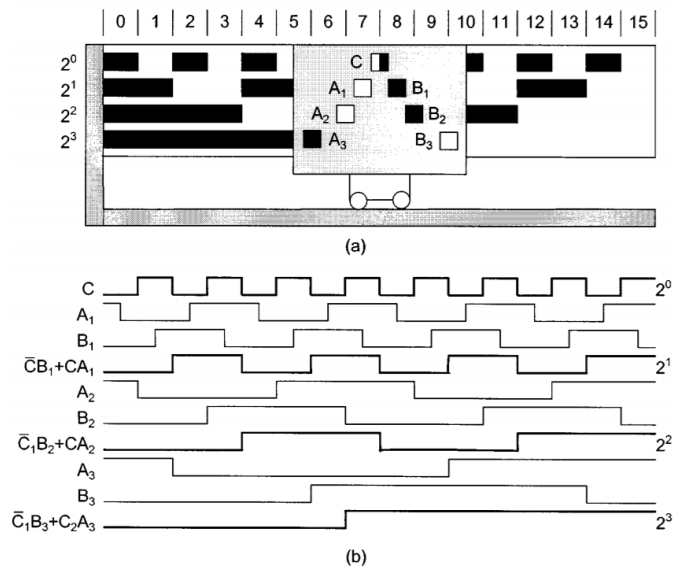
Pseudonáhodný kód využívá pouze dvě dráhy a jedná se o sériový binární kód, ve kterém je každá sekvence n hodnot jedinečná. To umožňuje úhel natočení.

3.3 Vlivy na využitelnost optických úhlových senzorů v různých aplikacích

Optické úhlové senzory se využívají v mnoha odvětvích s různými podmínkami a mají řadu výhod, mezi něž patří především lehkost, s jakou je lze zakomponovat do elektronických systémů.

Povaha jejich konstrukce má za důsledek také některá omezení ovlivňující jak přesnost, tak i samotnou provozuschopnost.

Rychlost rotace snímané součásti je prvním kritériem, ke kterému je potřeba přihlížet.



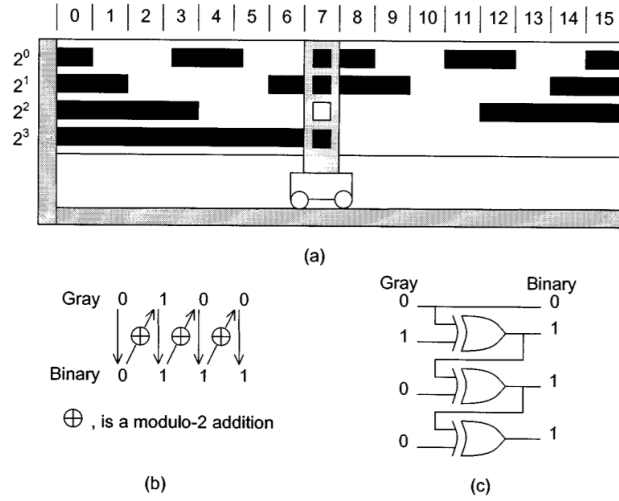
Obrázek 8: Znázornění principu funkce vee-scanu [1]

Elektronika fotosenzoru pracuje na určité frekvenci a čím více se jí blížíme, tím horšího rozlišení bude měření dosahovat. S rychlostí rotace také souvisí možná deformace disku.

Přesnost výroby vzorku kódu na disku nesoucím informaci přináší také určitou chybu.

Vliv prostředí je u optických enkodérů velmi významný a limituje jejich použitelnost. Při vystavení prašnému, zakouřenému, silně světelně znečištěnému, či jinak neideálnímu prostředí dochází k zanášení disku nesoucí informaci o natočení. To zhoršuje přesnost měření a potenciálně až znemožňuje funkci zařízení.

Kondenzace vzdušné vlhkosti při prudkém poklesu teploty zhoršuje, či zcela znemožňuje, schopnosti senzoru měřit otočení a je třeba s tímto jevem uvažovat při jeho aplikaci.



Obrázek 9: Zápís polohy pomocí Grayova kódu (a), schéma konverze Grayova kódu do binární soustavy (b), implementace konverze pomocí logických operátorů OR [1]

4 Elektromagnetické úhlové senzory

4.1 Fyzikální princip

Elektromagnetické senzory polohy fungují na stejném principu jako transformátory. Primární cívkou protéká střídavý proud, který vytváří elektromagnetické pole dle vztahu,

$$B = \mu \frac{N_1 I}{l} \quad (6)$$

Pro indukované napětí ve vodiči platí Faradayův zákon,

$$U_i = -\frac{d\Phi}{dt} \quad (7)$$

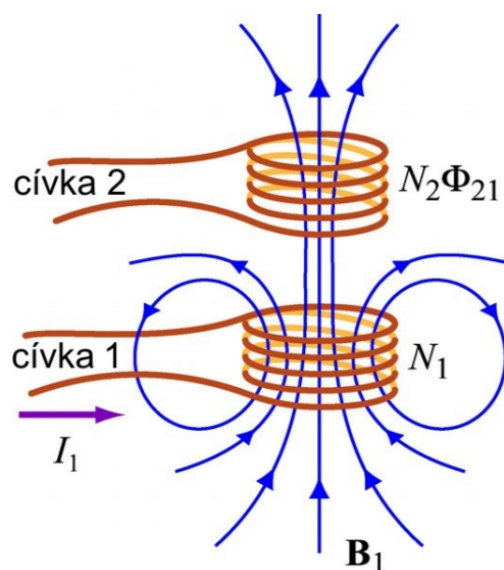
kde Φ je Magnetický tok plochou cívky, pro který platí vztah,

$$\Phi = N_2 B \cdot dS \quad (8)$$

Indukce napětí jedné cívky z druhé cívky zjednodušeně vypadá jako na obr. 10.

Napětí, které se bude indukovat na cívce 2, přivedeme-li na cívku 1 napětí I_1 popisuje následující rovnice (6).

$$\varepsilon_{12} = -N_2 \frac{d\phi_{21}}{dt} = -\frac{d}{dt} \iint_{S_2} \mathbf{B}_1 \cdot d\mathbf{A}_2 \quad (9)$$



Obrázek 10: Indukce dvou cívek[4]

Magnetický tok ϕ_{12} v cívce 2 musí být úměrný proudu v cívce 1 a tedy platí vztah

$$M_{21} = \frac{N_2 \phi_{21}}{I_1} \quad (10)$$

Konstantu úměrnosti M_{21} nazýváme vzájemná indukčnost. Má jednotku henry (H) a platí $1H = 1Tm^2/A$.

Při vzájemném natáčení cívek se mění magnetický tok ϕ_{21} a tedy vzájemná indukčnost cívek, což se projeví změnou amplitudy indukovaného napětí, kterou lze měřit.

Další metodou je měření fázového rozdílu indukovaného napětí na dvou cívkách, kterým se ale v této rešerši podrobně nezabývám.[4]

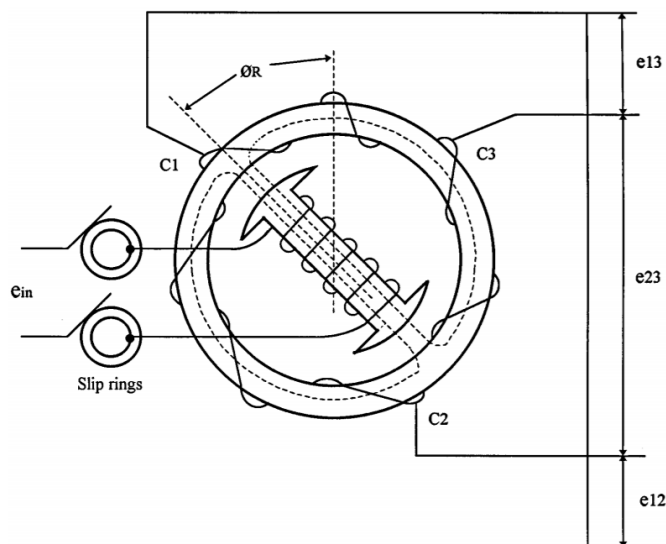
4.2 Rozdělení základních typů úhlových senzorů pracujících na elektromagnetickém principu

4.2.1 Synchro

Jedním ze senzorů, pracujících na výše uvedeném principu, je synchro. Jedná se o elektromechanický senzor používaný k měření úhlové výchylky v různých odvětví elektrotechniky pro řízení servo motorů, jako součást obráběcích strojů, antén aj.

Konstrukce se skládá ze dvou hlavních částí - statoru a rotoru. Ve svém principu funguje synchro na podobném principu jako elektromotor. Do primární cívk

navinuté na rotoru je vpouštěn střídavý proud vytvářející magnetické pole. Na rotoru jsou navinuty 3 cívky se vzájemným úhlem 120° , na kterých se dle Faradayova zákona indukuje elektrické napětí v závislosti na vzájemné indukčnosti jednotlivých cívek statoru a rotoru. Tato indukčnost se mění natočením rotoru. To je znázorněno na obr. 11.



Obrázek 11: Schéma synchra[1]

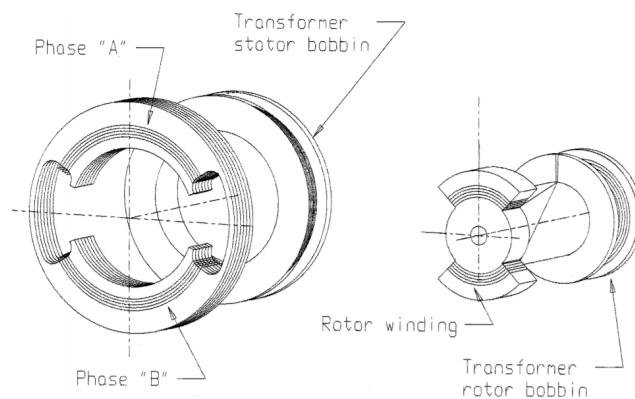
Mimo to jde také použít synchro jako slabý elektromotor, sloužící například k natočení ručičky měřícího přístroje. V takovém případě se zdroj proudu přivede na cívky statoru. Lze tedy pomocí dvojice syncho hodnotu úhlu snímat i analogově zobrazovat.

Při vyšších požadavcích na přesnost se používají vícerychlostní synchra. Zatímco u jednorychlostního provedení odpovídá perioda jednomu otočení hřídele o 360° , vícerychlostní se točí rychleji. Například 4-rychlostní synchro má periodu průběhu 90° , tedy signál vykoná 4 cykly každé plné otočení. Plným otočením je myšlen úhel 360° . Toho lze dosáhnout buď mechanicky, existují řešení pomocí ozubených kol, nebo konstrukcí vinutí na statoru o více pólech.

Synchro má oproti resolveru nevýhodu především v obtížnějším zpracování analogového signálu. S průběhem sinu a cosinu v případě resolveru se pracuje snáze.

4.2.2 Indukční potenciometr

Vinutí na indukčním potenciometru je rozmístěno na statoru a rotoru tak, jak je znázorněno na obr. 12. Tato metoda má oproti jiným několik nevýhod: (1) je potřeba více vinutí cívek, (2) senzor zabírá více místa, (3) potenciometr je citlivější



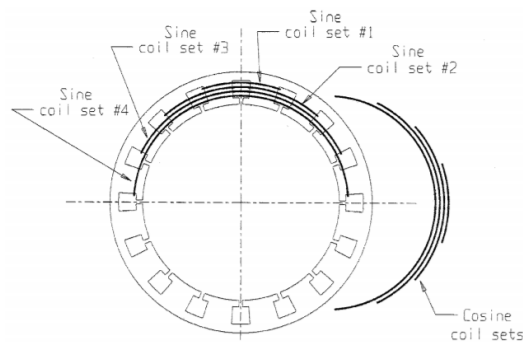
Obrázek 12: Indukční potenciometr[1]

na teplotní změny a (4) dochází ke vzniku většího fázového posuvu. Resolver, který popisují v následující části, se od indukčního potenciometru liší výměnou navinutí cívek, kde se použije víceústupňové navinutí, jak je znázorněno na obr. 13.

4.2.3 Resolver

Resolver je analogové zařízení měřící úhel otočení. Vychází z principu indukčního potenciometru zobrazeného na obr. 12.

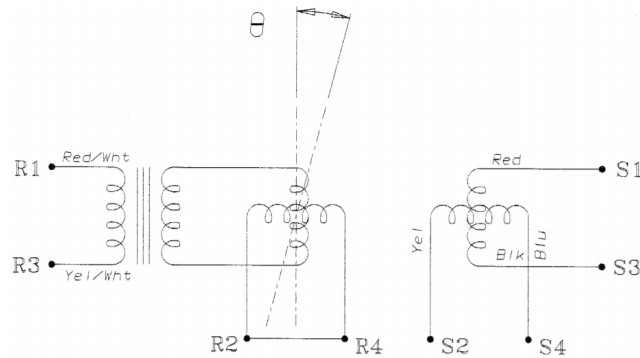
V případě resolveru jsou sekundární vinutí na statoru, zobrazená na obr. 12., nahrazena víceústupňovým vinutím, jak lze vidět na následující ilustraci obr.13. Takto lze dosáhnout přesné aproximace sinové vlny na výstupu jednoho sekundárního vinutí a cosinové vlny na výstupu druhého sekundárního vinutí. Tato aproximace lze dále zlepšit víceústupňovým vinutím na rotoru.



Obrázek 13: Vícestupňové vinutí resolveru[1]

Resolver v závislosti na změně úhlu mění amplitudu střídavého proudu gene-

rovaného na sekundárních vinutích. Amplituda opisuje již zmíněnou křivku sinu resp. cosinu. Tato data lze použít k získání informací o poloze a rychlosti rotace mechanického systému. Funguje tak jako analogový generátor trigonometrických funkcí. V praxi mají resolvery zpravidla dvě primární vinutí, vzájemně pootočená o 90°, na statoru a dvě sekundární vinutí, opět pootočená o 90°, na rotoru. Toto je znázorněno na schématu na obr. 15.

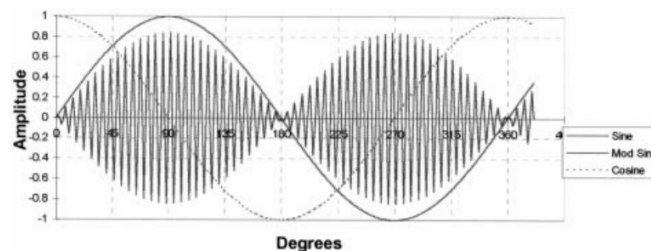


Obrázek 14: Schéma brushless resolveru[1]

Konfigurace řídicí vysílač (angl. Control transmitter)

Při snímání pustíme střídavý proud o frekvenci 5kHz do vinutí statoru R1-R3. Systém začne indukovat magnetické pole, které bude indukovat proud ve vinutí rotoru, do kterého se dostává bezkontaktně pomocí indukce mezi státorem a rotorem, a jehož amplituda bude úměrná $\cos(\theta)$ pro S1-S3 a $\sin(\theta)$ pro S2-S4. Tato závislost je znázorněna na již zmíněném obr. 15. Nulovou pozici definujeme například jako otočení rotoru vůči statoru, při kterém je napětí na S2-S4 minimální, zatímco napětí na S1-S3 je maximální. Pro získání obálky modulovaných výstupů je třeba demodulovat signál pomocí nízkofrekvenčního filtru.

Tato konfigurace se nazývá *řídicí vysílač* (angl. Control transmitter) a používá se ve většině moderních resolverů s digitálním zpracováním dat.

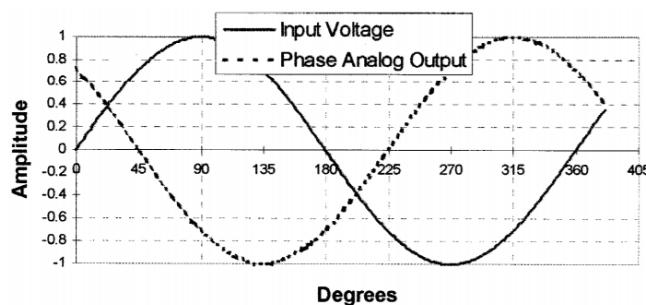


Obrázek 15: Výstup resolveru konfigurovaného jako řídicí vysílač[1]

Konfigurace řídicí transformátor (angl. Control transformer)

V tomto případě pouštíme do vinutí na statoru vstupní proud. Důležité je, aby byl proud na vinutí S2-S4 a S1-S3 posunut o 90° . V tomto případě zůstává amplituda i frekvence stejná jako hodnoty referenčního napětí, tedy napětí, které přivádíme na vinutí statoru.

Indukované napětí bude ale fázově posunuto oproti referenčnímu napětí. Ilustrace toho je na obr. 16. Porovnáním indukovaného a referenčního napětí získáme hodnotu fázového posuvu, z něhož lze dále určit úhel natočení rotoru. To se provádí měřením času, kdy jednotlivá napětí projdou nulou a počítáním rozdílu těchto časů.



Obrázek 16: Fázový posuv výstupního indukovaného napětí v zapojení řídicí transformátor[1]

4.3 Výhody a omezení elektromagnetických senzorů

Resolver je nejužívanějším senzorem pracujícím na elektromagnetickém principu a také je předmětem praktické části této práce, proto se v následujícím rozboru soustředím převážně na něj.

Resolver je analogové zařízení. Jeho teoretické rozlišení je tedy nekonečné. V realitě však jeho přesnost naráží na určité meze. Některé z nich uvedu dále.

Při odčítání absolutního úhlu vznikají na výstupu nejednoznačnosti, ke kterým je vhodné při konstrukci zařízení přihlížet a v případě potřeby navrhnout zařízení tak, aby bylo možné určit úhel jednoznačně. Takovým případem je i zařízení, jehož reverse-engineeringu se věnuji v další části této práce.

Resolver je častou volbou konstruktérů díky jeho mnoha pozitivním vlastnostem. Obecně platí, že vícepólový resolver dosahuje větší přesnosti než ostatní měřicí přístroje stejných rozměrů, hmotnosti a ceny.

Díky povaze konstrukce jsou resolversy odolné vůči vibracím, nárazům, znečištění i teplotnímu zatížení. To umožňuje jejich použití i v náročných odvětvích průmyslu, či v letectví a kosmonautice. Data z resolveru se zpracovávají analog-digital² kon-

²Dále AD konvertor, jedná se o zařízení, které mění analogový signál do digitální podoby.

vertorem. Vstupní signál E_x , který vpouštíme do vinutí dle konfigurace resolveru, je transformován na výstupu jako $E_x \sin(\Theta)$ resp $E_x \cos(\Theta)$ ³. Resolver-to-digital konvertor počítá úhel otočení dle vztahu,

$$\Theta = \arctan\left(\frac{E_x \sin(\Theta)}{E_x \cos(\Theta)}\right) \quad (11)$$

Elektrický a mechanický úhel si jsou rovny.

Se samotným převodem z analogového signálu na digitální se pojí chyba, která plyne z povahy digitálních dat, kde vždy bude na spojitý signál pouze určité množství diskretních bodů dané počtem bitů.

Ve vztahu (11) figuruje podíl signálu indukovaného na jednotlivých vinutích. V případě šumu v okolí se bude na obou vinutích vytvářet takřka stejné rušení a tedy se při zpracování signálu konvertorem vyruší. Podobný princip rovněž propůjčuje resolveru velkou schopnost teplotní kompenzace a tedy možnost pracovat za nepříznivých podmínek.

Resolvery jsou svou konstrukcí a funkcí podobné elektromotorům, což z nich dělá přirozenou volbu pro jejich řízení v řadě odvětví, jelikož jsou svou odolností proti vnějším vlivům podobné elektromotorům.

Resolvery jsou používány v průmyslových odvětvích, kde se využije jejich odolnost proti nečistotám, např. u obráběcích strojů, či lisů, kde dochází k znečištění optických měřících systémů. U pohyblivých robotů a pojízdných plošin se využívá dobré odolnosti resolverů vůči nárazům a vibracím. Resolvery jsou využívány i v petrochemickém průmyslu a leteckých motorech, kde již potvrdily svou vysokou robustnost a odolnost.

³Toto platí uvažujeme-li pouze dvoupólový resolver, kterému jsem se v této kapitole převážně věnoval. V případě více pólů se zpracování výstupu stává komplikovanějším.

5 Komunikace se senzory

5.1 Protokoly

Komunikační protokol je konvence nebo standard podle kterého probíhá elektronická komunikace mezi dvěma koncovými body. Zjednodušeně lze prohlásit, že protokol definuje syntaxe, sémantika a synchronizace vzájemné komunikace. [7] Protokoly lze rozdělit na otevřené a uzavřené.

5.1.1 Uzavřené protokoly

Jsou patentované a jsou tedy předmětem autorského práva. V praxi to znamená, že je nutné zakoupit licenci, případně zaplatit poplatek za návrh a používání vlastního rozhraní s protokolem. Důsledkem je menší množství produktů kompatibilních s daným protokolem, než je tomu u otevřených protokolů. Zařízení používající uzavřený protokol jsou v podstatě "černé skříňe", což vyjadřuje způsob, jakým na celý systém nahlížíme, který je znázorněn na obr. 17.



Obrázek 17: Způsob náhledu na černou skříňku[8]

Specifikace uzavřeného protokolu jsou přístupné pouze autoru patentu, nikoli veřejnosti. Mezi nejběžnější typy proprietárních protokolů pro enkodéry patří EnDat a HIPERFACE.

5.1.2 Otevřené protokoly

Nepodléhají patentu a tedy ani autorskému právu. Jejich specifikace jsou volně přístupné veřejnosti. To znamená, že podrobnosti o formátu přenosu dat a elektrických systémech jsou bezplatně dostupné vývojářům a výrobcům produktů, které komunikační protokoly používají. To má za důsledek větší množství produktů kompatibilních s daným systémem. Běžné typy otevřených protokolů jsou Synchronous Serial Interface (Synchronní sériové rozhraní), pro nějž se používá zkratka SSI, či novější Bi-directional Synchronous Serial Interface (Obousměrné synchronní sériové rozhraní), BiSS. Druhý jmenovaný představuje alterativu k obousměrným uzavřeným protokolům.

5.1.3 Srovnání protokolů

Výhodou uzavřeného protokolu je především jednoduchost a bezproblémovost jeho aplikace v daném použití. Konfigurace komunikačních protokolů jsou obvykle již přednastavené, což šetří čas a cenu vývoje. Použití uzavřeného protokolu je vhodné především pokud uživatel preferuje produkty daného výrobce a vlastníka práv k protokolu a vyhovuje mu spoléhat se v budoucnu pouze na jeho výrobky. V takovém případě je třeba zaplatit licenční poplatek a je vhodné počítat s omezenou možností volby ve srovnání s otevřeným protokolem.

Přednosti otevřeného protokolu lze rozdělit do tří hlavních bodů.

- *Dostupnost* - Pro každý otevřený protokol je k dispozici řada výrobců, což vede k většímu výběru zařízení.
- *Cena* - Jelikož mají výrobci uzavřených protokolů přirozený monopol, mohou řídit cenu. To u otevřených protokolů neplatí a díky konkurenčnímu boji existuje tlak na co největší snížení ceny.
- *Informace* - U uzavřených protokolů jsou k dispozici pouze informace, které se výrobce rozhodne poskytnout. Oproti tomu může zákazník s dostatkem znalostí najít u otevřených protokolů všechny informace, které ve své aplikaci považuje za důležité.

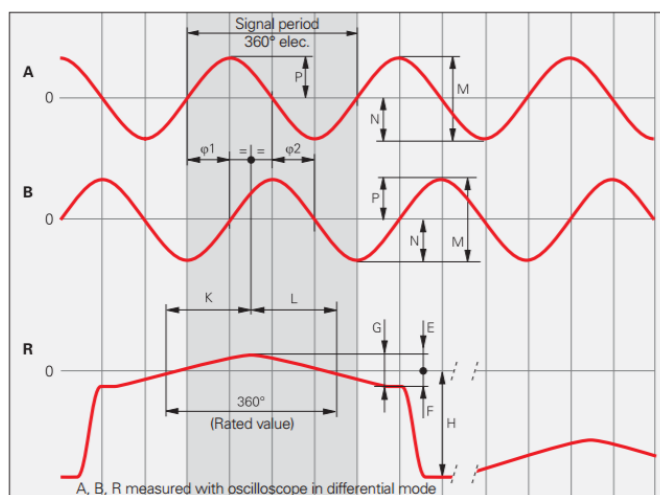
5.2 Základní principy přenosu dat

5.2.1 Inkrementální signál $\sim V_{PP}$

Enkodéry HEIDENHAIN se $\sim V_{PP}$ pracují s napětím, které lze vysoce interpolovat. Inkrementální signály A a B jsou fázově posunuty o 90° , jak je vidět na obr. 18. Na obrázku je také znázorněn referenční signál R, který má použitelnou část G odpovídající přibližně 0,5V.

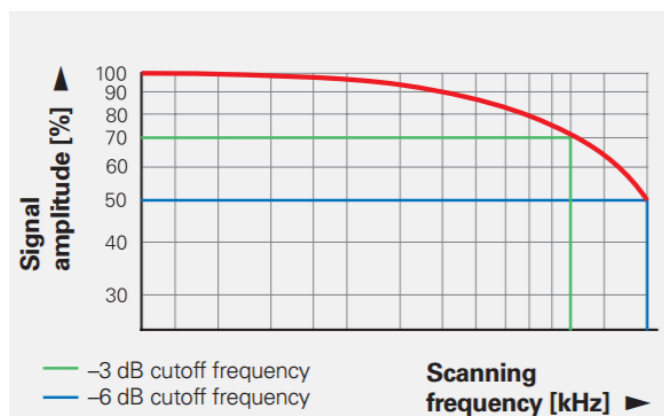
Amplituda signálu je zaregistrována, když je zdroj napájení uvedený ve specifikacích součásti připojen k enkodéru. Tato hodnota je měřena diferenciálně na 120Ω resistoru mezi dvěma asociovanými výstupy. Amplituda signálu se snižuje se zvyšující se frekvencí. **Mezní frekvence** udává skenovací frekvenci, při které je neporušeno určité procento původní amplitudy signálu. Je zřejmé, že porušení peaku amplitudy je nežádoucí a vede k nepřesnosti. Mezní frekvence je měřena v decibelech. Příklady mezních frekvencí jsou:

- -3 dB : 70% amplitudy signálu
- -6 dB : 50% amplitudy signálu



Obrázek 18: Signál $\sim V_{PP}$ [9]

Funkce průběhu závislosti úbytku amplitudy v závislosti na skenovací frekvenci je znázorněna na obr. 19. Jedná se o obecný případ, a tedy je bez konkrétních hodnot frekvence.



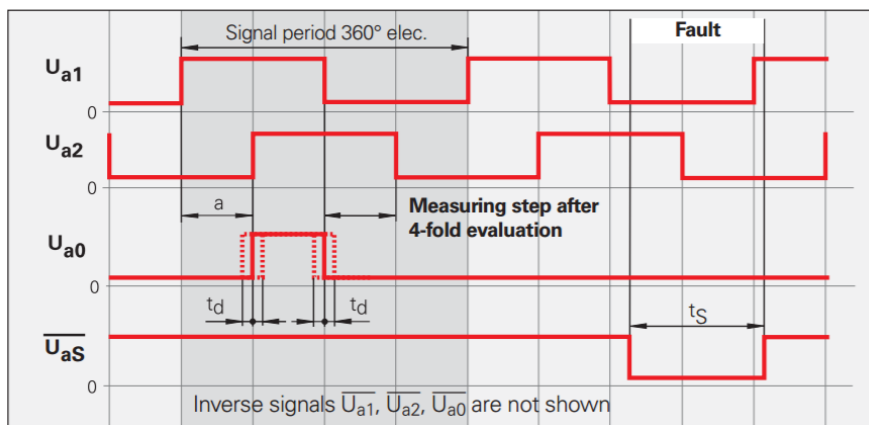
Obrázek 19: Průběh funkce závislosti úbytku amplitudy na skenovací frekvenci v obecném případě $\sim V_{PP}$ [9]

Interpolace, rozlišení a měřící krok

Výstupní signál rozhraní 1 V_{PP} je obvykle interpolováno následující elektronikou za účelem získání vysokého rozlišení. Pro řízení rychlosti se interpolační faktor pohybuje běžně v řádech vyšších než 10^3 , aby byla získána použitelná informace o rychlosti, a to i při nízkých rychlostech. Výrobce udává, že při měření polohy je doporučený krok vždy uveden v dokumentaci, ale pro zvláštní aplikace lze použít i jiné rozlišení.

5.2.2 Inkrementální signál \square TTL

Enkodéry s \square TTL⁴ obsahují elektroniku, která digitalizuje sinusoidální signály. Digitalizace může probíhat buď za pomoci interpolace nebo bez ní. Inkrementální signály jsou přenášeny jako čtvercové vlny U_{a1} a U_{a2} vzájemně posunuté o 90° . Referenční signál je přenášen pomocí jednoho, či více referenčních pulsů U_{a0} . Kromě zmíněných signálů se přenáší ještě jejich inverzní signály $\overline{U_{a1}}$, $\overline{U_{a2}}$ a $\overline{U_{a0}}$, které slouží k potlačení vlivu elektrického šumu. Dalším přenášeným signálem je signál detekce poruchy $\overline{U_{aS}}$. Následující elektronika musí být schopna detekovat každou hranu čtvercového pulzu. Minimální vzdálenost hran čtvercových signálů U_{a1} a U_{a2} a je uvedena ve specifikacích dokumentace. Díky času přenosu se tato vzdálenost snižuje o 0.2 ns na metr. Maximální rychlost rotace hřídele nesmí být překročena. Průběh tohoto signálu je znázorněn na obr. 20.

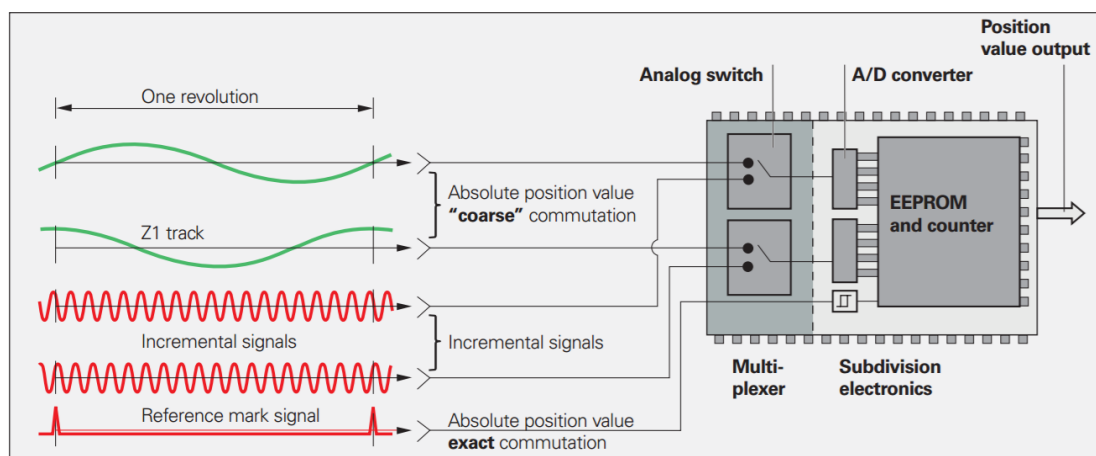


Obrázek 20: Diagram průběhu signálu v inkrementálních signálech \square TTL [9]

5.2.3 Přenos signálů pro sinusoidální komunikaci

Přenosové signály C a D jsou vzaty z tzv. Z1 vedení a tvoří funkci sinu a cosinu s periodou odpovídající jedné otáčce. Spolu s již zmíněným analogovým inkrementálním signálem a referenční značkou přenáší informaci, která je dále zpracována. Nejprve putuje do analogového přepínače, poté A/D konvertoru a digitální signál je zpracován v mikropočítači, jehož výstupem je informace o pozici. Celý proces je znázorněn na obr. 21.

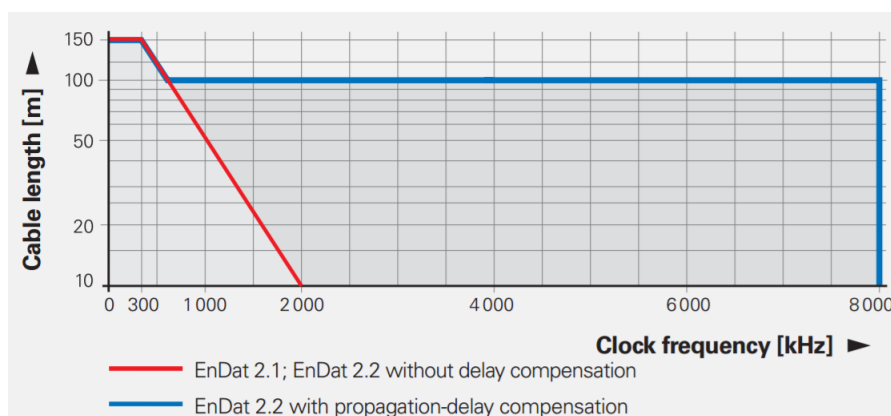
⁴TTL značí v tomto kontextu tranzistor - tranzistor logický způsob komunikace pomocí binárních pulzů



Obrázek 21: Diagram zpracování sinového signálu[9]

5.3 Protokol EnDat

EnDat je digitální, obousměrné rozhraní pro enkodéry. Je schopno přenášet informace o poloze z absolutních, a ve verzi EnDat 2.2 také inkrementálních, enkodérů. Je také schopen čtení a aktualizace informací uložených v enkodéru, či ukládání nových informací. Využívá sériovou komunikaci, díky čemuž jsou požadovány pouze čtyři linky, po kterých je signál přenášen. Přenos dat je synchronizován s hodinovým signálem. Hodinový signál určuje frekvenci, na které probíhá přenos dat. Vyšší pracovní frekvence umožňuje přenos většího množství dat. Při vyšší délce přenosového kabelu je pro zachování vysoké pracovní frekvence nutná kompenzace doby přenosu, jak je znázorněno na obr. 22.



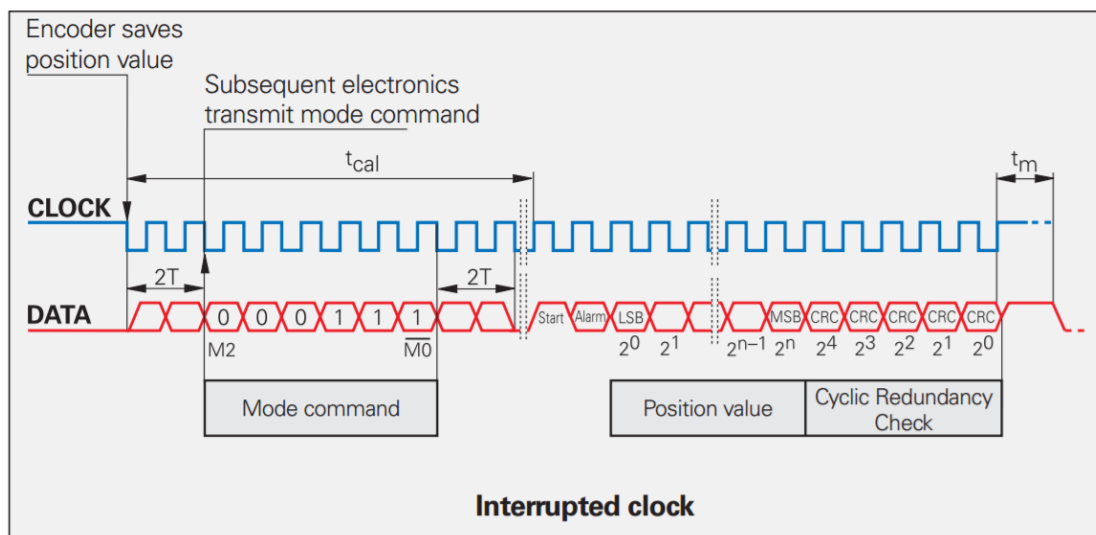
Obrázek 22: Vliv kompenzace zpoždění signálu na pracovní frekvenci[9]

5.3.1 EnDat 2.1 a 2.2

Stejně jako ostatní protokoly se i EnDat neustále vyvíjí a jeho možnosti i přesnost se zvyšují. V této sekci provedu rozbor starší verze 2.1 i novější verze 2.2 a srovnám je.

EnDat 2.1 přenáší data za pomoci přerušovaného hodinového signálu (stejně, jako tomu je ve verzi 2.2) nebo pomocí spojitého hodinového signálu.

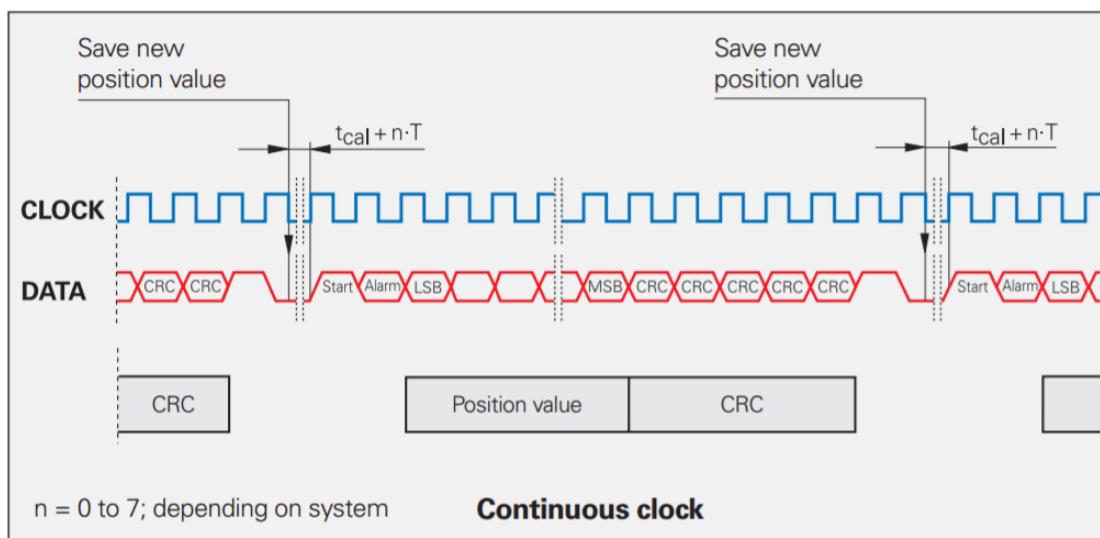
Přerušovaný hodinový signál (obr. 23) je vhodný především pro časované systémy, jako například kontrolní smyčky. Cyklus začíná spuštěním hodinového signálu, poté dojde k přenosu jednotlivých dat v pořadí: příkaz nastavení módu, přenos informace o pozici a poté cyklický redundantní součet⁵. Nakonec je hodinový signál nastaven na HIGH po 10 až 30 μ s.



Obrázek 23: Přenos signálu při přerušovaném hodinovém signálu[9]

Kontinuální hodinový signál (obr. 24) je vhodný pro aplikace, kde vyžadujeme rychlou odezvu signálu. Okamžitě po vyslání posledního bitu cyklického redundantního součtu (CRC) je signál na datové dráze nastaven na HIGH na jednu dobu stanovenou hodinovým signálem a poté na LOW, jehož délka závisí na systému. V této chvíli je nová hodnota pozice uložena. Poté je přenesen startovní a poruchový bit. Po něm již následuje přenos informace o poloze.

⁵Cyklický redundantní součet, označovaný CRC z anglického Cyclic redundancy check je funkce, používaná pro detekci chyb během přenosu či ukládání dat. Jedná se o zobečňenou formu kontrolního součtu



Obrázek 24: Přenos signálu při kontinuálním hodinovém signálu[9]

EnDat 2.2 je schopen vykonávat stejné funkce jako EnDat 2.1. Již neobsahuje spojitý hodinový signál, což je důsledkem rozvoje techniky, díky kterému již není zapotřebí interpolace spojitého signálu pro získání potřebné přesnosti.

Verze 2.2 umožňuje přenášet kromě dat o poloze i další dvě informace. Každá další informace je dlouhá 30 bitů a začíná jedním bitem s hodnotou LOW a končí CRC kontrolou. Celá struktura signálu je znázorněna na obr. 24.

Signály nesoucí další informace mohou přenášet hodnoty určité veličiny.

Pro *informaci 1* to může být například diagnostika, hodnota pozice 2, parametry paměti nebo teplota.

Pro *informaci 2* to může být například komunikace nebo zrychlení.

V následující tabulce jsou shrnuty funkce EnDatu verze 2.1 a 2.2.

Jak je i z tabulky patrné, tvoří EnDat 2.2 nastavbu na funkce verze 2.1 a ponechává si funkce předchozí verze, oproti verzi 2.1 má výhody, mezi které patří například existence jednoho rozhraní pro absolutní a inkrementální enkodéry, možnost přenosu další informace, například teploty nebo zrychlení a zlepšení celkové kvality přenášených dat.

Příkazy módu

<ul style="list-style-type: none">• Enkodér vysílá hodnotu pozice• Výběr oblasti paměti• Enkodér obdrží parametry• Enkodér vysílá parametry• Enkodér obdrží reset¹⁾• Enkodér vysílá testovací hodnoty• Enkodér obdrží testovací příkazy	2.1. EnDat	2.2. EnDat
<ul style="list-style-type: none">• Enkodér vysílá hodnotu pozice s další informací• Enkodér vysílá hodnotu pozice a přijímá výběr oblasti paměti²⁾• Enkodér vysílá hodnotu pozice a přijímá parametry²⁾• Enkodér vysílá hodnotu pozice a vysílá parametry²⁾• Enkodér vysílá hodnotu pozice a přijímá chybový reset²⁾• Enkodér vysílá hodnotu pozice a přijímá testovací příkaz²⁾• Enkodér přijímá komunikační příkaz³⁾		

1) Systém se chová stejně jako při vypnutí a zapnutí proudu.

2) Vybraná další informace je také poslána.

3) Reservováno pro enkodéry, které nepodporují bezpečnostní systém.

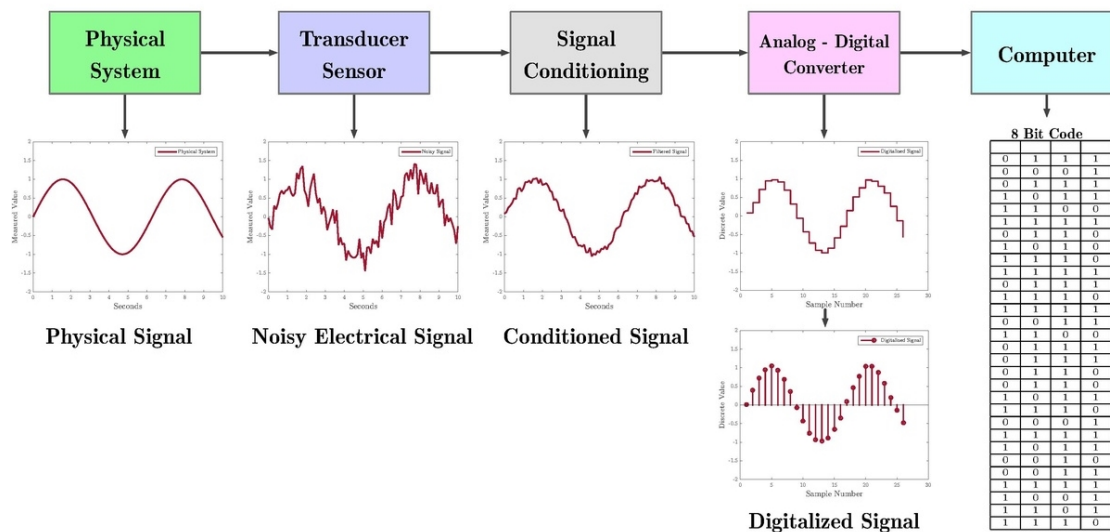
Tabulka 1: Porovnání funkcí EnDatu 2.1 a 2.2

5.3.2 AD převod a diskretizace dat

Mikropočítače, osobní počítače, ani jiná elektronika, není schopna zpracovat analogové signály v jejich původním stavu. Proto je schopnost konverze analogového signálu do digitální formy nezbytná pro implementaci senzorů do mechatronických systémů.

Nejprve se v případě potřeby provedou kroky k odstranění šumu ze signálu. Dále probíhá samotná digitalizace dat, při které se v časových intervalech daných pracovní frekvencí senzoru snímají hodnoty analogového signálu v diskretní okamžiky. Výsledkem je pole dat. Není potřeba zaznamenávat čas získání jednotlivých dat, jelikož se jedná o vlastnost danou pořadím a snímací frekvencí. Celý proces je názorně ilustrován na obr. 25. Důležitým konceptem při digitalizaci dat, který se také přímo dotýká tématu praktické části této práce, je kvantování signálu.

Kvantování signálu je definováno jako transformace, resp. diskreditace, spojitého analogového signálu do řady diskretních stavů. Nejprve se provede *vzorkování signálu*, při kterém se odečtou konkrétní hodnoty analogového signálu. Jelikož je informace o signálu dále zpracována digitálně, je pro každou hodnotu vymezen určitý počet bitů. To znamená, že hodnoty kvantovaného signálu mohou nabývat pouze určitého počtu hodnot, tzv. kvantizačních hladin. Vzorkovaný



Obrázek 25: Znázornění postupu digitalizace analogového signálu[10]

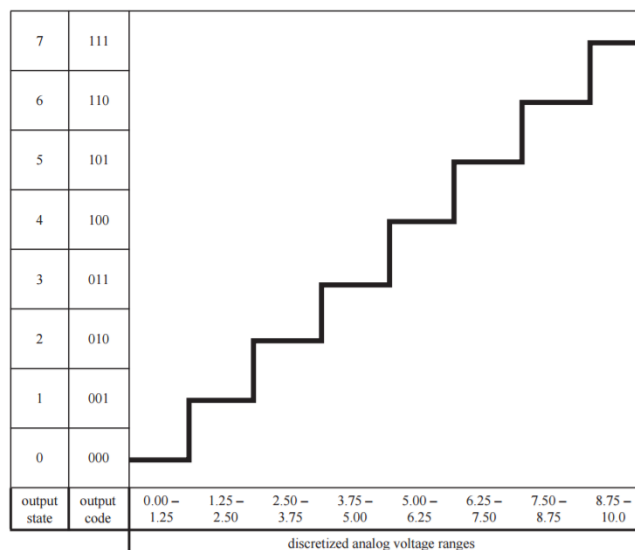
signál se na tyto hodnoty zaokrouhluje.

Počet kvantizačních hladin odpovídá počtu bitů vyhrazených pro přenos signálu a platí vztah

$$N = 2^n \tag{12}$$

kde N je počet kvantizačních hladin a n je počet bitů. To je znázorněno na obr. 26., kde je vidět, že každé z osmi možných hodnot při zápisu pomocí tří bitů odpovídá interval napětí, znázorněný na horizontální ose.

Je zřejmé, že rozlišení při kvantování hodnot má zásadní vliv na přesnost senzoru, což je jeden z důležitých bodů, který zvažují při analýze úhlového snímacího systému.



Obrázek 26: Znázornění kvantování signálu na diskrétní hodnoty vyjádřené binárním kódem[1]

6 Teoretický návrh oživení absolutního úhlového snímacího systému IMAS

6.1 Popis soustavy

Zkoumaný úhlový snímací systém IMAS se skládá z mechanického systému převodů a tří resolverů, které označuji jako R1, R2 a R3, jejichž poloha je také vyznačena na obrázku.

Mechanické převody jsou celkem 4, jak lze vyčíst i z obrázku níže. V systému jsou použity dva druhy plastových ozubených koleček s počty zubů $z_1 = 14$ a $z_2 = 56$. Platí tedy zřejmě $i_{n\ n+1} = \frac{56}{14} = 4$. Jednotlivá kolečka jsou vždy upevněna v páru na hřídeli zapuštěné do desky senzoru a platí, že ozubené kolo s počtem zubu z_1 je spojeno s ozubeným kolem s počtem zubů z_2 na další hřídeli.

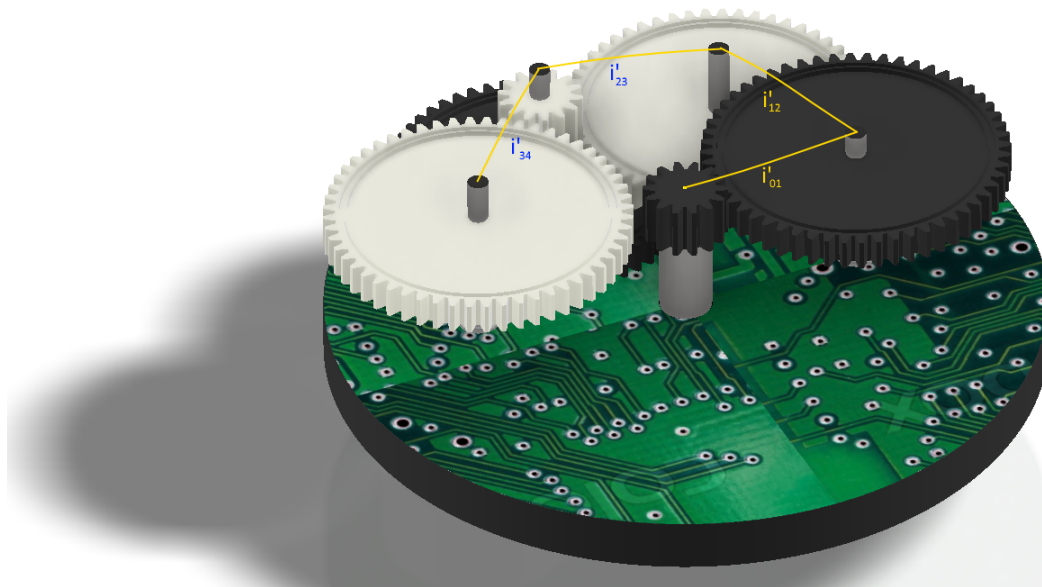
Z hlediska dalšího modelování je tomuto systému ekvivalentní následující nahrazení převodových poměrů.

$$i_{12} = i'_{01} \cdot i'_{12} = 16 \quad (13)$$

$$i_{23} = i'_{23} \cdot i'_{34} = 16 \quad (14)$$

Mezi ozubenými koly existuje vůle. Lze ji experimentálně změřit například sledováním bitového výstupu na resolveru S3 a otáčením hlavní hřídele o známý úhel.

Zpracování signálu probíhá do určité míry integrovaně přímo v senzoru a



Obrázek 27: Model mechanického systému v softwaru Autodesk Inventor

připojené elektronice. Výstup, který dále zpracováváme, pak odpovídá grafu na obr. 30 a jedná se tedy o závislost úhlu natočení a bitové hodnoty.

Pro resolver S1 použijeme 20-bitovou interpolaci, která odpovídá úhlovému rozlišení 0.00034° , což lze považovat ve srovnání s nepřesnostmi způsobených jinými vlivy za takřka spojitě rozdělení. Pro ostatní resolvers jsme zvažovali i jiné bitové rozlišení. Máme k dispozici například 12 bitů, které odpovídají rozlišení 0.088° . Díky pokroku v době mezi konstrukcí snímacího systému a psaním této práce můžeme však snímat s přesností 20 bitů informaci ze všech resolverů.

6.2 Přesnost a možnosti resolveru a přenosu dat

6.2.1 Kvantizační chyba výstupu signálu z resolveru

Problém diskreditace signálu a vzniklé nepřesnosti již byl popsán na konci rešeršní části. V případě snímání úhlového otočení se bity namapují na kružnici, kde poté určité rozmezí úhlu odpovídá danému bitu. Na následující tabulce jsou shrnuty některé používané hodnoty bitů, počet hodnot, kterých takový přenos může nabývat a úhel, který připadá na jeden bit.

Počet bitů	Počet nabývaných hodnot	Úhlové rozlišení
8	256	1.41°
10	1024	0.35°
12	4096	0.088°
16	65 536	0.0055°
20	1 048 576	0.000 34°
21	2 097 152	0.000 17°

V následující demonstraci, též znázorněné na obr. 28, je výseč kruhu rozdělena po 20°, ale tento koncept je obecný pro digitální měření polohy. Spadne-li výsledný úhel natočení do oblasti odpovídající např. bitu n , lze, za předpokladu absolutní přesnosti a nulové vůle, prohlásit, že se měřený úhel nachází v rozmezí $\phi \in < 20^\circ, 40^\circ$). Nelze ale získat přesnější informaci v rámci úseku určeného bity.⁶

6.2.2 Povaha výstupu z resolveru a chyba způsobená šumem

Základním stavebním prvek senzoru jsou tři resolvery, jejichž princip již byl popsán v rešeršní části. Při zpracování signálu přihlížíme jednak k modulaci amplitudy s průběhem sinus, resp kosinus a také k fázovému posunu. Výsledkem je průběh úhel daný pro $< 0; \frac{\pi}{2}$) a kombinace fází, která tento průběh přiřadí do kvadrantu jednotkové kružnice goniometrické funkce.⁷ Toto je znázorněno na obr. 29.

Šum signálu

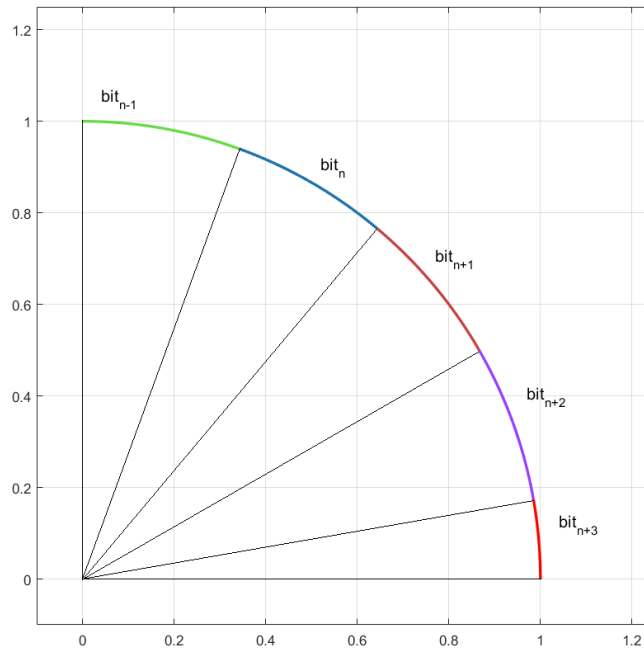
Signál není dokonale odstíněný a vzniká na signálu jistý šum. Pro přenos pomocí 20 bitů se šum pohybuje kolem 50 inkrementům. To odpovídá asi $\frac{5}{1000}\%$.

6.3 Multi-turn detekce úhlu

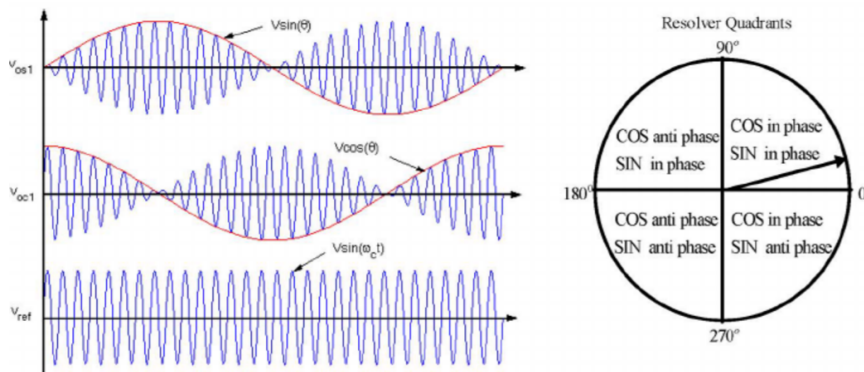
Absolutní úhlový snímač byl navržen tak, aby pomocí soustavy ozubených kol byl schopen kdykoli určit absolutní natočení v daném rozsahu bez nutnosti ukládání

⁶Toto platí s výjimkou mechanicky spojených částí, kde lze přiblížit tuto oblast pomocí jiného resolveru. Tvrzení je však platné, mluvíme-li o osamoceném resolveru.

⁷Zpracování dat z resolveru na této úrovni je provedeno vnitřně v oživaném senzoru a není v této práci předmětem detailnějšího zkoumání.



Obrázek 28: Příklad mapování bitů na úhel otočení



Obrázek 29: Průběh výstupu resolveru mezi 0° až 360° [11]

hodnot pomocí inkrementální funkce. Samotná inkrementální funkce při běhu systému se z praktických důvodů používat může, ale důležitou vlastností je schopnost určit absolutní natočení ihned po zapnutí, například po výpadu proudu, bez nutnosti ukládání poslední hodnoty do pevné paměti.

Hlavní hřídel je mechanicky spojena s vedlejšími hřídeli, na kterých lze odečítat počet otočení hlavní hřídele n_{turn} , dále značeno jako $turn_n$ a získáme tedy absolutní úhel.

Při rozmezí 256 otáček je potřeba diskutovat rozlišovací schopnost resolveru. Díky

pokroku v technologii a s ním spojenou větší dostupnost snímacích zařízení s více bity je možné, že v současné době již postačuje odečítání hodnoty ze třetího resolveru R3 a resolver R2, který je spojen s hlavní hřídelí s převodovým poměrem 16 lze zcela vynechat. Tuto možnost je tedy vhodné zanalyzovat a diskutovat.

6.4 Multi-turn detekce za použití resolverů R1 a R3

Pro *8 bitů* bude odpovídat jednomu celému otočení hlavní hřídele $\frac{256}{256} = 1$ hodnota na hřídeli S3.

Pro *12 bitů* bude odpovídat jednomu celému otočení hlavní hřídele $\frac{4096}{256} = 16$ hodnot na hřídeli S3.

Pro *16 bitů* je situace lepší a k dispozici je $2^4 \times$ více hodnot, tedy 256 hodnot na jedno otočení. Situace je již lepší a pokud by v systému neexistovala vůle, a tedy průběhy funkcí byly přesně srovnané, jako je tomu na obr. 30. Při praktické realizaci systému tohoto však nedocílíme a nastává otázka, zda je rozlišení 22.5° v případě 12 bitového snímání dostačující.

V případě použití *20 bitů* dostáváme 4096 hodnot na resolveru R3 pro jednu rotaci hlavní hřídele (R1).

Pro získání absolutního úhlu, resp. hodnotu bitů odpovídajících určitému úhlu, lze použít, s omezeními, které budu podrobněji rozebírat dále, následující funkci:

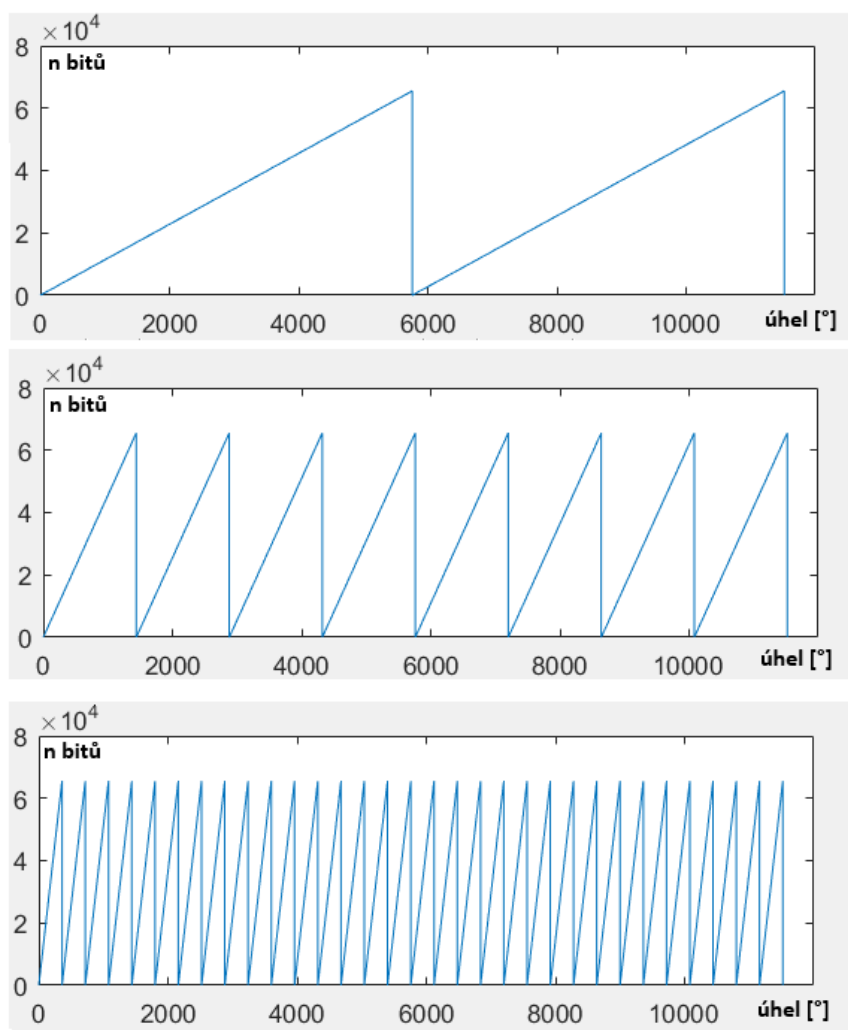
```

1 function GetAbsAngle = GetAbsAngle(quantizes1, quantizes3, ...
    nbits1, nbits3)
2 % vstupy quantizes1 a quantizes3 představují výstupní hodnotu ...
    bitů z resolveru S1 a S3
3 % vstupy nbits1 a nbits3 představují maximální bitovou hodnotu ...
    2^n pro odpovídající resolversy
4 nturn = floor((quantizes3)/(nbits3)*256);
5 % tato funkce dáva počet celých otočení hlavní hřídele
6 GetAbsAngle = nturn*360 + quantizes1/nbits1*360;
7 % výstup odpovídá absolutnímu úhlu ve stupních
8 end

```

6.4.1 Multi-turn detekce za použití resolverů R1, R2 a R3

V případě použití dvou resolverů k multi-turn detekci dojde k výraznému zvýšení rozlišení, jelikož o hodnotách $n = i \times 16, i \in \langle 1, 15 \rangle, i \in \mathbb{N}$, nyní bude rozhodovat resolver R2. V tomto případě bude například 12-bitové rozlišení na resolveru R2 poskytovat 256 hodnot na jedno otočení hlavní hřídele s resolverem R1. O absolutním natočení resolveru R2 v tomto případě rozhodne resolver R3, u kterého, za předpokladu 12-bitového snímání jeho hodnot, má 256 hodnot na jedno otočení hřídele nesoucí resolver R3.



Obrázek 30: Ilustrace průběhu výstupů ze tří resolverů při 16 bitovém přenosu. Převodní poměr neodpovídá analyzovanému systému, jelikož je pro demonstraci nepraktický.

Celá funkce, za stejných předpokladů jako funkce R1 a R3, tedy nulové vůle, vypadá následovně:

```

1 function GetAbsAngle = GetAbsAngle(quantizes1,quantizes2, ...
   quantizes3, nbits1, nbits2, nbits3)
2 % funkce quantizes1, quantizes2 a quantizes3 představují ...
   výstupní hodnotu bitů z resolveru S1,S2 a S3
3 % vstupy nbits1, nbits2 a nbits3 představují maximální bitovou ...
   hodnotu 2^n pro odpovídající resolvery
4 nturn23 = floor((quantizes3)/(nbits3)*16);
5 % tato funkce dáva počet celých otočení hřídele s resolverem ...
   R2, tedy v rozmezí 0 až 15
6 nturn12 = floor((quantizes2)/(nbits2)*16);
7 % tato funkce dáva počet celých otočení hlavní hřídele z ...
   pohledu snímání resolverem R2, tedy v rozmezí 0 až 15
8 GetAbsAngle = nturn12*360 + nturn23*360*16 + ...
   quantizes1/nbits1*360;
9 % výstup odpovídá absolutnímu úhlu ve stupních
10 end

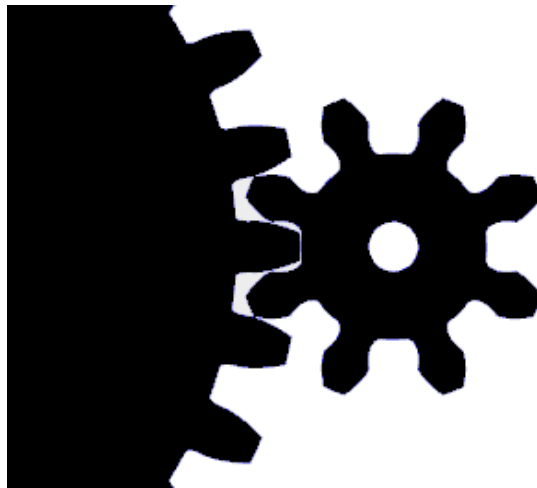
```

6.5 Vůle a její vliv na funkci a přesnost systému

6.5.1 Zhodnocení možných hodnot vůle a vliv na funkčnost soustavy

Po zapnutí systému nemáme bez pohybu systému možnost, jak určit přesně hodnotu natočení, jelikož neznáme přesnou polohu vůle.

Neutrální hodnota vůle, tedy oblast, kde považujeme vůli za nulovou, je symetrická. To je také znázorněno na následujícím obr. 31.

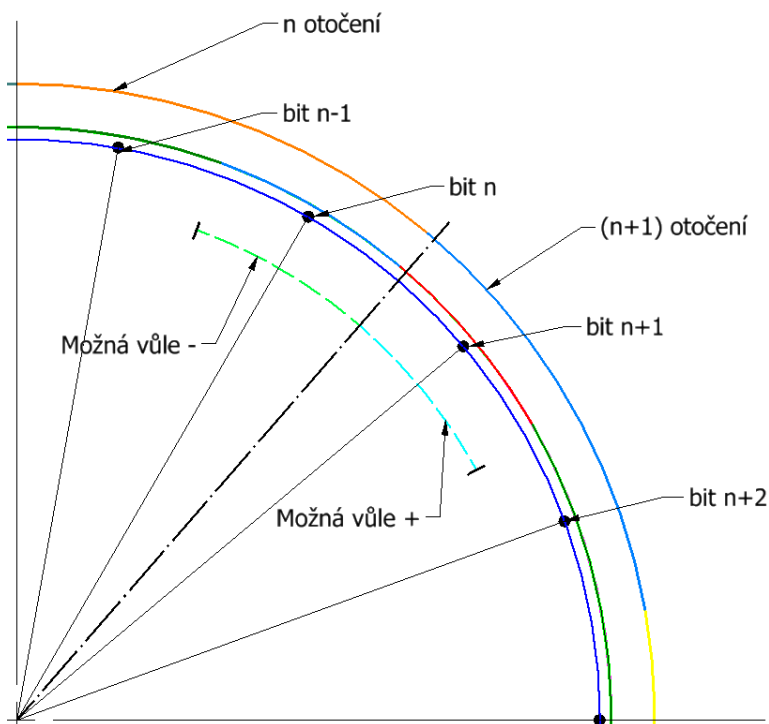


Obrázek 31: Znázornění neutrální vůle, kde je mezi zuby stejná vůle na obou stranách.

Důležitým poznatkem, který je možné potvrdit pouze ruční manipulací se senzorem, je, že hodnota vůle vyjádřené v rotaci hlavní hřídele vůči hřídeli s resolverem S3 je menší než 90 stupňů, $\Delta\varphi_1 < 90^\circ$. Význam tohoto tvrzení bude jasný po následujícím rozboru.

Struktura promítutí bitů na kružnici.

Jak již bylo výše naznačeno, mapují se jednotlivé bity na kružnici, jak je ilustrováno na obr. 32. Ačkoli na ně lze nahlížet jako na body, je také vhodné přihlížet k faktu, že každému bodu na kružnici je přiřazena určitá bitová hodnota a bity se tedy promítají jako kružnicový oblouk. Jedné rotaci hlavní hřídele odpovídá více bitů na výstupu resolveru S3. V konkrétním případě zkoumaného snímacího systému je to $\frac{4096}{256} = 16$. V důsledku vůle může nastat situace, kde sice snímáme bit_{n+1} , vyznačený červeně, ale systém se ve skutečnosti nachází v bit_n , jenž je vyznačen modře. Jelikož se tyto dva bity nachází na pomezí n a $(n+1)$ otočení, vzniká zde problém, který bez dalšího ošetření může způsobit chybu 360° .



Obrázek 32: Znázornění neutrální vůle, kde je mezi zuby stejná vůle na obou stranách.

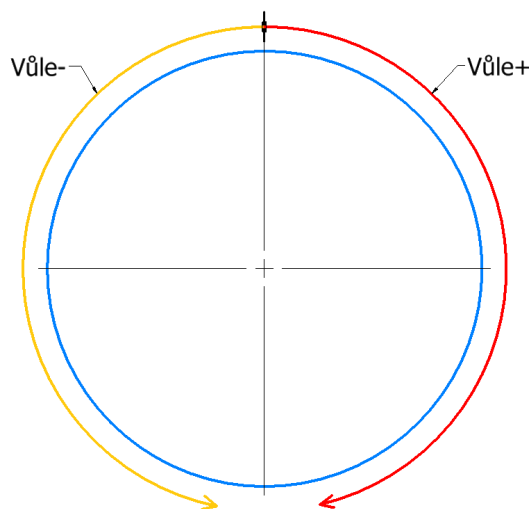
6.6 Teoretické řešení za použití dvou resolverů

6.6.1 Příklad dostatečně nízké velikosti vůle umožňující určit přesně absolutní úhel

Relativní konfigurace resolveru S3 vůči S1 se může pohybovat v rozmezí určeném vůlí, která je v soustavě rozmístěna na spojích ozubených kol.

Změříme-li vůli na hlavní hřídeli a sledujeme změnu bitu na S3, získáme vůli systému v úhlu ϕ_1 . V nejhorším případě natočení resolveru S3 přesně na rozhraní dvou celých otočení $turn_n$ a $turn_{n+1}$, jak je znázorněno na obr. 33, se můžeme podívat na hodnotu S1, která nám pomůže s určením skutečné hodnoty $turn$.

Je důležité, aby vůle mezi S1 a S3 nebyla vyšší než 180° . Pokud by tomu tak bylo, je nemožné určit se dvěma resolvery bez další informace přesný absolutní úhel.



Obrázek 33: Znázornění vlivu dostatečně nízké vůle na schopnost přesně určit absolutní úhel, promítnuto na hřídel snímanou resolverem S1.

Umístíme-li hodnotu resolveru S3 na již zmíněné rozhraní počtu otočení hlavní hřídele, můžeme použít následující úvahu.

(1) Vůle je menší než 180° na hlavní hřídeli.

(2) Pokud platí podmínka (1), je zřejmé, že v důsledku vůle nemůže nastat situace, kde spadá bit na S3 do spodní části intervalu odpovídajícím otočení $turn_n$ a zároveň spadat do $turn_{n+1}$. Může však spadat do $turn_{n-1}$.

(3) Jelikož platí (1) a (2), lze v případě detekce blízkosti bodu neurčitosti odečíst hodnotu z resolveru S1. Pokud bude v intervalu $\langle 0, \pi \rangle$, resp. $\langle 0, vule \rangle$, kde $vule$ je vůle odpovídající úhlu otočení na hlavní hřídeli, a zároveň hodnota na

S3 spadá do vyšších hodnot⁸ v rámci intervalu bitů odpovídajících otočení $turn_n$ je zřejmé, že vůle měla za efekt snížení hodnoty počtu otočení a platí $turn_n = turn_n + 1$.

Tento myšlenkový postup je naprogramován v následujícím skriptu v softwaru Matlab.

```

1 resitelne = 1; % počáteční hodnota potřebná kvůli ...
   určení řešitelnosti s ohledem na vůli
2 S1 = get(S1); % získání hodnoty z resolveru S1
3 S3 = get(S3); % získání hodnoty z resolveru S3
4 prompt = 'Zadejte vůli ve stupních vůči úhlu hlavní hřídele Fi_1';
5 vule_bit = input(prompt); % uživatelský input změřené vůle
6 vule = vule_bit*360/nbits3*256;
7
8 trans_ratio = 256; % převodní poměr mezi hlavní ...
   hřídelí a hřídelí S3
9 nbits1 = 1048576; % počet hodnot, kterých nabývá ...
   výstup S1
10 nbits3 = 4096 % počet hodnot, kterých nabývá ...
   výstup S3
11 if(vule>=180)
12     resitelne = 0;
13 end
14 vule_bit = ceil(vule/(360*256)*4096); % počet bitů, přes ...
   které může vůle zasahovat
15 n_turn = floor(S3/nbits3*256); % odhad počtu otočení ...
   bez uvažování vůle
16 bit_per_rev = floor(trans_ratio/nbits3); % kolik bitů na S3 ...
   odpovídá otočení hlavní hřídele o 360 stupňů
17 S1_deg = S1/nbits1*360; % úhel na S1 přepočítán z bitů
18 S3_deg = S3/nbits3*360; % úhel na S3 přepočítán z bitů
19
20 % následující funkce přihlíží k hodnotě vůle pro případ ...
   velikosti vůle
21 % dostatečně nízké pro řešitelnost bez dalších opatření
22 if((mod(S3,bit_per_rev) <= vule_bit) & resitelne = 1)
23     % případ, kdy S3 spadá do oblasti spodních hodnot bitů z ...
   oblasti
24     % odpovídající hodnotě n_turn, přičemž pásmo možné vůle ...
   zasahuje do
25     % oblasti n_turn - 1
26     if(S1_deg <= vule)
27         % vůle nezměnila hodnotu funkce n_turn
28         n_turn = n_turn;

```

⁸Vyššími hodnotami je myšlena horní polovina, nebo ještě lépe interval vůle převedené na bity na $S3 < 15 - vule_bit, 15 >$.

```

29     elseif(S1_deg >= (360 - vule))
30         % vùle zvýšila hodnotu funkce n_turn
31         n_turn = n_turn - 1;
32     else
33         % chyba, vùle je pravdùpodobnù vyšší než zadaná hodnota
34     end
35 elseif((mod(S3,bit_per_rev) >= (15 - vule_bit)) & resitelne = 1)
36     % pracovní poznámka: 16- nebo 15- ?
37     % pùípad, kdy S3 spadá do oblasti horních hodnot bitù
38     % z oblasti odpovídající hodnotù n_turn, pùíčemž pásmo ...
        vùle zasahuje do
39     % oblasti n_turn + 1
40     if(S1_deg >= (360-vule))
41         % vùle nezmùnila hodnotu funkce n_turn
42         n_turn = n_turn;
43     elseif(S1_deg <= vule)
44         % vùle snížila hodnotu funkce n_turn
45         n_turn = n_turn + 1;
46     else
47         % chyba, vùle je pravdùpodobnù vyšší než zadaná hodnota
48     end
49 elseif(resitelne = 0)
50     h = msgbox('Zadaná vùle je pùíliš vysoká', 'Chyba');
51 end
52
53 % absolutní úhel tedy odpovídá ve stupních
54 abs_uhel = S1_deg + n_turn*360;

```

Povaha rozhodování v tomto pùípadù je ještù znázornùna na obr. 7.

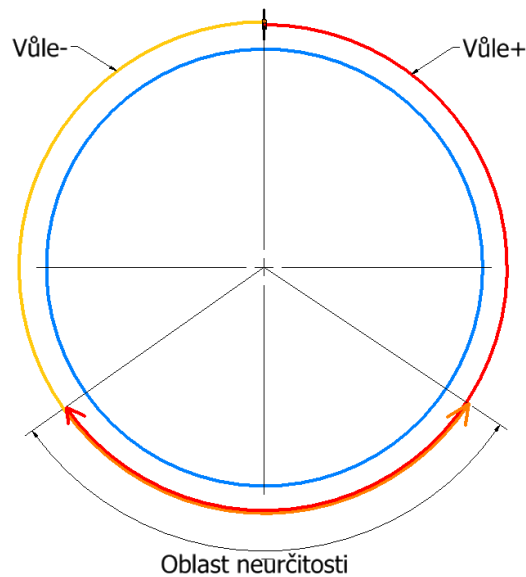
6.6.2 Pùípad pùíliš vysoké velikosti vùle omezující schopnost urùit pùesnù absolutní úhel

Na obr. 34 je znázornùn maximální rozsah vùle pro pùípad, že je nižší než 180° . Jak lze vidùt, úseky se neprotínají, což nám umožnuje jednoznaènù urùení funkce $turn_n$, což již bylo provedeno výše.

Z obr. 34 je patrné, že v pùípadù vùle většì než 180° na hlavním hùídeli dochází ke vzniku oblasti neurùitosti. Pokud resolver spadne do této oblasti, nelze s jistotou rozhodnout o absolutním úhlu natoènì systému.

Je rozumné pùedpokládat, že vzhledem ke komerènìmu prodeji snímacího systému IMAS, vùle takto vysokých hodnot nedosahuje. Pro kompletnost řešení však uvedu návrh řešení.

Princip řešení spoívá v pùesném otáènì hlavní hùídele a znalosti celkové vùle z pùedchozího měření. Po zapnutí senzoru získáme hodnotu na hùídeli S30. V další fázi probíhá smyčka while a snímání hodnoty S3 v rámci smyčky. Samotné otáènì je symbolicky zapsáno funkcí `moveS1()`, kterou by bylo potřeba konkrùtne napsat



Obrázek 34: Znázornění vlivu příliš velké vůle na schopnost přesně určit absolutní úhel, promítnuto na hřídel snímanou resolverem S1.

dle ovládání konkrétního motoru. Při registraci změny hodnoty S3 již známe přesnou polohu systému a stačí jen dopočítat konkrétní hodnotu pomocí následujícího skriptu.

```

1 vule_bit = input(prompt); % uživatelský input změřené vůle
2 vule = vule_bit*360/nbits3*256;
3
4 trans_ratio = 256; % převodní poměr mezi hlavní ...
   hřídelí a hřídelí S3
5 nbits1 = 2097152; % počet hodnot, kterých nabývá ...
   výstup S1
6 nbits3 = 2097152 % počet hodnot, kterých nabývá ...
   výstup S3
7 get(S3) = S30; % odečteme hodnotu S3 na počátku
8
9 while S3 = S30 % otáčí hlavní hřídelí, dokud se ...
   nezmění hodnota bitu na S3
10   moveS1();
11   get(S3) = S3;
12 end
13 S1 = get(S1); % získáme úhel otočení na S1 v ...
   bitovém zápisu
14 S3 = get(S3); % získáme úhel otočení na S3 v ...
   bitovém zápisu

```

```

15
16 S3 = floor(S3 - vule/2);           % vypočteme opravdový úhel ...
    otočení S3 v bitech
17 n_turn = floor(S3*256/nbits3);    % výpočet počtu otočení z úhlu ...
    na S3
18
19 S1_deg = S1/nbits1*360;           % úhel na S1 přepočítán z bitů
20 S3_deg = S3/nbits3*360;           % úhel na S3 přepočítán z bitů
21 \\\
22 % absolutní úhel tedy odpovídá ve stupních
23 abs_uhel = S1_deg + n_turn*360;

```

6.7 Teoretické řešení za použití tří resolverů

V původní prodávané verzi systému byly použity tři resolvery S1, S2 a S3. Při současně dostupné přesnosti 20 bitů, tedy $\frac{1048576}{256} = 4096$ bitů na S3 na jedno otočení S1 je přesnost dosahovaná dvěma resolvery dostačující. Dříve, při dostupnosti 8 bitové technologie, což znamená $\frac{256}{256} = 1$ na otáčku. Toto rozlišení je zcela nedostačující a konstruktér tedy využil dalšího resolveru, který přibližuje jednotlivé otočení. Poté struktura systému vypadá následovně,

- (S3) Rozhoduje s hrubým rozlišením o umístění proměnné n_{turn16} do intervalu $n_{turn16} \in \langle 16k; 16(k+1) \rangle$, $k \in \langle 0; 15 \rangle$, $k \in \mathbb{N}$.
- (S2) Hřídel s resolverem S2 je spojena s hlavní hřídelí pouze převodovým poměrem 16 a je tedy při 8 bitovém snímání k dispozici 16 bitů na jedno otočení. Jsme schopni snímat počet otočení v intervalu $n_{turn} \in \langle 0, 15 \rangle$.
- (S1) Resolver na hlavní hřídeli je schopen snímat pouze relativní úhel z intervalu $\phi \in \langle 0, 360 \rangle$ stupňů.

Složením informace ze všech resolverů jsme schopni změřit absolutní úhel až do 256 otočení hlavní hřídele.

6.7.1 Zhodnocení možných hodnot vůle na funkčnost soustavy tří resolverů

Případ soustavy se třemi resolvery se komplikuje, jelikož je nyní třeba uvážit dvě různé vůle mezi resolvery S1-S2 a S2-S3.

Při zamyšlení nad algoritmickým určováním otočení zjistíme, že nás ve skutečnosti zajímá vůle mezi S1-S2 a S1-S3.

Dále lze předpokládat, že pokud vůle S1-S2 bude příliš velká, bude příliš velká i vůle S1-S3. Stačí tedy opět zkoumat vůli S1-S3 a analýza systému se v tomto případě nekomplikuje.

6.7.2 Případ dostatečně nízké velikosti vůle umožňující určit přesně absolutní úhel v případě systému tří resolverů

Relativní konfigurace resolverů S3 a S2 vůči S1 se může pohybovat v rozmezí určeném vůlí, která je v soustavě rozmístěna na kontaktech ozubených kol.

Je potřeba změřit hodnoty dvou vůlí, přičemž třetí již lze dopočítat ze zřejmého vztahu

$$v_{S1S3} = v_{S1S2} + v_{S2S3} \quad (15)$$

Jak již bylo zmíněno, stačí v důsledku sériového zapojení kinematického řetězce předpokládat dostatečně nízkou hodnotu v_{S1S3} . Pro algoritmus výpočtu absolutního úhlu po zapnutí snímacího systému je však vhodné změřit hodnotu v_{S1S3}

i v_{S1S2} .

Algoritmus pro získání počtu otočení se rozdělí na dvě části S2 a S3. První bod následujícího přehledu odpovídá určení relativního natočení hlavní hřídele v rámci jednoho jejího plného otočení.

(S1) Na resolveru S1 se v konečném kroku určuje úhel natočení v rozmezí $\phi \in < 0; 360 >$ stupňů.

(S2) Ve druhé části určíme $n_{turn} \in < 0; 15 >$, $n_{turn} \in \mathbb{N}$, tedy jednotlivé otočení 0 až 15 na hrubších intervalech, které jsme získali v prvním bodu. Tento bod je identický k první verzi algoritmu počítající pouze se dvěma resolvery. Odečte se hodnota, poté se zkontroluje, zda neleží ve vzdálenosti vůle od bodu, kde se mění hodnota. Pokud leží, přihlédně se k resolveru S1 a vypočte se skutečná hodnota.

(S3) V první části získáme $n_{turn16} \in < 16k; 16(k+1) >$, $k \in < 0; 15 >$, $k \in \mathbb{N}$. Opět zde může nastat situace, kde změříme n_{turn16} , ale ve skutečnosti reálná hodnota o jednotku vyšší nebo nižší v důsledku vůle. Zde nastává otázka, zda je vhodné v tomto případě přihlédnout k natočení hřídele S2 nebo S1. Uvážíme-li náš případ s dostatečným bitovým rozlišením na S3, je možné rozhodnout přímo z informace na S1. Pokud by nám ale bylo k dispozici jen 8 bitů, znamenalo by to pouze 1 bit resolveru S3 na jedno otočení. Je tedy třeba přihlížet k resolveru S2.

Zde ale nastává problém s vůlí mezi S1 a S2. Nelze vyloučit situaci, kdy jsou všechny tři hřídele blízko 0° a vůle je rozmístěna na opačné strany ve spojení S1-S2 a S2-S3. To je velmi nepravděpodobná situace, ale nemáme omezení, která by nám bránila rozšířit kód algoritmu o několik úkonů a proto byla ošetřena i tato možnost. V takovém případě je možné, že pouze nahlédnutím k S2 dostaneme špatnou hodnotu S3. Pravděpodobnost takového jevu je nízká, ale potenciální chyba velice zásadní, jelikož odpovídá celým šestnácti otočením. Proto je vhodné do algoritmu zakomponovat pojistku pro případ blízkosti S2 a určení hodnoty tedy bude $S3 \implies S2 \implies S1$.

Samotný skript napsaný v prostředí MATLAB vypadá následovně.

```
1 resitelne = 1; % počáteční hodnota potřebná kvůli ...  
   určení řešitelnosti s ohledem na vůli  
2 S1 = get(S1); % získání hodnoty z resolveru S1  
3 S2 = get(S2); % získání hodnoty z resolveru S2  
4 S3 = get(S3); % získání hodnoty z resolveru S3  
5 prompt = 'Zadejte vůli S1-S2 v bitech mezi hlavní hřídelí S1 a ...  
   S2';  
6 vule_bit13 = input(prompt); % uživatelský input změřené vůle
```



```

7  prompt = 'Zadejte vůli S1-S2 v bitech mezi hlavní hřídely S1 a ...
      S2';
8  vule_bit12 = input(prompt);    % uživatelský input změřené vůle
9
10 vule13 = vule_bit13*360/nbits3*256;
11 vule12 = vule_bit12*360/nbits2*16;
12
13 trans_ratio13 = 256;          % převodní poměr mezi hlavní ...
      hřídely S1 a hřídely S3
14 trans_ratio12 = 16;          % převodní poměr mezi hlavní ...
      hřídely S1 a hřídely S2
15
16 nbits1 = 1048576;            % počet hodnot, kterých nabývá ...
      výstup S1
17 nbits2 = 4096                % počet hodnot, kterých nabývá ...
      výstup S2
18 nbits3 = 4096                % počet hodnot, kterých nabývá ...
      výstup S3
19 if(vule13>=180)              % zkouška, zda vůle nepřesahuje ...
      přijatelnou hodnotu, jak bylo diskutováno výše, kontrolují ...
      pouze vůli mezi S1 a S3
20     resitelne = 0;
21 end
22 n_turn = floor(S2/nbits3*16);    % odhad počtu otočení ...
      S2 bez uvažování vůle
23 n_turn16 = floor(S3/nbits3*16);  % odhad počtu otočení ...
      S3 bez uvažování vůle
24 bit_per_rev2 = floor(nbits2/trans_ratio12);    % kolik bitů na ...
      S2 odpovídá otočení hlavní hřídele o 360 stupňů
25 bit_per_rev3 = floor(nbits3/trans_ratio13);    % kolik bitů na ...
      S3 odpovídá otočení hlavní hřídele o 360 stupňů
26 S1_deg = S1/nbits1*360;          % úhel na S1 přepočítán z bitů
27 S2_deg = S2/nbits2*360;          % úhel na S2 přepočítán z bitů
28 S3_deg = S3/nbits3*360;          % úhel na S3 přepočítán z bitů
29 % následující funkce přihlíží k hodnotě vůle S1-S3 pro případ ...
      velikosti vůle dostatečně nízké pro řešitelnost bez dalších ...
      opatření
30 if((mod(S3,bit_per_rev3) <= vule_bit13) & resitelne = 1)
31     % případ, kdy S3 spadá do oblasti spodních hodnot bitů z ...
      oblasti
32     % odpovídající hodnotě n_turn16, přičemž pásmo možné vůle ...
      zasahuje do
33     % oblasti n_turn16 - 1
34     if(S2_deg <= vule12)
35         % vůle nezměnila hodnotu funkce n_turn
36         n_turn16 = n_turn16;
37     elseif(S2_deg >= (360 - vule12))
38         % vůle zvýšila hodnotu funkce n_turn
39         n_turn16 = n_turn16 - 1;

```

```

40     else
41         % chyba, vùle je pravdùpodobnù vyùùší než zadaná hodnota
42
43     % jeùùtě je nutné zkontrolovat, zda vùle mezi S1 S2 ...
44     % nezmùnila vùsledek
45     if((mod(S2,bit_per_rev3) <= vule_bit12) & resitelne = 1)
46         if(S1_deg <= vule)
47             % vùle mezi S1 a S2 snížila vùsledek
48             n_turn16 = n_turn16 + 1;
49         elseif(S1_deg >= (360 - vule))
50             % vùle mezi S1 a S2 neovlivnila vùsledek
51             n_turn16 = n_turn16;
52         else
53             % chyba, vùle je pravdùpodobnù vyùùší než zadaná ...
54             % hodnota
55         end
56     end
57
58 elseif((mod(S3,bit_per_rev3) >= (15 - vule_bit13)) & ...
59 resitelne = 1)
60     % pracovní poznámka: 16- nebo 15- ?
61     % pùípad, kdy S3 spadá do oblasti horních hodnot bitù
62     % z oblasti odpovídající hodnotù n_turn16, pùíčemž pásmo ...
63     % vùle zasahuje do
64     % oblasti n_turn16 + 1
65     if(S2_deg >= (360-vule12))
66         % vùle nezmùnila hodnotu funkce n_turn
67         n_turn16 = n_turn16;
68     elseif(S2_deg <= vule12)
69         % vùle snížila hodnotu funkce n_turn
70         n_turn16 = n_turn16 + 1;
71     else
72         % chyba, vùle je pravdùpodobnù vyùùší než zadaná hodnota
73         end
74
75     % jeùùtě je nutné zkontrolovat, zda vùle mezi S1 S2 ...
76     % nezmùnila vùsledek
77     if((mod(S2,bit_per_rev3) >= (15 - vule_bit12)) & ...
78 resitelne = 1)
79         if(S1_deg >= (360-vule))
80             % vùle mezi S1 a S2 zvýùila vùsledek
81             n_turn = n_turn - 1;
82         elseif(S1_deg <= vule)
83             % vùle mezi S1 a S2 neovlivnila vùsledek
84             n_turn = n_turn;
85         else
86             % chyba, vùle je pravdùpodobnù vyùùší než zadaná hodnota
87         end

```

```

83     end
84
85 elseif(resitelne = 0)
86     h = msgbox('Zadaná vůle je příliš vysoká', 'Chyba');
87 end
88
89 % následující funkce přihlíží k hodnotě vůle S1-S2 pro případ ...
    velikosti vůle dostatečně nízké pro řešitelnost bez dalších ...
    opatření
90 if((mod(S2,bit_per_rev3) <= vule_bit12) & resitelne = 1)
91     % případ, kdy S2 spadá do oblasti spodních hodnot bitů z ...
        oblasti
92     % odpovídající hodnotě n_turn, přičemž pásmo možné vůle ...
        zasahuje do
93     % oblasti n_turn - 1
94     if(S1_deg <= vule)
95         % vůle nezměnila hodnotu funkce n_turn
96         n_turn = n_turn;
97     elseif(S1_deg >= (360 - vule))
98         % vůle zvýšila hodnotu funkce n_turn
99         n_turn = n_turn - 1;
100    else
101        % chyba, vůle je pravděpodobně vyšší než zadaná hodnota
102    end
103 elseif((mod(S2,bit_per_rev3) >= (15 - vule_bit12)) & ...
    resitelne = 1)
104     % pracovní poznámka: 16- nebo 15- ?
105     % případ, kdy S2 spadá do oblasti horních hodnot bitů
106     % z oblasti odpovídající hodnotě n_turn, přičemž pásmo ...
        vůle zasahuje do
107     % oblasti n_turn + 1
108     if(S1_deg >= (360-vule))
109         % vůle nezměnila hodnotu funkce n_turn
110         n_turn = n_turn;
111     elseif(S1_deg <= vule)
112         % vůle snížila hodnotu funkce n_turn
113         n_turn = n_turn + 1;
114     else
115        % chyba, vůle je pravděpodobně vyšší než zadaná hodnota
116    end
117 elseif(resitelne = 0)
118     h = msgbox('Zadaná vůle je příliš vysoká', 'Chyba');
119 end
120
121 % absolutní úhel tedy odpovídá ve stupních
122 abs_uhel = S1_deg + n_turn*360 + n_turn16*360*16;

```

7 Závěr

První část této práce byla věnována rešerši základních principů měření úhlu. U každého z nich byl nejprve představen fyzikální princip a dále byla rozebrána konkrétní problematika specifická pro daný druh senzorů. Pozornost byla věnována i výhodám a nevýhodám každého principu.

Na začátku praktické části byly představeny základní koncepty důležité pro reálnou aplikaci senzorů resolverového typu. Jmenovitě se jednalo o představení funkce protokolů s konkrétním příkladem v podobě protokolu EnDat a základních pojmů jakým je AD převod a diskreditace dat.

V praktické části byla provedena analýza zkoumaného absolutního úhlového systému IMAS a byly provedeny úvahy nad významem vůle na funkčnost soustavy a účelu použití tří resolverů v původní konstrukci. Dále byly navrženy algoritmy pro soustavu dvou a tří resolverů, nejprve v idealizovaném případě bez vůle a dále i s uvažováním vůle. Ty byly následně realizovány formou skriptů v prostředí MATLAB.

Praktická aplikace skriptu na oživovaný snímací systém nebyla realizována, protože se nepodařilo zprovoznit elektroniku umožňující přepínání mezi jednotlivými resolvery a bude provedena až dodatečně.

Seznam obrázků

1	Schéma rotačního potenciometru[12]	10
2	Schéma elektrického obvodu zapojení potenciometru[1]	11
3	Schéma zapojení potenciometru a idealizovaný lineární výstup[1]	12
4	Vliv poměrů odporů na linearitu výstupu[1]	12
5	Zjednodušená klasifikace optických enkóderů v závislosti na povaze a typu generovaného signálu [1]	14
6	Vizualizace průběhu kvadraturního signálu [3]	15
7	Zápis polohy pomocí přirozené binární soustavy [1]	16
8	Znázornění principu funkce vee-scanu [1]	17
9	Zápis polohy pomocí Grayova kódu (a), schéma konverze Grayova kódu do binární soustavy (b), implementace konverze pomocí logických operátorů OR [1]	18
10	Indukce dvou cívek[4]	19
11	Schéma synchra[1]	20
12	Indukční potenciometr[1]	21
13	Vícetupňové vinutí resolveru[1]	21
14	Schéma brushless resolveru[1]	22
15	Výstup resolveru konfigurovaného jako řídicí vysílač[1]	22
16	Fázový posun výstupního indukovaného napětí v zapojení řídicí transformátor[1]	23
17	Způsob náhledu na černou skříňku[8]	25
18	Signál $\sim V_{PP}$ [9]	27
19	Průběh funkce závislosti úbytku amplitudy na skenovací frekvenci v obecném případě $\sim V_{PP}$ [9]	27
20	Diagram průběhu signálu v inkrementálních signálech \square TTL [9]	28
21	Diagram zpracování sinového signálu[9]	29
22	Vliv kompenzace zpoždění signálu na pracovní frekvenci[9]	29
23	Přenos signálu při přerušovaném hodinovém signálu[9]	30
24	Přenos signálu při kontinuálním hodinovém signálu[9]	31
25	Znázornění postupu digitalizace analogového signálu[10]	33
26	Znázornění kvantování signálu na diskrétní hodnoty vyjádřené binárním kódem[1]	34
27	Model mechanického systému v softwaru Autodesk Inventor	35
28	Příklad mapování bitů na úhel otočení	37
29	Průběh výstupu resolveru mezi 0° až 360° [11]	37
30	Ilustrace průběhu výstupů ze tří resolverů při 16 bitovém přenosu. Převodní poměr neodpovídá analyzovanému systému, jelikož je pro demonstraci nepraktický.	39

31	Znázornění neutrální vůle, kde je mezi zuby stejná vůle na obou stranách.	40
32	Znázornění neutrální vůle, kde je mezi zuby stejná vůle na obou stranách.	41
33	Znázornění vlivu dostatečně nízké vůle na schopnost přesně určit absolutní úhel, promítnuto na hřídel snímanou resolverem S1. . . .	42
34	Znázornění vlivu příliš velké vůle na schopnost přesně určit absolutní úhel, promítnuto na hřídel snímanou resolverem S1.	45

Reference

- [1] ALCIATORE, David G. a Michael B. HISTAND. *Introduction to mechatronics and measurement systems*. 4th ed. New York: McGraw-Hill, c2012. ISBN 00-733-8023-7.
- [2] SINGLETURN & MULTITURN MEASUREMENT PRINCIPLES. *POSITAL FRABA* [online]. [cit. 2017-02-21]. Dostupné z: <https://www.posital.com/en/products/absolute-encoders/singleturn-multiturn-encoder.php>
- [3] Why use an Optical Quadrature Encoder for a Motor Encoder ? *Quantum devices* [online]. [cit. 2017-02-22]. Dostupné z: <https://quantumdevices.wordpress.com/category/quadrature/page/2/>
- [4] *ELEKTRINA A MAGNETIZMUS XI.: Indukčnost a magnetická energie* [online]. 2006. [cit. 2017-02-27]. Dostupné z: http://www.aldebaran.cz/elmg/kurz_11_coil.pdf
- [5] *Synchro and Resolver Engineering Handbook*. Moog Components Group, 2004.
- [6] Rotary encoder. In: *Wikipedia: the free encyclopedia* [online]. San Francisco (CA): Wikimedia Foundation, 2001- [cit. 2017-02-28]. Dostupné z: https://en.wikipedia.org/wiki/Rotary_encoder
- [7] Protokol (informatika). In: *Wikipedia: the free encyclopedia* [online]. San Francisco (CA): Wikimedia Foundation, 2001- [cit. 2017-03-12]. Dostupné z: [https://cs.wikipedia.org/wiki/Protokol_\(informatika\)](https://cs.wikipedia.org/wiki/Protokol_(informatika))
- [8] Černá skříňka (kybernetika). In: *Wikipedia: the free encyclopedia* [online]. San Francisco (CA): Wikimedia Foundation, 2001- [cit. 2017-03-12]. Dostupné z: [https://cs.wikipedia.org/wiki/\%C4\%8Cern\%C3\%A1_sk\%C5\%99\%C3\%AD\%C5\%88ka_\(kybernetika\)](https://cs.wikipedia.org/wiki/\%C4\%8Cern\%C3\%A1_sk\%C5\%99\%C3\%AD\%C5\%88ka_(kybernetika))
- [9] *Encoders for Servo Drives*. HEIDENHAIN, 2006.
- [10] Data Acquisition. In: *Wikipedia: the free encyclopedia* [online]. San Francisco (CA): Wikimedia Foundation, 2001- [cit. 2017-03-15]. Dostupné z: https://en.wikipedia.org/wiki/Data_acquisition
- [11] DI TOMMASO, A.O. a Rosario MICELI. *A new high accuracy software based resolver-to-digital converter* [online]. 2003 [cit. 2017-08-06]. Dostupné z: https://www.researchgate.net/publication/4065110_A_new_high_accuracy_software_based_resolver-to-digital_converter. Conference paper.

- [12] Inside the potentiometer In: *Jeff Feddersen's website* [online]. Dostupné z: <http://fddrsn.net/pcomp/examples/potentiometers.html>
- [13] HOBMAIER, Daniel a José BARROS. *MEASURING DEVICE WITH SEVERAL SENSORS IN MULTIPLEX*. USA. 5211063. Uděleno May 18, 1993.