

**ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI
FAKULTA ELEKTROTECHNICKÁ**

KATEDRA TECHNOLOGIÍ A MĚŘENÍ

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

Čidla otáček a polohy pro regulované elektrické pohony

ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

(PROJEKTU, UMĚLECKÉHO DÍLA, UMĚLECKÉHO VÝKONU)

Jméno a příjmení: **Martina MUŽÍKOVÁ**
Osobní číslo: **E10B0082P**
Studijní program: **B2612 Elektrotechnika a informatika**
Studijní obor: **Komerční elektrotechnika**
Název tématu: **Čidla otáček a polohy pro regulované elektrické pohony**
Zadávající katedra: **Katedra technologií a měření**

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

1. Rešerše dostupných druhů čidel otáček a polohy rotoru pro elektrické motory.
2. Popis funkce a vlastností a způsobu použití vybraných typů čidel.
3. Vývoj algoritmů pro získání údaje z vybraných typů čidel.
4. Příprava algoritmů pro mikrokontrolér nebo digitální signálový procesor.

Rozsah grafických prací: **podle doporučení vedoucího**
Rozsah pracovní zprávy: **20 - 30 stran**
Forma zpracování bakalářské práce: **tištěná/elektronická**
Seznam odborné literatury:


Student si vhodnou literaturu vyhledá v dostupných pramenech podle doporučení vedoucího práce.

Vedoucí bakalářské práce: **Ing. Tomáš Glasberger, Ph.D.**
Regionální inovační centrum elektrotechniky

Datum zadání bakalářské práce: **15. října 2012**
Termín odevzdání bakalářské práce: **7. června 2013**


Doc. Ing. Jiří Hammerbauer, Ph.D.
děkan




Doc. Ing. Vlastimil Skočil, CSc.
vedoucí katedry

V Plzni dne 15. října 2012

Abstrakt

Předkládaná bakalářská práce se zabývá analýzou dostupných druhů senzorů polohy a otáček pro regulované elektrické pohony. Popisuje principy jejich funkce, konstrukční provedení a vlastnosti vybraných typů snímačů. Dále je popsán vývoj algoritmu pro zpracování údaje z čidla polohy vhodný pro použití v mikroprocesoru. V poslední části práce je zhodnocen vliv bitového rozlišení čidla a vzorkovací frekvence na získaný údaj polohy a rychlosti z absolutního čidla.

Klíčová slova

Čidlo otáček, čidlo polohy, inkrementální snímače, absolutní snímače, indukční snímače, magnetické senzory, optoelektronické snímače, Hallovy snímače, kapacitní čidlo, tachogenerátor.

Abstract

The bachelor thesis deals with description of available position sensors and speed sensors using adjustable speed drive. It deals with the principles of function, construction and characteristics of selected types sensors. Further, there is described development of an algorithm suitable for using in microcontrollers. In the last part of the thesis, the influence of the sensor accuracy and sampling frequency respectively is evaluated.

Key words

Speed sensor, position sensors, incremental sensors, absolute sensor, inductive sensors, magnetic sensor, optoelectronic sensors, Hall effect sensors, capacitive sensors tachogenerator.

Prohlášení

Prohlašuji, že jsem tuto bakalářskou práci vypracovala samostatně, s použitím odborné literatury a pramenů uvedených v seznamu, který je součástí této diplomové práce.

Dále prohlašuji, že veškerý software, použitý při řešení této bakalářské práce, je legální.

.....
podpis

V Plzni dne 5.6.2013

Martina Mužíková

Poděkování

Tímto bych ráda poděkovala vedoucímu bakalářské práce Ing. Tomáši Glasbergerovi, Ph.D za cenné profesionální rady, připomínky a metodické vedení práce.

Obsah

SEZNAM SYMBOLŮ A ZKRATEK	9
ÚVOD.....	10
1 ČIDLO – POPIS SENZORU.....	11
2 ČIDLA POLOHY.....	12
2.1 INDUKČNÍ ČIDLA.....	12
2.1.1 <i>Resolver</i>	12
2.1.2 <i>Selsyn</i>	14
2.2 OPTOELEKTRONICKÉ TYPY SNÍMAČŮ.....	16
2.2.1 <i>Inkrementální snímač polohy</i>	16
2.2.2 <i>Absolutní snímač polohy</i>	21
2.2.2.1 <i>Grayův kód</i>	23
2.3 MAGNETICKÉ SNÍMAČE	25
2.3.1 <i>Rotační</i>	26
2.3.1.1 <i>Senzor s Hallovými sondami</i>	26
2.3.2 <i>Lineární</i>	32
2.3.2.1 <i>Inkrementální magnetické lineární snímače</i>	32
2.4 KAPACITNÍ ČIDLA POLOHY	32
2.5 ULTRAZVUKOVÉ SENZORY	34
3 ČIDLA OTÁČEK.....	35
3.1 INDUKČNÍ ČIDLA.....	35
3.1.1 <i>Tachodynamo</i>	35
3.1.2 <i>Tachoalternátor</i>	37
4 MONTÁŽ SENZORU NA ELEKTROMOTOR	38
5 SHRUTÍ.....	40
6 SIMULACE ČTENÍ A ZPRACOVÁNÍ SIGNÁLU Z ROTAČNÍHO ČIDLA POLOHY	42
6.1 ZMĚNA VZORKOVACÍ FREKVENCE A ZMĚNA PŘESNOSTI	44
ZÁVĚR	49
SEZNAM LITERATURY A INFORMAČNÍCH ZDROJŮ	50
PŘÍLOHY.....	1
PŘÍLOHA A	1

Seznam symbolů a zkratek

Φ	Magnetický tok
K.....	Konstanta stroje
I_c	Vstupní proud polovodičové destičky Hallovy sondy
ω	Rychlost otáček
$B \cdot \sin\theta$	Složka magnetické indukce, kolmá na směr proudu I_c
R_H	Hallova konstanta
d	Tloušťka polovodičové destičky
d_3	Vzdálenost signálu
t_{vz}	Perioda vzorkování
φ	Fázový posuv
c	Rychlost šíření vzduchu
T.....	Čas od vysílání do přijetí signálu
Q.....	Náboj
v	Rychlost vychýlení elektronů
B	Magnetická indukce
α	Úhel natočení
λ	Krok rotace
C.....	Kapacita
ϵ_r	Poměrná permitivita dielektrika
ϵ_0	Perimitivita vakua
d_2	Vzdálenost mezi elektrodami kondenzátoru

Úvod

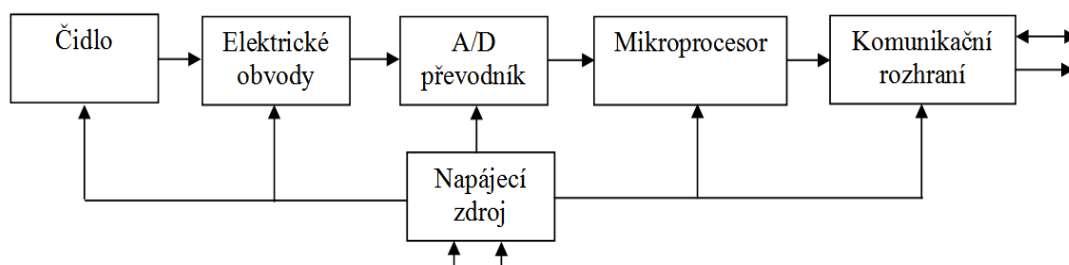
Důležitou součástí regulovaných elektrických pohonů je snímač, jehož funkcí je převod mechanické veličiny (rychlosti rotoru nebo jeho polohy) na veličinu elektrickou. Tato práce se zabývá popisem vlastností vybraných typů snímačů otáček a polohy. Mezi uvedené snímače polohy patří indukční, optoelektronická a magnetická čidla. Zástupcem senzorů otáček je indukční čidlo. Dále je vyvinut algoritmus pro zpracování údajů z čidla polohy vhodný pro použití v mikrokontroléru a je provedeno porovnání údajů z čidla polohy pro jeho různé bitové přesnosti a různé vzorkovací frekvence.

Cíle této práce jsou:

- Vytvořit rešerši dostupných druhů čidel otáček a polohy rotoru pro elektrické motory,
- Popis funkcí, vlastností a způsobů použití vybraných čidel,
- Vývoj algoritmů pro získání údajů z vybraných typů čidel,
- Příprava algoritmů pro mikrokontrolér nebo digitální signálový procesor.

1 Čidlo – Popis senzoru

Čidlo je tzv. citlivá část snímače (senzoru). Je to funkční prvek, který tvoří vstupní část informačního řetězce. Zde dochází k převodu neelektrické veličiny na elektrickou. Informační řetězec je zobrazen na obr. 1.1., kde je zobrazena celková funkce snímače. Signál z čidla je nutno zesílit v elektrickém obvodu. Dále je důležité zajistit odstup signál od šumu, čím větší je tento odstup, tím lepší je výstupní signál. Signál se zpracovává v nadřazených obvodech. Analogový signál lze převést převodníkem A/D na digitální signál. Vzniklý signál se dále upravuje např. pomocí mikroprocesoru. Podle charakteru výstupního signálu lze rozpoznat, zda se jedná o snímač analogový, binární nebo číslicový. Číslicové snímače kódují výstupní signál, pokud se u analogového snímače požaduje číslicový výstupní signál, elektrický signál se musí na výstupu kvantovat a kódovat. Signál se potom zpracovává většinou číslicově a výstup je tvořen komunikačním rozhraním, to je společná hranice dvou zařízení, které spolu přes toto rozhraní komunikují a také zde může docházet k převodu číslicového na analogový. [1]



Obrázek 1.1 - Zobrazení činnosti senzoru (převzato z [2])

2 Čidla polohy

S těmito čidly se setkáváme v lineárním či rotačním provedení. Jak jejich název napovídá, jejich úkolem je zjistit polohu pohyblivé části pohonu, nejčastěji rotoru motoru.

2.1 Indukční čidla

2.1.1 Resolver

Vlastnosti: Resolvery mají velký otáčkový rozsah a určují informaci o absolutní poloze a rychlosti. Tento robustní snímač má zanedbatelnou teplotní citlivost a je necitlivý k nečistotám. [3][5]

Princip funkce: Resolver je rotační transformátor, který je používán k měření absolutního úhlu natočení rotoru. Svoji konstrukcí se podobá synchronnímu motoru. Pro svoji funkci využívá změny vzájemné indukčnosti rotoru a statoru. Resolver má dvoufázové vinutí na statoru a jednofázové na rotoru (pasivní). Statorová vinutí jsou vůči sobě posunuta o 90° . Senzor může být napájen jak do rotoru, tak do statoru. V této práci je popsán princip resolveru napájeného do statoru.

Navzájem kolmá statorová vinutí jsou napájena střídavým napětím:

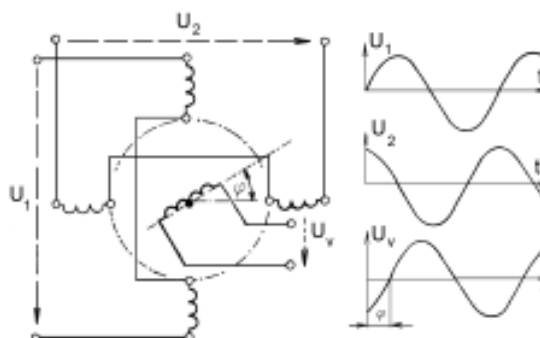
$$u_1(t) = U \sin(\omega t) \quad (2.1)$$

$$u_2(t) = U \cos(\omega t) \quad (2.2)$$

Vytvoří se točivé magnetické pole, které indukuje do rotoru napětí o stejné frekvenci. Toto napětí je fázově posunuté vůči statorovému referenčnímu napětí $u_1(t)$ o úhel natočení φ .

$$u_v(t) = K U \sin(\omega t - \varphi) \quad (2.3)$$

Pro zjištění polohy φ je nutné vyhodnotit fázový posuv mezi napětím $u_1(t)$ a $u_v(t)$ viz obr. 2.1. [4][5][6]



Obrázek 2.1: Princip resolveru (převzato z [13])

Použití: Tento snímač se uplatňuje jako absolutní snímač úhlu a natočení, a to například pro měření polohy volantu v systémech EPS. Mezi další možnosti použití patří pohony se synchronními stroji. Používá se ve velmi extrémních podmínkách. [7]

Typy resolverů:

Tabulka 2-1 – Technické parametry resolveru



Obrázek 2.2: Ukázka resolveru (převzato z [8])

Parametry/typ	ER5Kd286
Napětí	7 V
Transformační poměr	$0,5 \pm 10 \%$
Proud	50 mA
Příkon	200 mW
Počet pólů	2
Rozměry	$\varnothing 9,52 / \varnothing 36,83 \times 16$

Existuje mnoho dalších druhů resolverů, které se liší svými mezními parametry. Dostupné resolversy se vyrábějí jako jednotáčkové nebo víceotáčkové. U jednotáčkových aplikací se používá malé vnější pevné pouzdro, jako například u typu HT-6. Toto pouzdro je jiné než u klasických typů resolverů viz obr. 2.3. Jedná se o bezkartáčový provedení jednotáčkového resolveru. Je možné ho využít v pracovních teplotách v rozmezí -40° až $+125^{\circ}\text{C}$. [9]



Obrázek 2.3: Resolver HT-6 (převzato z [9])

Vstupní napětí resolverů je 7 V nebo 5 V a vstupní proudy jsou v řádu desítek miliampér, zpravidla od 30 do 55 mA. Jejich vstupní frekvence se pohybuje v rozmezí 5 kHz nebo 10 kHz. Vyznačují se různým počtem polpárů (např. 3, 4, 6). Jejich rotační rychlost dosahuje vysokých hodnot 8000 min^{-1} až 40000 min^{-1} . Známé typy resolverů jsou schopné fungovat za provozních teplot od -55°C do 155°C . [10]



Obrázek 2.4: Resolver RES56-A (převzato z [11])

2.1.2 Selsyn

Vlastnosti: Selsyny podobně jako resolvery měří úhel natočení. Na rozdíl od resolveru dosahuje selsyn měřicího rozsahu pouze $\pm 85^\circ$. Je to transformátor s otočným primárním vinutím (rotorem) a pevným statorem, na kterém je výstupní napětí. [12]

Princip funkce: Selsyny jsou konstruovány jako malé elektrické stroje. Mají trojfázové vinutí na statoru a jednofázové vinutí na rotoru. Cívky statoru mezi sebou svírají úhel 120° a konce rotorového vinutí jsou vyvedeny na kroužky. Selsyn je napájen střídavým proudem. Pro dálkový přenos úhlové odchylky je možné využít dvojice selsynů. Jeden selsyn je použit jako vysílač a druhý jako přijímač. [12][13]

Statorová vinutí jsou vzájemně propojena a rotor prvního selsynu je napájen napětím:

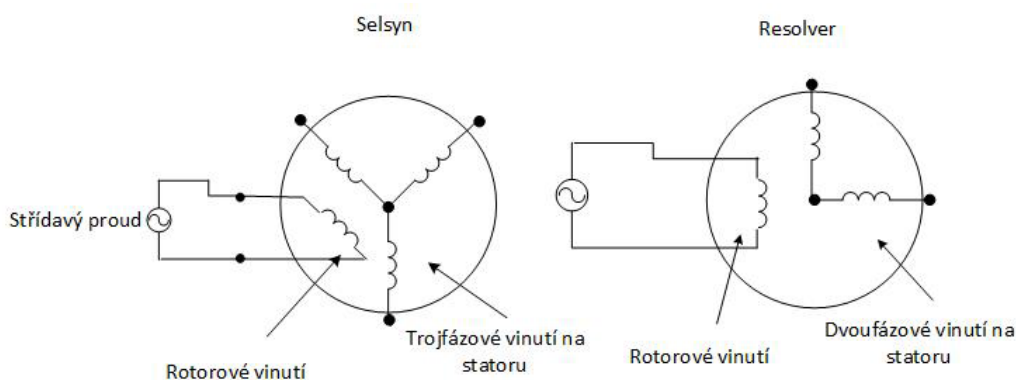
$$u_1(t) = U_m \sin(\omega_1 t) \quad (2.4)$$

Pokud je rotor prvního selsynu natočen o úhel φ_1 oproti výchozí poloze a rotor druhého selsynu o úhel φ_2 , do rotoru druhého selsynu se indukují napětí:

$$u_2(t) = U_m \sin(\omega_1 t) \cos(\varphi_2 - \varphi_1) = U_m \sin(\omega_1 t) \cos \alpha \quad (2.5)$$

Velikost napětí je tedy závislá na úhlu natočení α . Pro získání stejnosměrného napětí je možné použít například fázově citlivý usměrňovač.

Použití: Selsyny se používaly ve vojenské technice, hlavně v letectví, ale také ve strojírenství a kinematografii. Dvojice selsynu se používá pro natáčení antén. V dnešní době jsou nahrazovány přístroji digitálními. [12][14]



Obrázek 2.5: Zobrazení rozdílu mezi selsynem a resolverem (převzato z [15])



Obrázek 2.6: Příklad selsynu (převzato z [16])

2.2 Optoelektronické typy snímačů

Optický snímač pracuje na principu vysílače a přijímače světelného signálu, který prochází optickou mřížkou. Střídání propustných a matných oblastí při otáčení mřížkou způsobuje změny napětí v důsledku změny množství detekovaného světla.

2.2.1 Inkrementální snímač polohy

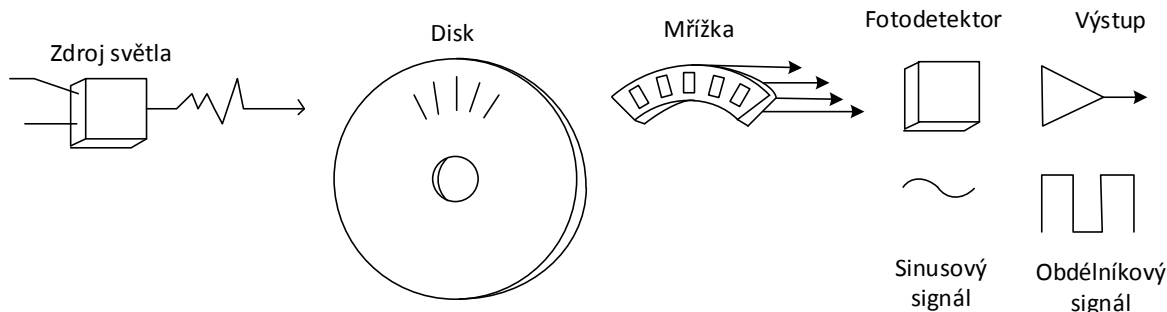
Vlastnosti: Inkrementální čidla neboli rotační enkodéry, jsou elektromechanická zařízení, která slouží k nastavení polohy nebo měření otáček motorů a převodu rotace motoru na elektrický signál. Nejznámější typ kodéru je optický snímač, který se skládá z rotačního disku, zdroje světla a fotodetektoru. [17][18]

Inkrementální senzory jsou známy jak svou nízkou hmotností a malými rozměry, tak i vysokou rozlišovací schopností. Mají velmi odolné pouzdro a provozují se při teplotě -10° až $+60^{\circ}$ C. Název inkrementální vznikl z principu činnosti senzoru. Inkrementální čidla však neurčují přímo absolutní pozici. [17][18]

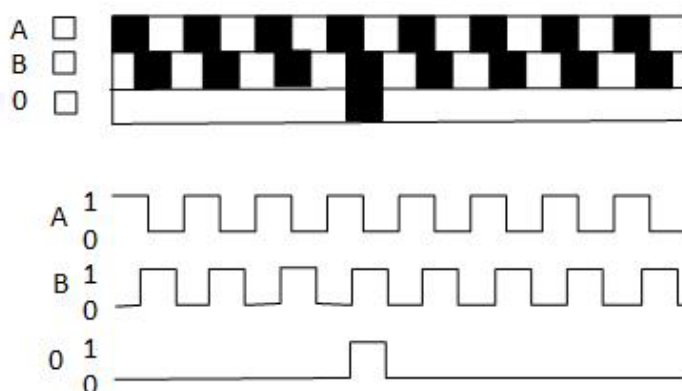
Princip funkce: Jádrem snímače je otočný optický disk, který je spojen s hřídelí snímače. Ta je uložena ve dvojici kuličkových ložisek. Na disku se střídají pravidelně průhledné a neprůhledné rysky, které během otáčení cloní světlo z LED diody. LED dioda je světelným zdrojem vysílajícím infračervené světlo a je umístěna před diskem. Světlo ze zdroje může procházet pouze průhlednými ryskami, neprůhledná část světlo pohltí. Touto činností vzniká výstupní elektrický signál, jak je vidět na obr. 2.7. [19][23]

Inkrementální senzory generují pulzy postupně pro každý krok λ jeho rotace. V senzoru jsou zapojeny antiparalelně dvě fotodiody a jsou posunuty o hodnotu $n\lambda + \lambda/2$. Senzor má tři kanály (A, B, 0) a to jsou tři soustavy proužků, pevné clony a fotocitlivé elementy. Směr posuvu získáme ze sledu signálů v kanálech A, B, ty jsou vzájemně posunuté o hodnotu $n\lambda + \lambda/4$. Pokud se zpracuje signál A před signálem B, hřídel se bude točit po směru hodinových ručiček. Bude-li tomu naopak, směr otáčení hřídele bude opačný. Nejčastěji používanými typy těchto enkodérů jsou typy s dvěma výstupními signály (kanál A a B), posunutými o 90° viz obr. 2.8. [18][20][23]

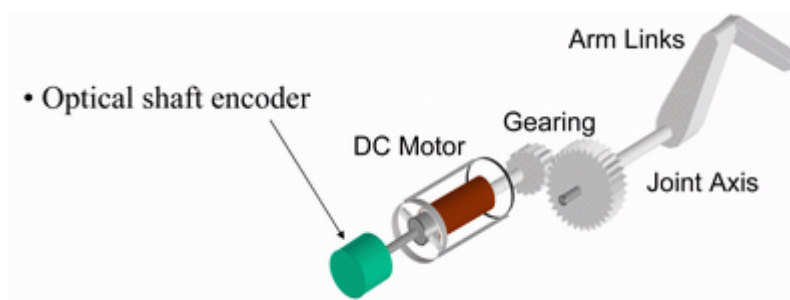
Dále je tu k dispozici ještě jeden výstupní signál nazývaný nulový (referenční), který udává polohu hřídele snímače. Referenční pozice se určí jedním pulzem. Referenční signál pomáhá zjistit akumulovanou chybu polohy, která je způsobena rušivými signály během jedné otáčky. Vhodným algoritmem lze tuto chybu odstranit. [19][20]



Obrázek 2.7: Zobrazení principu inkrementálního senzoru [25]



Obrázek 2.8: Výstupní signály A, B, 0 [24]



Obrázek 2.9: Názorná ukázka inkrementálního senzoru na DC motoru (převzato z [22])

Použití: Inkrementální senzory se používají např. v průmyslové robotice. Inkrementální enkodéry s integrovanými komutačními fázemi se používají jako rychlostní a polohová zpětná vazba u elektromotorů. Tyto doplňkové signály se využívají hlavně u bezkartáčových

komutátorových elektromotorů. V průmyslových aplikacích se používají jako zpětná vazba pohonů. [25][28]

Typy inkrementálních senzorů:

Inkrementální senzory existují i v lineárním provedení (snímají lineární pohyb). Pracují na stejném principu jako rotační snímače, liší se pouze stupnicí rozvinuty do přímky. Příkladem může být inkrementální čidlo s označením S 30. Tento senzor je určen k měření v jakékoliv poloze. Měřicí rozsah čidla je 30 mm, a rozlišení na jeden impuls 10 μm . Čidlo lze použít pro velmi přesnou regulaci lineárních pohonů. Další senzory podobného typu se liší rozsahem a rozlišením. Vyhodnocování výstupního signálu je podobné jako u inkrementálních rotačních snímačů. [26]

Existuje mnoho druhů inkrementálních snímačů. Každý senzor je vyroben pro jiné pracovní podmínky, liší se svou funkcí, odolností proti vnějším vlivům, svým rozlišením, počtem otáček, konstrukcí apod. Mezi klasická čidla patří například typy řady Scancon, v této řadě se vyrábějí snímače s malými rozměry, průměr se pohybuje od 16 mm do 115 mm. Na své malé rozměry jsou schopny dosahovat velkého rozlišení od 3600 do 12 500 poloh na otáčku. Pracovní teplota je minimálně -20°C a maximálně $+70^{\circ}\text{C}$. [29]

Další variantou inkrementálních senzorů jsou typy IRC. Snímače typu IRC 307, 317, 327 převádí pohyb na dva sinusové signály vzájemně posunuté o 90° , které mají amplitudu od 0,6 do 1,2 V při zatížení 120 Ohmů a jeden nulový pulz na otáčku, který má amplitudu od 0,2 do 0,8 při stejném zatížení. Tyto snímače lze použít s délkou kabelu až 150 m, běžně bývá délka kabelu snímače 20 nebo 50 m. [28]

Netradičním druhem tohoto typu snímače je inkrementální rotační snímač IRC 340. Tento snímač je integrovanou součástí motorů malých rozměrů o hmotnosti 0,71 kg. Převádí rotační pohyb na dva elektrické signály vzájemně fázově posunuté o 90° . Tento snímač se ale také může použít k přesnému řízení otáček, spojí-li se s řídicí elektronikou. Je konstruován pro oba směry otáčení. [28]

2-2: Technické parametry IRC 340

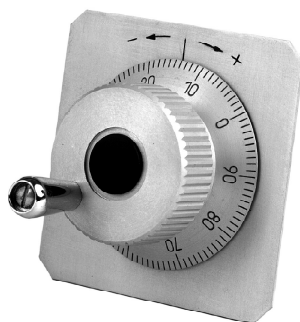


Obrázek 2.10: IRC 340 (převzato z [28])

Napájecí napětí U_N [V]	+18 až 30 V
Vlastní spotřeba [mA]	50 mA
Počet impulzů/ot.	100
Otáčky	Dle motoru (do 5000 min^{-1})

Dalším snímačem, který převádí rotační pohyb na elektrické signály, je inkrementální ruční kolečko IRC 512. Inkrementální ruční kolečko tohoto typu funguje stejně jako jiná inkrementální čidla, ale rotační pohyb je zadáván ručně. Inkrementální ruční kolečka se skládají z optického inkrementálního snímače, stupnice, ovládacího knoflíku. V osvětlovači je LED a pro své malé rozměry se zastavuje do panelů nebo přenosných zařízení. Kolečko má stupnici, která udává počet impulzů, které jsou vygenerované na daný úhel natočení. Toto ruční kolečko se vyrábí i v jiných verzích a to jako MHU 60. Dalším typem jsou čidla firmy EUCHNER, které jsou používány jako ruční generátory pulzů pro servosystémy. Nejčastěji se užívají jako ovládání jednotlivých os obráběcích strojů. Obsahují integrovaný spínač, který reaguje na stlačení ovládacího knoflíku. Udávané rozlišení je 100 nebo 25 pulsů na otáčku. [28][30]

2-3: Technické parametry IRC 512



Obrázek 2.11: IRC 512 (převzato z [28])

Napájecí napětí	+5±10%
Proudová spotřeba	40 mA
Výstupní signál	TTL
Pracovní teplota	-20° až +6° C
Počet impulzů na otáčku	100

Dalším speciálním typem inkrementálních rotačních snímačů je typ snímače IRC 900 a 905. Tento typ snímače se skládá ze dvou inkrementálních rotačních snímačů, které jsou uvnitř spojené. Výstupní hřídel je oboustranná, spojuje se pomocí homokinetické spojky. K výstupní hřídeli lze připojit další snímač, např. tachodynamo. Výstupní signály snímačů jsou stejné jako u jiných inkrementálních senzorů: 2 základní, které jsou posunuté o 90°, jeden nulový pulz a jejich negace. [28]

2-4: Technické parametry IRC 900 a 905



Obrázek 2.12: IRC 900 a 905 (převzato z [28])

Typ	IRC900	IRC905
Napájecí napětí	+10 Važ +30 V	+5 V
Výstup	Push/pull	Linkový budič
Maximální otáčky	6000 min ⁻¹	
Maximální úhlové zrychlení	40000 rad.s ⁻²	
Pracovní teplota- standardní	0° až +60° C	
Pracovní teplota - nestandardní	-25° až +60° C	

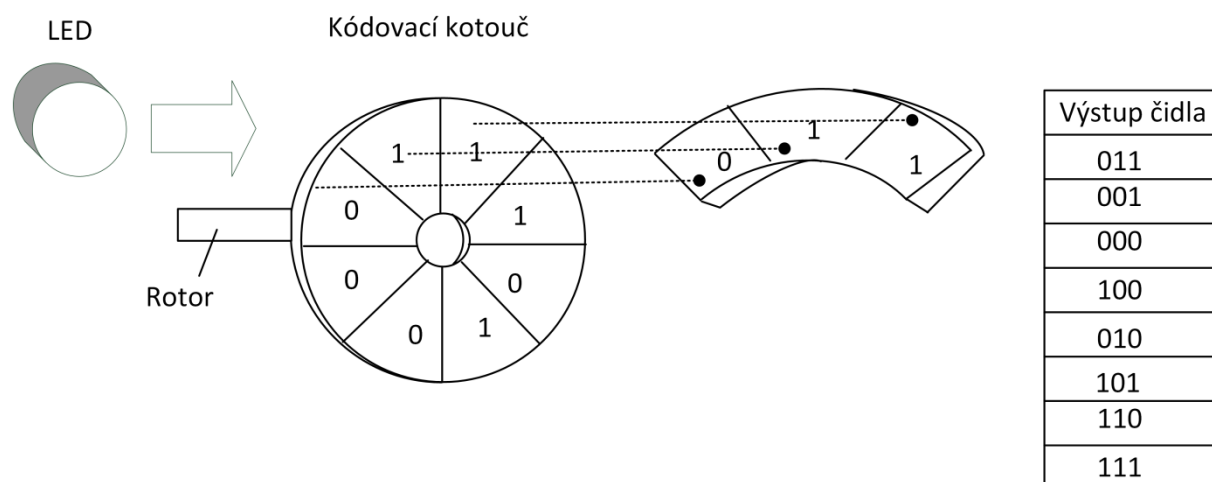
Dalšími variantami inkrementální snímačů otáček jsou snímače typu GEL, které pracují při provozní teplotě -20° až $+85^{\circ}$ C. Jejich napájecí napětí se pohybuje v rozmezí 5 -30V DC. Maximální otáčky dosahují $10\,000\text{ min}^{-1}$. Mezi varianty tohoto typu snímače patří např. GEL 207/208/260, které mají rozlišení až 270 000 pulzů na otáčku. Dalším typem může být GEL2010, který má pouzdro z nerezové oceli a je schopný odolávat nepříznivým podmínkám okolního prostředí, např. agresivním, chemickým prostředkům. Mezi čidla, která je možné použít v extrémních podmínkách, je možné snímač typu GEL 2952. Průměr hřídele je 20 mm a dokáže pracovat při teplotě -40° až $+120^{\circ}$ C. Jeho rozlišení je ale pouze 75 až 256 pulzů na otáčku. [31]

2.2.2 Absolutní snímač polohy

Vlastnosti: Absolutní snímače jsou konstruovány na stejném principu jako inkrementální snímače. Oba přenášejí podobný signál, ale výstupní signály jsou rozdílné. Absolutní čidla zaznamenávají správný údaj i po předchozí ztrátě napájecího napětí. [34]

Princip funkce: Absolutní snímače neustále zaznamenávají přesnou hodnotu pozice hřídele. Absolutní senzor má rozdílný typ kódování než čidlo inkrementální. Absolutní čidlo polohy má na rozdíl od čidla inkrementálního kotouč s ryskami, tzv. kódovací kotouč viz obr. 2.13. Na kotouči se střídají průhledná a neprůhledná políčka. Políčka jsou v několika řadách, každá řada má svůj snímač, jak je zobrazeno na obrázku 2.14. Průhledná a neprůhledná políčka jsou řazena v závislosti na použitém kódu (binární nebo Grayův). Grayův (zrcadlový) kód má vysokou odolnost vůči chybám. Je navržen takovým způsobem, že při každé změně polohy o jednu jednotku se mění hodnota pouze jednoho bitu, což zmenšuje pravděpodobnost znehodnocení informace. Při náhodné ztrátě jednoho bitu počítač počká na další impuls, kde je již poloha správná. Množství řad s políčky závisí na zvoleném rozlišení. Optické snímače mohou mít buď každý svou dráhu, anebo jsou na kraji kotouče, kde se nachází informace o poloze, která je dána pomocí jednoznačného kódu. [19][32-35]

Funkce absolutního čidla



Obrázek 2.13: Znárodnění absolutního senzoru zaznamenávající přesnou polohu [33]



Obrázek 2.14: Kódové kotoučky: a) binární kód, b) Grayův kód (převzato z [24])

Typy absolutních čidel:

Absolutní rotační snímače typu ARC jsou snímače udávající informaci o vzájemném úhlovém natočení. Okamžitá naměřená úhlová poloha je dána přesnou číselnou hodnotou úhlu natočení. Tuto hodnotu si uchová i v případě výpadku elektrické energie. Tyto snímače mají stejný průměr hřídele jako typy IRC a stejný typ provedení vývodů. Liší se pouze danou informací na otáčku (např. u typu ARC 308 $2^8=256$ kroků a ARC 310 $2^{10}=1024$ kroků). [28]

Dalším typem absolutních snímačů jsou ARC 400 až 425. Jsou to jednotáčkové absolutní snímače. Převádí úhel natočení do digitální podoby v Grayově kódu, hodnota

rozlišení dosahuje hodnoty až 2^{13} . Snímače slouží k určení polohy, zrychlení a úhlu natočení.
[28]

Další skupinou absolutních snímačů jsou snímače řady Scancon. Jsou to snímače malých rozměrů od 24 mm do 78 mm. Výstupy jsou buď optického, nebo magnetického charakteru.

Mezi absolutní snímače, které se vyznačují velkou přesností, patří absolutní snímač u servopohonu typu 8LSA, jeho přesnost je 19 bitů. Běžně využívaná přesnost u jednootáčkových snímačů je 10 nebo 12 bitů, víceotáčkové snímače mají přesnost až 27 bitů.
[37]

2.2.2.1 Grayův kód

Čidla polohy bývají ve většině případů kódovány v Grayově kódu. Grayův kód je pojmenován po svém vynálezci Frankovi Grayovi. Byl vytvořen z důvodu vyloučení výskytu chyby při přechodu mezi dvěma po sobě následujícími stavy.[38]

Pro vyjádření číselné hodnoty z Grayova kódu je nutné vytvořit vhodný algoritmus. Pro generování Grayova kódu v jazyce C byla použita funkce $b^{(b \gg 1)}$. Tato funkce vrací dekadickou hodnotu čísla zadaného v Grayově kódu nebo v binárním kódu, záleží na typu kódu na vstupu funkce. Do programu je zadávána za proměnnou b hodnota v desítkové soustavě, ta je poté převedena do Grayova kódu funkcí $b^{(b \gg 1)}$. [39]

```
unsigned int grayuv_kod(unsigned int b) {
    b= b ^ (b >> 1); //příkaz pro převod čísla v desítkové soustavě do Grayova kódu
    return b;
}
int desitkova_do_binarni(int n);
{
    int cislo=0; //cislo představuje výslednou binární hodnotu
    int rad=1; //rad představuje řád, do kterého je aktuálně zapisována 1 nebo 0
    int zbytek; //zbytek je pomocná proměnná, která zajistí zápis 1 nebo 0
    while(n!=0){
        zbytek=n%2;
        cislo=cislo+zbytek*rad;
        n=n/2;
    }
}
```

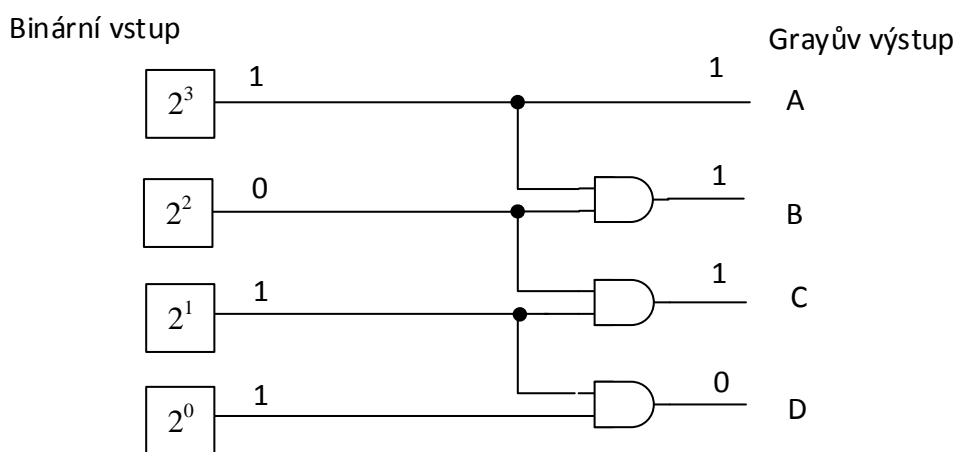
```
rad=rad*10;  
}  
return cislo;  
}
```

Při přechodu jednoho kódového slova ke druhému se mění vždy jen hodnota jednoho bitu. Tuto vlastnost splňuje jak první stav tak i poslední, to znamená, že kód je uzavřen sám do sebe viz tabulka 2-8.

Převod z Grayova kódu do binárního kódu je proveden dle následujícího postupu:

- První znak Grayova a binárního kódu jsou stejné.
- Je-li v binárním kódu na pozici vlevo od převáděné pozice 1, pak se hodnota na pozici neguje. Dále se daný postup opakuje pro počet požadovaných bitů.

Další možný postup převodu je uveden na obr. 2.15. Číslo, které je vyjádřené v binárním kódu se převede do Grayova kódu pomocí logických funkcí XOR(\oplus). Výsledkem logické funkce XOR je logická 1 v případě, že vstupní proměnné nabývají rozdílných hodnot. [38][40] [41]



2.15: Převod mezi binárním a Grayovým kódem [42]

Další možné využití Grayova kódu u absolutních snímačů polohy je zaznamenání chyb v digitální komunikaci (např. k opravě chyb u televizních zařízení). [38][40]

2-5: Převod Grayova a binárního kódu[42]

Desítková soustava	Grayův kód ABCD	Binární $2^3 2^2 2^1 2^0$
0	0000	0000
1	0001	0001
2	0011	0010
3	0010	0011
4	0110	0100
5	0111	0101
6	0101	0110
7	0100	0111
8	1100	1000
9	1101	1001
10	1111	1010
11	1110	1011
12	1010	1100
13	1011	1101
14	1001	1110
15	1000	1111

Tabulka 2-6: Grayův kód [39]

2 bitový		3 bitový			4 bitový			
0	0	0	0	0	0	0	0	0
0	1	0	0	1	0	0	0	1
1	1	0	1	1	0	0	1	1
1	0	0	1	0	0	0	1	0
		1	1	0	0	1	1	0
		1	1	1	0	1	1	1
		1	0	1	0	1	0	1
		1	0	0	0	1	0	0
					1	1	0	0
					1	1	0	1
					1	1	1	1
					1	1	1	0
					1	0	1	0
					1	0	1	1
					1	0	0	1
					1	0	0	0

2.3 Magnetické snímače

Magnetické snímače využívají magnetického pole trvalého magnetu. Nejznámější z této skupiny jsou čidla, která využívají Hallova jevu. Jsou založeny na bezkontaktním snímání, proto se mohou využít i tam, kde není vhodné použít snímač na optoelektronickém principu kvůli náročným pracovním podmínkám.

2.3.1 Rotační

2.3.1.1 Senzor s Hallovými sondami

Vlastnosti: Mezi inkrementální senzory patří senzor využívající Hallova jevu. Vynálezcem byl v 19. století Edwin Hall. Hallový snímač je bezkontaktní. Výstupní signál se dá zpracovat jak analogově, tak digitálně. Výstupními signály senzoru s Hallovými sondami jsou analogový a PWM. Hallův senzor je schopen pracovat i za vysokých rychlostí a extrémních podmínek. Jejich rozlišení je výrazně menší než u optického snímače, pro řízení motorů se šestikrokovou komutací je toto rozlišení dostačující. V případě motorů s harmonickým rozložením toku je nutné úhel natočení odhadovat vhodným algoritmem. [44]

Princip funkce: Protéká-li mezi dvěma elektrodami na protějších stranách sondy proud a zároveň kolmo na sondu působí magnetická indukce B , dochází k vychylování náboje ke stranám sondy. Příčinou této odchylky je Lorentzova síla:

$$F = Q (E + v \times B). \quad (2.6)$$

Kde Q je náboj, v značí rychlost vychýlení elektronů a B je indukce působícího magnetického pole. Během působení se mění rozložení náboje, na jedné straně je větší koncentrace elektronů než na druhé. Majoritní nosiče vytvoří příčné elektrické pole, vzniká tak Hallovo napětí U_H viz obr. 2.16. Hallovo napětí se pohybuje v řádech milivoltů.

$$U_H = \frac{R_H}{d} \cdot I_C \cdot B \cdot \sin \theta \quad (2.7)$$

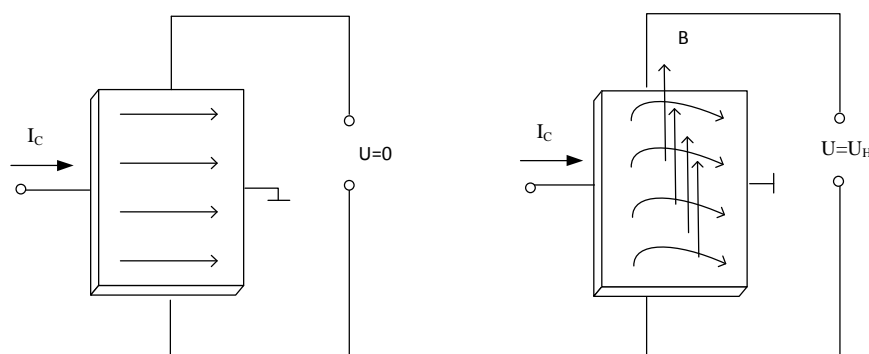
Pomocí tohoto jevu můžeme měřit magnetické pole různých materiálů nebo modulovat elektrický signál magnetickým polem. Jako materiál pro Hallové sondy se používá Ga, InAs, Si, InSb, GaAs, Ge. Výhodnější jsou z hlediska citlivosti a teplotní závislosti polovodiče ze sloučenin III. a V. skupiny prvků periodické tabulky (GaAs, InSb).

Existují dvě možná zhotovení rotačního magnetického senzoru s Hallovými sondami. První typ je založen na snímání výstupního napětí Hallových sond, které je závislé na magnetické indukci B . Toto napětí se mění v závislosti na otáčení hřídele současně se zmagnetovaným diskem. Výstupní signál je tvarován pomocí komparátoru a vzniká obdélníkový průběh. Signál kanálu A je oproti kanálu B posunut o 90° viz obr. 2.17. Druhý typ rotačního magnetického senzoru s Hallovými sondami se skládá z malého dvoupólového

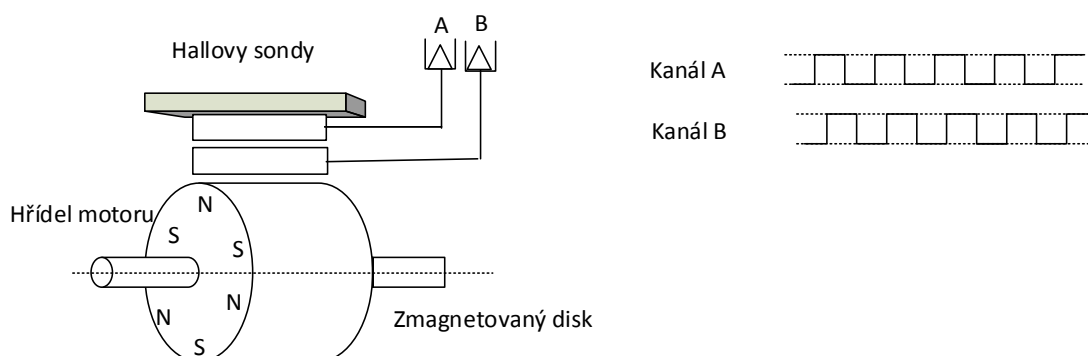
magnetu a čipu s maticí Hallových sond. Sondy v čipu snímají změny magnetického toku, které jsou závislé na Hallova napětí, které vzniká při rotaci magnetu. Tyto snímače jsou schopny reagovat pouze na složku, která je kolmá k povrchu čipu. Snímač tedy může pracovat i v prostředí s vysokou úrovní magnetického rušení. Čip je vyroben tak, aby byl schopen v jednom typu čipu zpracovat analogový, inkrementální a absolutní formát výstupního signálu viz obr. 2.18. [1][43-45]

Použití: Hallové senzory mají velký rozsah využití. Používají se pro snímání polohy v průmyslové regulaci, ke snímání otáček spalovacích motorů, u systému ABS, pro snímání rychlosti jízdy, průtoku a měření kapalin, řízení otáček stejnosměrných motorů, klávesnice PC a joystick, dveřní spínače. [45]

Princip Hallova jevu

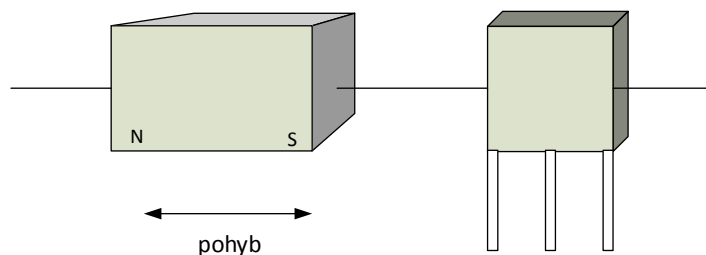


Obrázek 2.16: Princip Hallova jevu [45]



Obrázek 2.17: Princip rotačního snímače s Hallovou sondou [1]

Snímací čip s magnetem

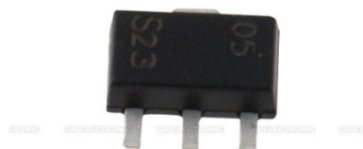


Obrázek 2.18: Snímací čip s magnetem [47]

Typy senzorů s Hallovými sondami:

Prvním typem jsou senzory řady TLE 49XX – (TLE4935L, TLE4945L, TLE4905L, TLE4935L), které jsou schopny poznat unipolární magnetické pole. [48]

2-7: Technické parametry Hallova snímače typu TLE4935L



Obrázek 2.19: TLE4935L (převzato z [48])

Jmenovitý proud [I_N]	300 A
Měřicí rozsah	0 až ± 600 A
Jmenovitý proud	150 mA
Napájecí napětí	$\pm 0,5\% I_N$
Frekvenční rozsah	Ss až 150 Hz

Druhým typem je Hallův snímač H02, jehož princip je založen na Hallově jevu s permanentním magnetem. Senzor je možné použít např. pro snímání polohy klikové hřídele motoru. [49]

2-8: Technické parametry Hallova snímače typu H02

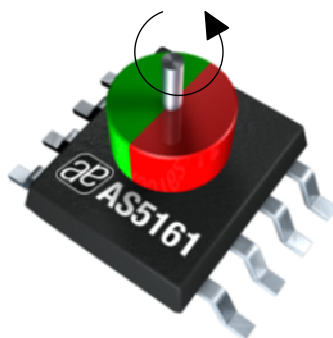


Obrázek 2.20: Hallův snímač typu H02 (převzato z [49])

Napájecí napětí	4,5-30 V
Odběr proudu	9 mA
Frekvence	0-25000 min ⁻¹
Jmenovité napětí	40 V
Jmenovitý proud	40 mA

Dalšími typy magnetických inkrementálních snímačů jsou typy MIRC. Tyto magnetické inkrementální rotační snímače udávají informaci o úhlu natočení a počtu otáček. Typy MIRC60x, MIRC 800, 805, 808 mají přírubu se servo-drážkou, zatímco typ MIRC61x vlastní upínací přírubu, oba dva tyto typy mají vnější průměr hřídele 6 mm. Typ MIRC8x8 se používá ve spojení s bezkartáčovými vícepólovými motory. MIRC840/845 se liší naopak tím, že mají externí nosič magnetu. Typy MIRC 840 a MIRC 845 se používají u bezkartáčových jednopólových motorů. Typ snímače MIRC64x je zkonstruován bez hřídele, proto zde musí být nosič magnetu, který má průměr 6 mm nebo 8 mm. [28]

Mezi bezkontaktní magnetické snímače založené na Hallově jevu, patří senzor typu AS5161 viz obr. 2.21. Tento 12 bitový snímač polohy a úhlu natočení snímá přesný úhel natočení v celém rozsahu 360° s přesností až 0,09°. Výstupní signál bývá ve formě PWM. Pro zvláštní programovatelné funkce pozice start a stop funguje s přesností 14 bitů (0,02°=16384 otáček na polohu). [50]



2.21 AS5161 (převzato z [50])

Další druhy snímačů typu ASXXXX se liší se danou přesností (8, 10, 12, 14 bitů). U těchto snímačů jsou kromě analogových a digitálních výstupních signálů, také výstupní signály typu sin, cos. [50]

Další variantou bezkontaktního magnetického snímače je snímač typu MLX90316KDC-BDG-SPI. Bezdotykové snímání polohy pomocí magnetu na rotujícím předmětu je lehce proveditelné a relativně nízkonákladové. [46]

Dalším typem rotačních magnetických čidel je magnetické absolutní čidlo typu GEL. Snímače typu GEL 2035 a GEL 235 pracují na principu snímání pohybu ozubeného kola. Senzory odolávají rázům a vibracím, také mají dlouhou životnost bez nároků na údržbu. Správnou funkci snímače neovlivní ani silné elektromagnetické impulzy. [31]

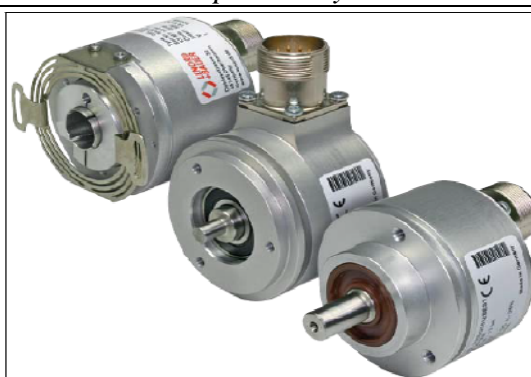
2-9: Technické parametry GEL 2035



Obrázek 2.22: GEL 2035 (převzato z [31])

Výstupní kód	Binární, grayův
Napájecí napětí	10 až 30V DC
Rozlišení na jednu otáčku	12 bitů
Frekvence	40 kHz až 500 kHz
Výstupní kód	Grayův
Přesnost	0,8 (>9 Bit)
Provozní rychlost	6000 min ⁻¹ (krátkodobě 10 000 min ⁻¹)
Pracovní teplota	-40°C až 85°C

2-10: Technické parametry čidla GEL 235



Obrázek 2.23: GEL 235 (převzato z [31])

Napájecí napětí	10 až 30V DC
Rozlišení na jednu otáčku	8,9,10 až 16 bitů (65 536 kroků) na otáčku – u jednootáčkového provedení 12 bitů (4096 otáček) – u víceotáčkového provedení
Provozní rychlost	12000 min ⁻¹
Pracovní teplota	-40° až + 100° C
Provozní teplota	-40° až +105° C (120° C v krátkém čase)
Výstupní kód	Gray nebo binární
Přesnost	0,08°

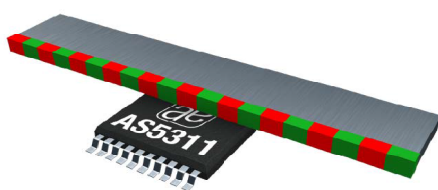
2.3.2 Lineární

2.3.2.1 Inkrementální magnetické lineární snímače

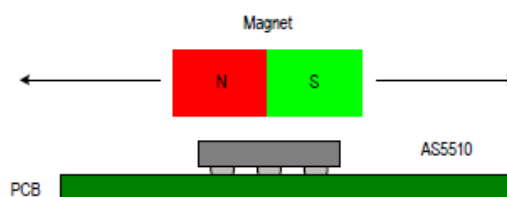
Další skupinou je magnetický lineární senzor. Hallův snímač pracující v lineárním režimu převádí velikost magnetického toku na napětí. Tímto snímačem lze vyhodnocovat vzdálenost od konstantního zdroje magnetického toku (obvykle permanentní magnet) nebo velikost proudu procházejícího elektromagnetem v konstantní vzdálenosti od snímače. Tyto senzory je možné použít pro mechanické systémy, kde nelze umístit snímač otáček na konec rotující části (jako je např. dutá hřídel). Obvod pro snímání polohy je upevněn mimo osu. [51]

Mezi tyto typy se řadí snímač AS5311 viz obr. 2.24, tento bezkontaktní snímač je charakterizován obzvláště svou velkou rozlišovací schopností pro určení přesné polohy. Snímač má dva 12 bitové digitální výstupy a je schopen pracovat za provozní teploty -40° až $+125^{\circ}\text{C}$. [52]

Dalším druhem snímače je typ AS5510. Tento typ má rozlišení 10 bitů. Snímač je schopen měřit polohu, kterou je snadné získat z horizontálního pohybu jednoduchého dvou pólového magnetu, jak je vidět na obr. 2.25. Určení polohy závisí na velikosti magnetu a na tom, jak prudce se pohne s magnetem. Vychýlení magnetu do strany je v rozmezí 0,5 – 2 mm. Velikost vychýlení může být měřena se vzduchovou mezerou až 1 mm. Senzor je schopen pracovat při teplotách -30° až $+85^{\circ}\text{C}$. [52]



2.24: Lineární magnetická snímač typu AS5311
převzato z [52]



2.25: Lineární magnetický snímač typu AS5510
převzato z [52]

2.4 Kapacitní čidla polohy

Vlastnosti: Existují dva druhy kapacitních snímačů: bezdotykové a dotykové. Pro měření polohy se používají bezdotykové snímače. Jsou označovány jako senzory přiblížení. [53]

Princip funkce: Kapacitní senzory fungují na principu kondenzátoru, který je sestaven z dvojice nebo trojice elektrod, z nichž alespoň jedna je pohyblivá. Pohyblivá elektroda je spojena s měřeným systémem. Snímače reagují na změnu kapacity, která je vyvolána přiblížením předmětu. Využívají tedy změny vzdálenosti nebo změnou plochy elektrod. Pro určení velikosti kapacity je využit známý vztah pro rovinný kondenzátor:

$$C = \varepsilon_0 \varepsilon_r \frac{S}{d_2} [F] \quad (2.8)$$

Z výše uvedeného vztahu je vidět, že kapacita C závisí na změně vzdálenosti mezi elektrodami d_2 , ploše překrytí elektrod S a na změně poměrné permitivity dielektrika ε_r . ε_0 značí permitivitu vakua.

Pro měření úhlového natočení se často využívá kapacitní senzor složený ze dvou nepohyblivých elektrod a jedné pohyblivé elektrody, která je mechanicky spojena s měřeným objektem. Při natočení pohyblivé elektrody dochází ke změně plochy překrytí mezi pohyblivou a nepohyblivou elektrodou. Změna plochy překrytí způsobí změnu vzájemné kapacity. Jako měřicí elektroda se používá čtvercová destička vyrobená z konstrukční oceli. Změna kapacity nastává v případě, že pohyblivá elektroda bude vodivá a uzemněná. Bude-li elektroda vodivá a neuzemněná, kapacita se zvýší. Bude-li elektroda nevodivá, kapacitu bude možno detekovat pouze velmi blízko snímače, a také se bude moci měnit jen změnou permitivity. [4][53]

Použití: Čidla jsou používána k bezdotykovému snímání pevných předmětů, ale i kapalin a sypkých hmot. Kapacitní senzory mají dobrou linearitu, jsou tedy poměrně přesné. Také se dají používat při výrobě kabelů například při hlídání přetržení vodiče a díky své citlivosti se můžou použít při hlídání přítomnosti malých kovových předmětů. Tento snímač je schopen měřit jen malé natočení. [53]



Obrázek 2.26: Ukázka kapacitního snímače (převzato z [53])

2.5 Ultrazvukové senzory

Vlastnosti: Jedná se o senzory lineární. V prostředí, kde nelze použít optoelektronické senzory, se používají senzory ultrazvukové. Vyrábějí se ve válcových nebo hranatých pouzdrech. [55]

Princip funkce: Ultrazvukové senzory, které se používají pro měření vzdálenosti, pracují na principu měření času odezvy signálu. Ultrazvukové čidlo vysílá vysokofrekvenční impuls, který se šíří prostorem rychlostí zvuku. Pokud narazí na nějaký předmět (překážku), odrazí se a vrátí se zpátky k čidlu jako ozvěna. Z časového intervalu mezi vyslaným impulzem a návratem ozvěny je vyhodnocena vzdálenost k předmětu. Tento snímač může sloužit jako vysílač i jako přijímač. [12][55]

Vzdálenost je vypočítána dle následující rovnice: $d_3 = \frac{c \cdot T}{2}$

Použití: Ultrazvukové snímače se používají v prostředí, kde využití optoelektronických snímačů není možné nebo vhodné. Tímto prostředím je myšleno například prostředí prašné nebo vlhké. Dále se tato čidla využívají v odměřovacích systémech pro parkování automobilů a při měření výšky hladiny. Další funkce tohoto snímače je rozpoznání předmětů a jejich vzdálenosti na uchopení u robotů. [54]



Obrázek 2.27: Ukázka ultrazvukového čidla (převzato z [55])

3 Čidla otáček

Kvalita regulace elektrických pohonů je závislá na snímačích polohy nebo úhlové rychlosti. Pro řízení synchronních motorů je nutná přesná znalost polohy rotoru. Řídící algoritmy asynchronních a stejnosměrných motorů nevyžadují nutně přesnou znalost polohy. Pro pohony s těmito motory je možné využít snímačů udávající pouze rychlost otáčení. Těmito snímači jsou například tachogenerátory.

3.1 Indukční čidla

3.1.1 Tachodynamo

Vlastnosti: Tachodynamo jsou jedny z neznámějších čidel rychlosti, jsou konstruovány jako dynamo (stejnosměrné generátory), anebo jako alternátory (generátory střídavého napětí). Tachodynamo se vyznačují menšími rozměry, protože není potřeba velkého výkonu. Z důvodu mechanické odolnosti se některá tachodynamo vyrábějí větších rozměrů. Výhodou tohoto druhu snímače je velká citlivost, nedostatkem snímače je poměrně velké zvlnění a obtíže s komutací. [6]

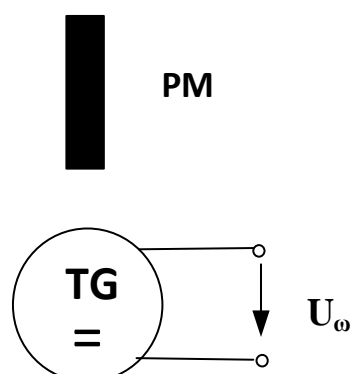
Princip funkce: Tachodynamo má stator tvořen permanentním magnetem a v magnetickém poli se otáčí rotor s komutátorem. Na komutátor je vyvedeno vinutí, kde se odebírá stejnosměrné napětí. Výsledná magnetická indukce vznikající ve vzduchové mezeře má téměř obdélníkový průběh. Pro zajištění správné funkce tachodynamo je nutné zajistit, aby bylo při provozu co nejméně zatěžováno. [28][21]

Napětí, které se indukuje ve vinutí a je úměrné rychlosti otáčení při nezatíženém tachodynamu:

$$U = K \theta \omega = K_{TD} \omega [V] \quad (2.9)$$


Konstanta tachodynamo K_{TD} je udávána výrobcem na štítku stroje, např. 80V/1000 min⁻¹.

Použití: Tachodynamo se používají ke snímání úhlové rychlosti. Nevýhodou snímače je problém s komutací kvůli jiskření a opotřebení a jeho výhodou je vysoká citlivost. Tachodynamo se běžně používá pro otáčky 6000 min⁻¹. [12][57]



Obrázek 3.1: Princip tachodynamu [13]

Typy tachodynamu:*3-1: Technické parametry stejnosměrného tachodynamu typu K5A7-00, K10A6-00*

		
		3.2: Tachodynamo K10A6-00(převzato z [57])
Parametry	K5A7-00	K10A6-00
Rozsah otáček (min^{-1})	0-6000	0-6000
Napětí při 1000min^{-1} (V)	20	80
Proud (mA)	0,2	20
Efektivní hodnota zvlnění (%)	0,5	0,5
Odchylka od linearity (%)	1	1
Teplota okolí ($^{\circ}\text{C}$)	-50 až $+50^{\circ}\text{C}$	-50 až $+50^{\circ}\text{C}$

3-2: Technické parametry tachodynamu typu K4A1, K5A1, K10A1

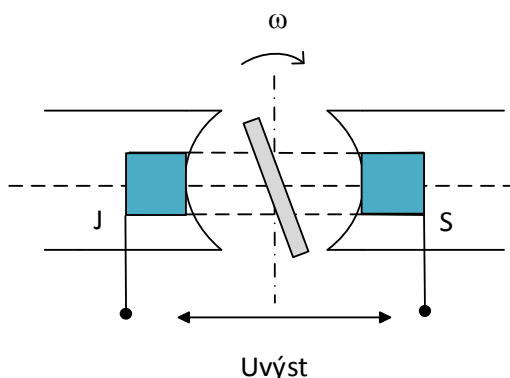
Typ	K4A1	K5A1	K10A1
Rozsah otáček (min^{-1})	0 až 5000	0 až 6000	0 až 6000
Výstupní napětí při 1000 min (V)	2	20	80
Příkon nezatíženého tachodynamu ($\text{W}/1000\text{min}^{-1}$)	0,4	0,33	0,5

3.1.2 Tachoalternátor

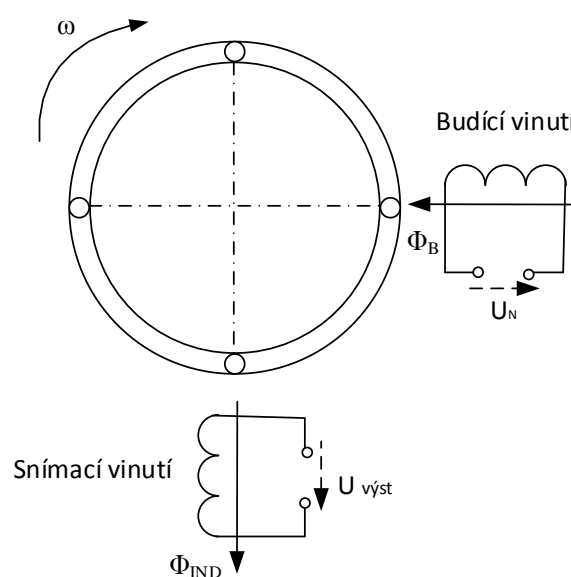
Vlastnosti: Tachoalternátor je také nazývaný střídavý generátor, protože má výstupní napětí střídavé. Jeho funkce je stejná jako funkce tachodynamu.

Princip funkce: Permanentní magnet sloužící jako rotor může mít různý počet pólových dvojic a otáčí se mezi pólovými nástavci statoru s vícepólovým vinutím. Otáčením permanentního magnetu vzniká indukované napětí, které je snímáno kroužky, nebo jednoduchým vinutím viz obr. 3.3. Napětí se je úměrné rychlosti otáčení ω . Další variantou je tachogenerátor s bubínkovým rotorem, který má na statoru dvě cívky pootočené o 90° viz obr. 3.4. Budící cívka je napájena střídavým napětím. Druhá cívka je snímací, zde se indukuje výstupní napětí a frekvence stejná jako frekvence budícího napětí. [12]

Použití: Požívají se pro dálkové měření otáček a měření otáček u dopravních strojů. Nejčastěji využívaný rozsah je 8000 min^{-1} . [12][57]



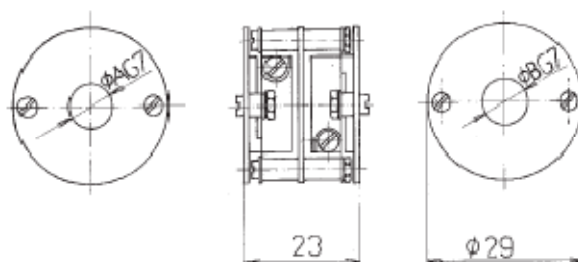
Obrázek: 3.3: Tachoalternátor s permanentním magnetem [12]



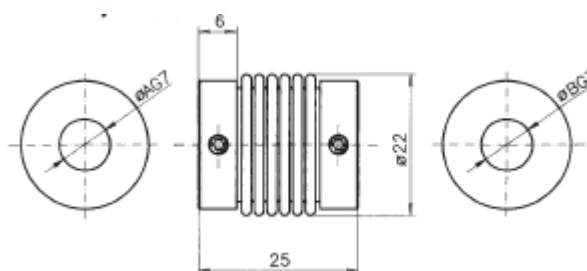
Obrázek 3.4: Tachoalternátor s bubínkovým rotorem [12]

4 Montáž senzoru na elektromotor

V této části je popsána montáž senzoru na elektromotor u senzorů typu IRC, ARC, MIRC. Prostředí, kde je senzor provozován, nesmí obsahovat agresivní plyny, teplota se pohybuje v rozmezí -40° až $+60^{\circ}$ C, relativní vlhkost dosahuje hodnoty 95%, maximální absolutní vlhkost 40 g.m^{-3} a chvění motoru nepřesahuje zrychlení 3 G do 400 Hz. Sensory typu IRC, ARC, MIRC se běžně montují do zařízení pomocí šroubů nebo drážky. Výrobci doporučují použít vhodných kinetických spojek, které slouží k vyrovnání výchylek v axiálním nebo radiálním směru. Spojky vyrovnávají nepřesnosti během montáže a jsou schopné zaručit, že kinematická chyba při přenosu nepřekročí povolené hodnoty. Pro montáž na motor se používají spojky planžetové. Tato spojka je zhotovena ze dvou hliníkových přírub a pružné části. Pružná část je tvořena mezikusem a dvěma planžetami. Druhá spojka je vlnovcová. Tato spojka je zhotovena z nerezového vlnovce a na hřídel upevňována šrouby pootočenými o 90° . Spojení snímače se zařízením musí být konstruováno tak, aby nedošlo k překročení hodnoty maximálního povoleného radiálního a axiálního namáhání hřídele. U těchto snímačů je možné se setkat s hodnotami: axiální namáhání 20N, radiální namáhání 40N. [28][58]



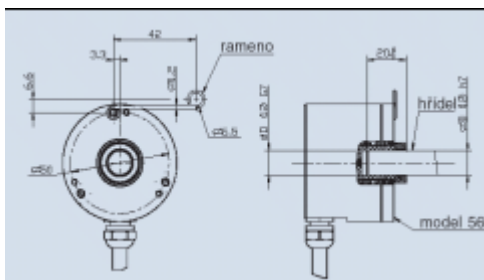
Obrázek 4.1: Rozměrový náčrtek planžetové spojky (převzato z [28])



Obrázek 4.2: Rozměrový náčrtek vlnovcové spojky (převzato z [28])

Pro účely montáže se snímače dělí na snímače s dutou nebo plnou hřídelí. Namáhání hřídele se liší u snímačů s dutou nebo plnou hřídelí. U snímačů s dutou hřídelí jsou hřídel a motor pevně spojeny. Necitlivost k nesouososti je velká při malých otáčkách a nízká při

vysokých otáčkách. U snímače s plnou hřídelí je kladen požadavek na přesné nastavení spojky. Necitlivost k nesouososti závisí na druhu spojky a je zde často velmi omezená. [58]



4.3: Montáž snímače s dutou hřídelí (převzato z [57])

Během montáže senzoru na motor je nutné udržovat souosost spojení. Držák snímačů je univerzální pro všechny typy. Kabel od snímače musí být zachycen tak, aby snímač vlastní vahou nenamáhal. V mokrých prostředích nebo v prostředích, kde je pravděpodobnost stříkání či stékání kapaliny, se nedoporučuje polohovat snímače hřídelí nahoru. [28]

IRC čidla jsou dostupná s různým provedením vývodů. Lze najít průchodky s kabelem nebo s konektorem, které mohou mít radiální nebo axiální provedení. Další možností je kabel s průchodkou axiální/boční. Vnější průměr hřídele se pohybuje v rozmezí 5 mm- 12 mm u prodlouženého hřídele až 35 mm. Na hřídeli může být také natmelený pastorek, který má průměr 8 mm. [28]

5 Shrnutí

Na senzory jsou kladeny rozdílné nároky, požaduje se, aby byly co nejpřesnější s minimem chyb a s dostatečným rozsahem. Dalším požadavkem je správná funkce snímače v extrémních podmínkách. Nelze sestrojít univerzální senzor splňující všechny požadavky. Každý senzor má jiné parametry, je určený pro jiné pracovní podmínky a pro jiné aplikace.

Absolutní čidla se montují zejména na pohony se synchronními motory. Poloha rotoru musí být velmi přesně měřena. Motory EC (třífázové synchronní motory) pracují v dnešní době již s programovatelným automatem nebo s počítačem. Absolutní čidla jsou nejpřesnější, největší přesnost má snímač u servomotorů 8LSA. Údaj o poloze se zachovává i po výpadku napájení.

Polohu rotoru u synchronního motoru je možné určit také pomocí resolveru. Tento snímač má největší rozsah provozních teplot a také největší rozsah otáček. Na rozdíl od ostatních čidel, je velmi robustní a necitlivý k nečistotám.

Inkrementální čidla se používají zejména u velmi často v průmyslu využívaných asynchronních motorů. Inkrementální snímače jsou nerozšířenějšími, jejich maximální hodnoty rozlišení se pohybují kolem 16 bitů. Běžně neudávají informaci o přesné poloze, tu lze určit pouze jednou za otáčku pomocí referenčního impulzu. Snímače jsou křehké, výjimkou je inkrementální ruční kolečko, které je určené do extrémních podmínek. Inkrementální čidla se používají jako rychlostní zpětná vazba pohonů. Rychlost je možné dopočítat z naměřené polohy a času měření. Další využití těchto senzorů je v manipulační technice, v robotice, u dopravních prostředků a v letecké technice

Mezi běžně využívané patří také senzory pracující na principu Hallova jevu. Tyto snímače se používají nejen pro řízení otáček stejnosměrných motorů, ale i do PC klávesnic a joysticků, u systémů do PC a ABS. Hallovy snímače jsou bezdotykové a mají různé typy provedení. Existují ve formě snímačů rotačních a lineárních, dále existují ve formě čipu, ve kterém jsou Hallovy sondy uspořádané v matici.

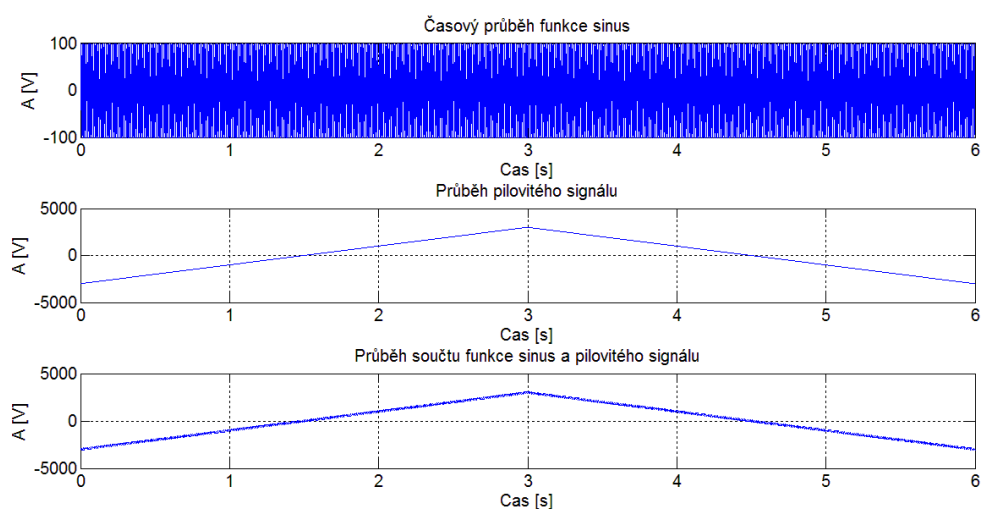
Dalšími bezdotykovými senzory jsou kapacitní a ultrazvukové senzory. Kapacitní snímače reagují na změnu kapacity, která je vyvolána přiblížením předmětu. Ultrazvukové senzory, které se používají pro měření vzdálenosti, pracují na principu měření času odezvy.

Pro měření otáček motoru u pohonů se stejnosměrnými motory jsou používány tachogenerátory. Jsou konstruovány jako dynama (stejnosměrné generátory) nebo v podobě alternátorů (generátorů střídavého napětí).

6 Simulace čtení a zpracování signálu z rotačního čidla polohy

V této části práce je uvedena simulace zpracování údaje z absolutního senzoru polohy elektromotoru. Simulace slouží k ověření správné funkce navrženého zpracování údaje z čidla, pozornost je věnována sledování přesnosti vyhodnocení polohy a okamžité rychlosti v závislosti na periodě vzorkování údaje ze simulovaného senzoru. Dále je zkoumán vliv přesnosti (bitovém rozlišení) čidla na přesnost vyhodnocení rychlosti otáčení.

Nejprve byl vytvořen signál ve tvaru pilz představující průběh otáček motoru. Výpis simulačního modelu je uveden v příloze. Z lineárního předpisu přímky $y=kx+q$ byl vytvořen průběh otáček $y1$ s kladnou směrnici rostoucí od -3000 do 3000. Poté byl podmínkou změněn směr, který zajistil klesání otáček. Doba, za kterou vzroste průběh otáček z -3000 do 3000, je 3s. Tento pilovitý průběh otáček představuje idealizovaný průběh. K tomuto průběhu byl přičten sinusový signál $y=A*\sin(fi)$ o frekvenci 100 Hz a amplitudě 10. Tímto signálem byly zjednodušeně nasimulovány různé vlivy působící na měření otáček, jako např. mechanické vlastnosti pohonu a negativní vlivy řídicích algoritmů na průběh momentu (a tím i otáček) stroje. Výsledný součet funkcí byl uložen do proměnné $sum=y+y1$.



Obrázek 6.1: Časový průběh funkce sinus a pilovitého signálu a jejich sečtení

V dalším kroku byla zvolena perioda vzorkování rychlosti 1 ms. Perioda vzorkování označuje okamžiky, kdy by se v reálném případě opravdu odečetla hodnota z čidla. Po vzorkování následovalo kvantování, kterého bylo dosaženo pomocí převodu hodnoty otáček

z datového typu double na int a zpět. Výsledná hodnota byla přenásobena hodnotou 2^x , kde x představuje přesnost čidla.

V následujícím odstavci je popsán algoritmus vzorkování. Čas t_{vz} představuje periodu vzorkování. Časy t a t_{vz} jsou porovnávány a v případě jejich rovnosti, dojde k vzorkování polohy. Z otáček y je dále vypočítána rychlost otáčení ω . Toto je zjednodušující předpoklad, který nelze využít v případě reálného pohonu, kde je nejprve vzorkována poloha, ze které se musí určit úhlová rychlost:

- $\omega = y * 2\pi * P_p / 60$

Z úhlové rychlosti je vypočítán přírůstek úhlu df_i :

- $df_{imer} = \omega * dt_{vz}$

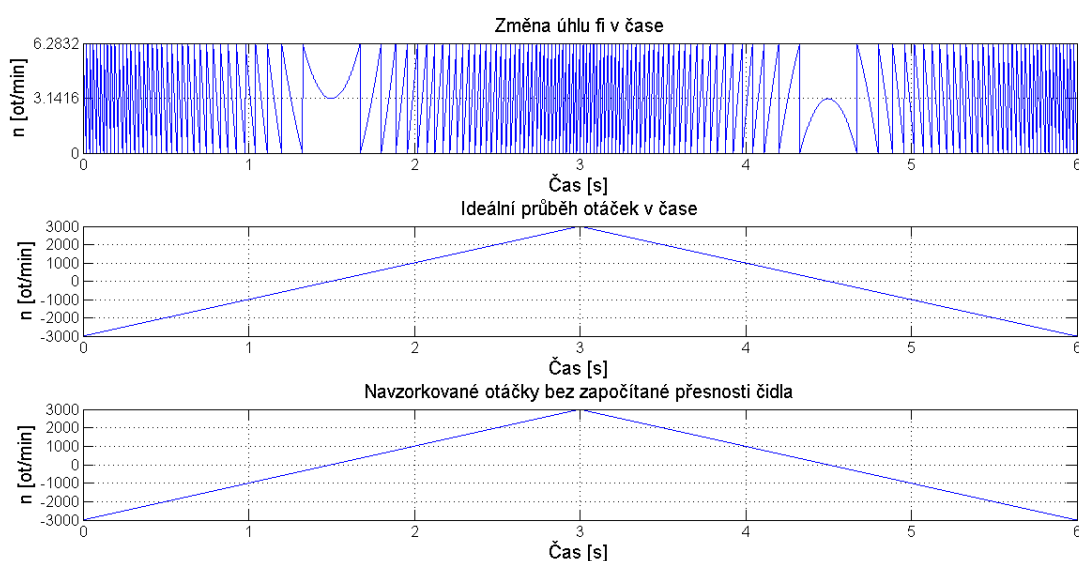
Celkový výpočet úhlu f_i :

- $f_{imer} = f_{imer} + df_{imer}$

Při rozdílu dvou poloh motoru je třeba ošetřit případ, kdy se přechází z úhlu 2π na 0 nebo naopak následující podmínkou:

- $if((\omega_1 > \omega) || (\omega_1 < -\omega))$

Při vypočtení nereálné hodnoty otáček motoru je hodnota n_1 nahrazena hodnotou otáček z předešlého kroku výpočtu rychlosti. Tato hodnota je uložena v n_2 .



Obrázek 6.2: Zobrazení změny úhlu f_i v čase a průběh ideálních a navzorkovaných otáček při $t_{vz} = 10^{-3}$

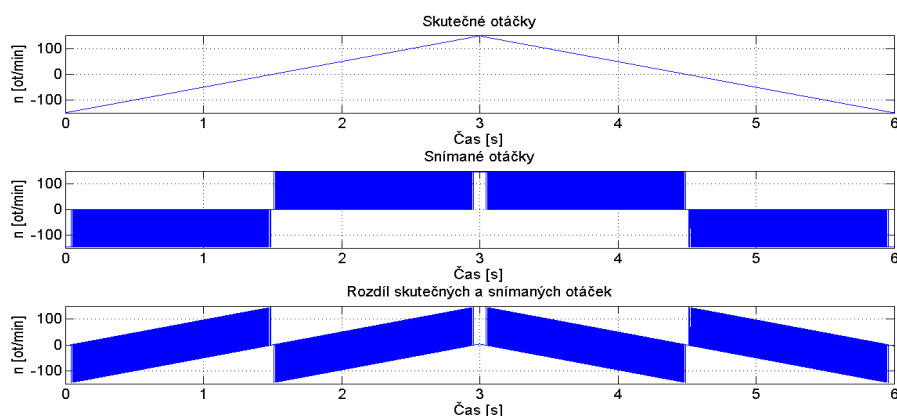
6.1 Změna vzorkovací frekvence a změna přesnosti

V následujících grafech jsou zobrazeny skutečné a snímané otáčky a jejich rozdíl. Hodnoty otáček byly získány na základě různého bitového rozlišení čidla a různé vzorkovací frekvence. Algoritmus pro zpracování údajů čidla polohy počítá rychlost motoru z rozdílu dvou po sobě jdoucích poloh rotoru.

Na prvním obrázku 6.3 jsou zobrazeny snímané otáčky při malé rychlosti. Nejnižší rychlost se pohybovala v rozmezí od -150 do 150 min^{-1} . Při nižších otáčkách čidlo nevracelo údaj o rychlosti. Použitá vzorkovací frekvence byla 10^{-3} a přesnost 12 bitů.

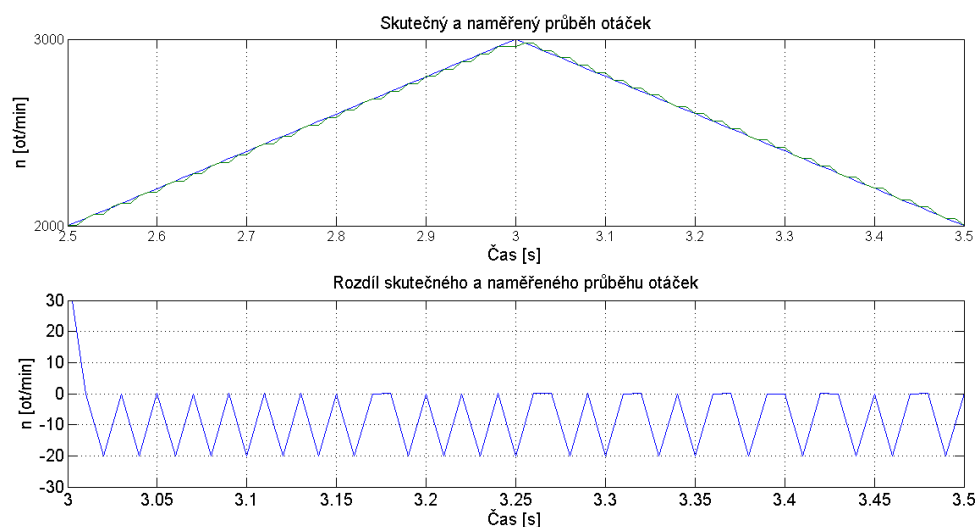
Na obrázcích 6.4 až 6.15 je rozsah měřených otáček od -3000 do 3000 min^{-1} . Zde byly použity rozlišení 8, 12, 16 a 19 bitů. Ke každému rozlišení náleží 3 grafy o periodě vzorkování 10^{-2} , 10^{-3} a 10^{-4} s. Nejvhodnější vzorkovací periodou byla hodnota 10^{-3} s. V případě vzorkovací periody 10^{-2} a 10^{-4} s je průběh otáček zkreslený. Čidlo s větší bitovou přesností odpovídá přesnějšímu odečítání hodnot.

U 8 bitového čidla se chyba při měření na 3000 otáčkách vyskytovala kolem 30 min^{-1} , u 12 bitového čidla kolem 12 min^{-1} a u 16 bitového se objevuje chyba kolem 3 min^{-1} .

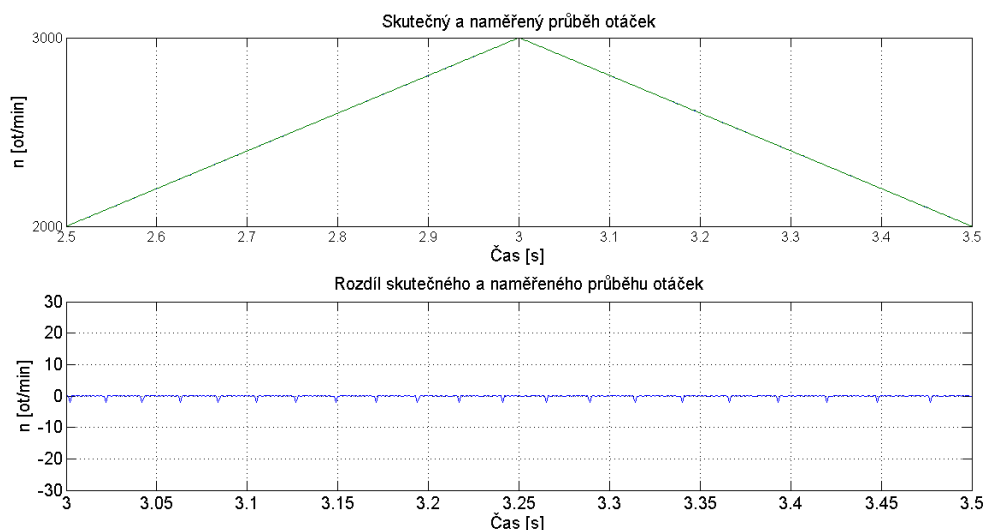


Obrázek 6.3: Průběh skutečných a vypočtených (vzorkovaných) otáček a jejich rozdíl

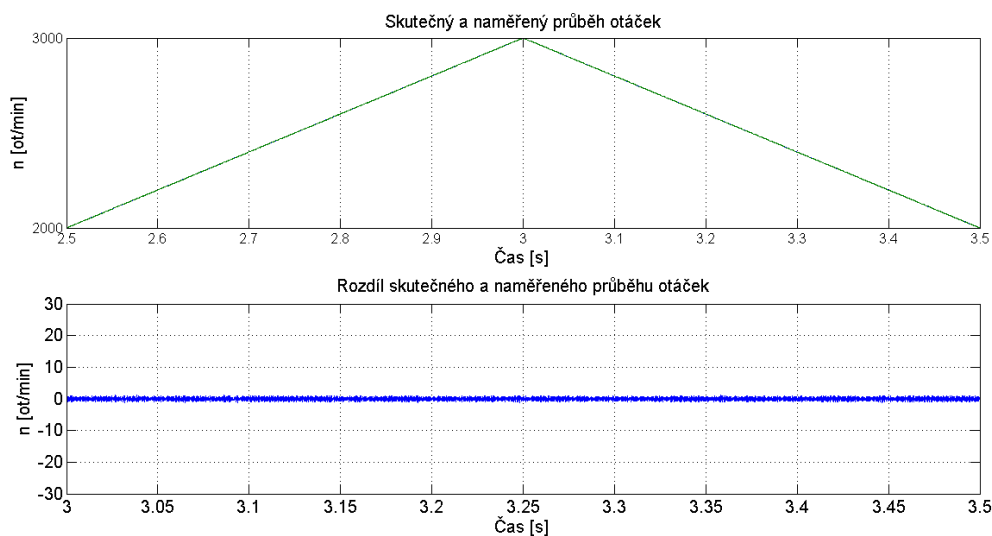
Přesnost 19 bitů



Obrázek 6.4: Průběh skutečné a naměřené rychlosti při $t_{vz}=0,01s$ a jejich rozdíl

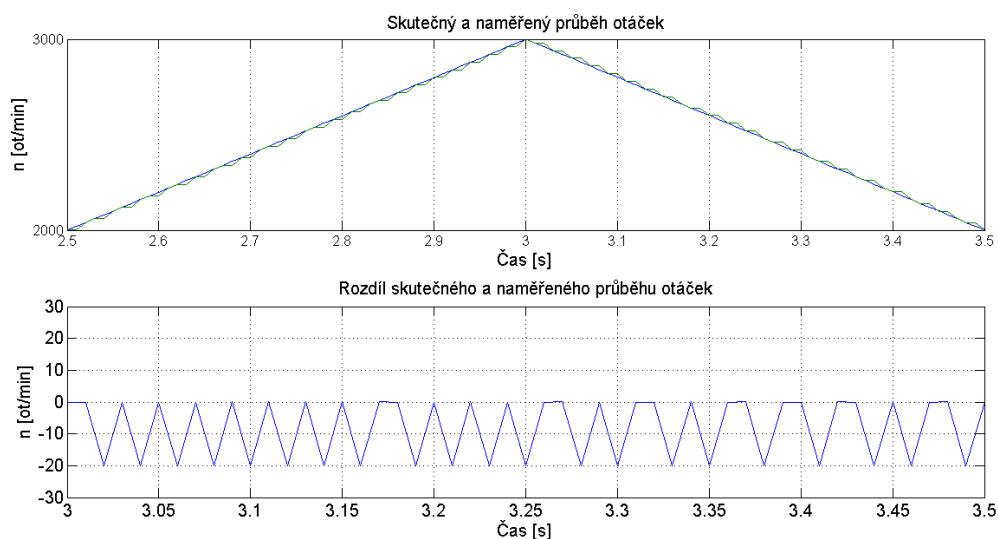


Obrázek 6.5 :Průběh skutečné a naměřené rychlosti při $t_{vz}=0,001s$ a jejich rozdíl

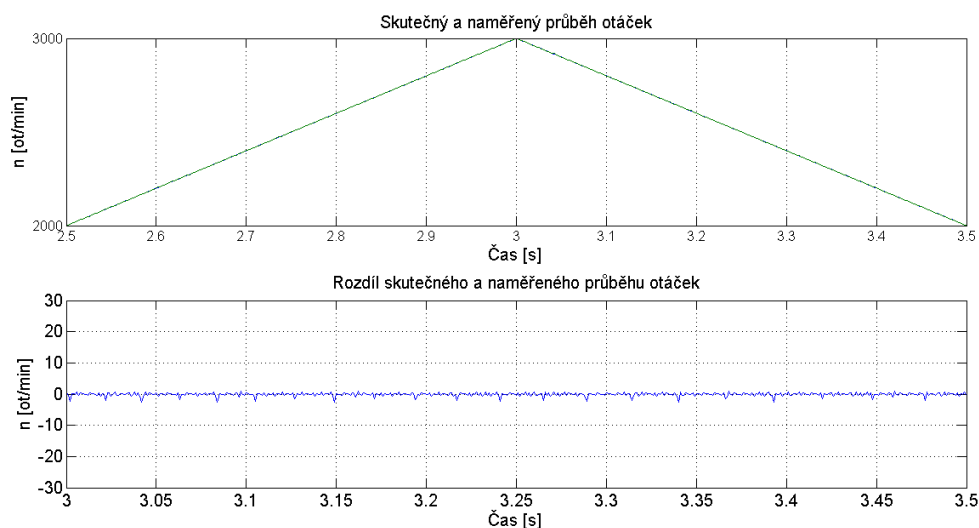


Obrázek 6.6: Průběh skutečné a naměřené rychlosti při $t_{vz}=0,0001s$ a jejich rozdíl

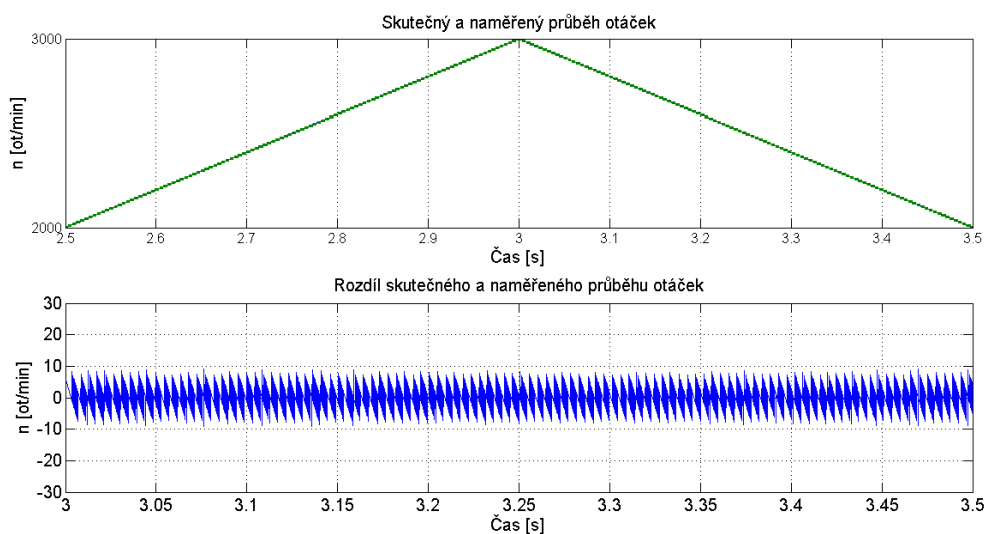
Přesnost 16 bitů



6.7: Průběh skutečné a naměřené rychlosti při $t_{vz}=0,01s$ a jejich rozdíl

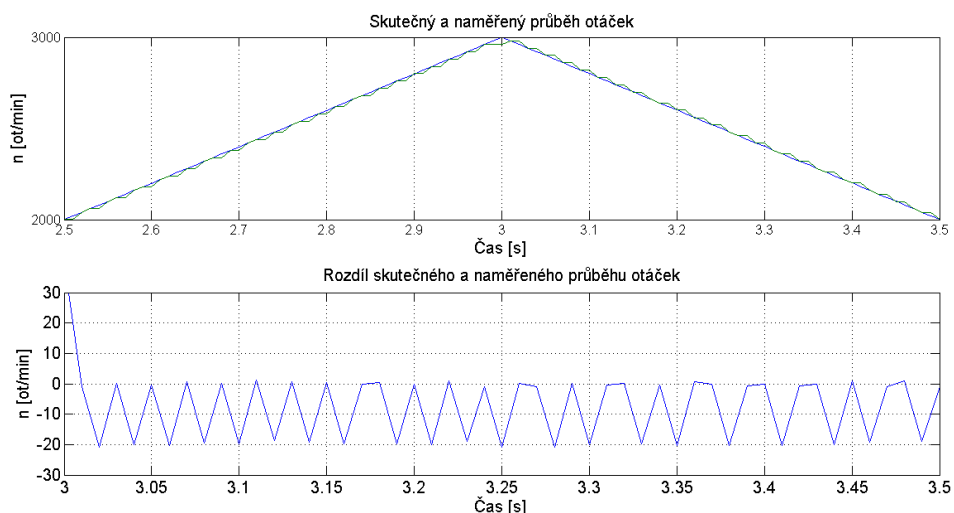


Obrázek 6.8: Průběh skutečné a naměřené rychlosti při $t_{vz}=0,001s$ a jejich rozdíl

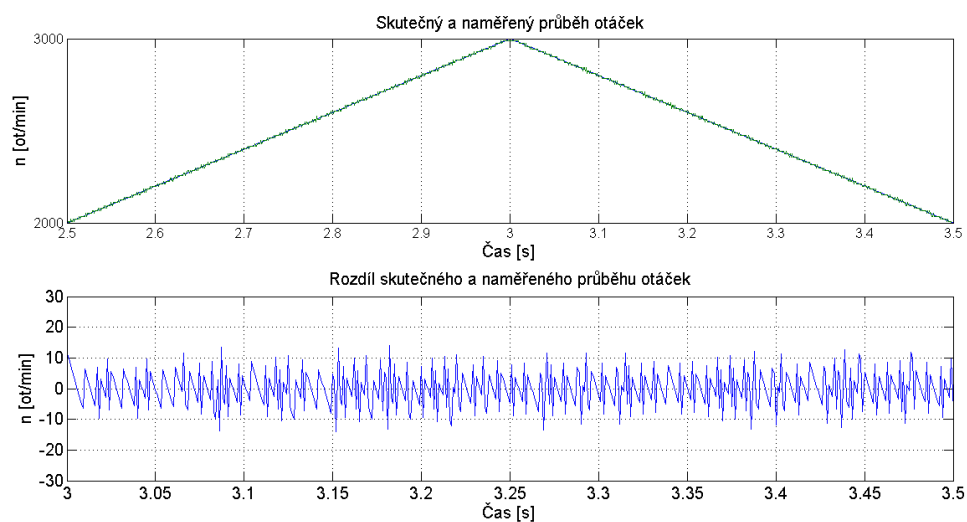


6.9 Průběh skutečné a naměřené rychlosti při $t_{vz}=0,0001s$ a jejich rozdíl

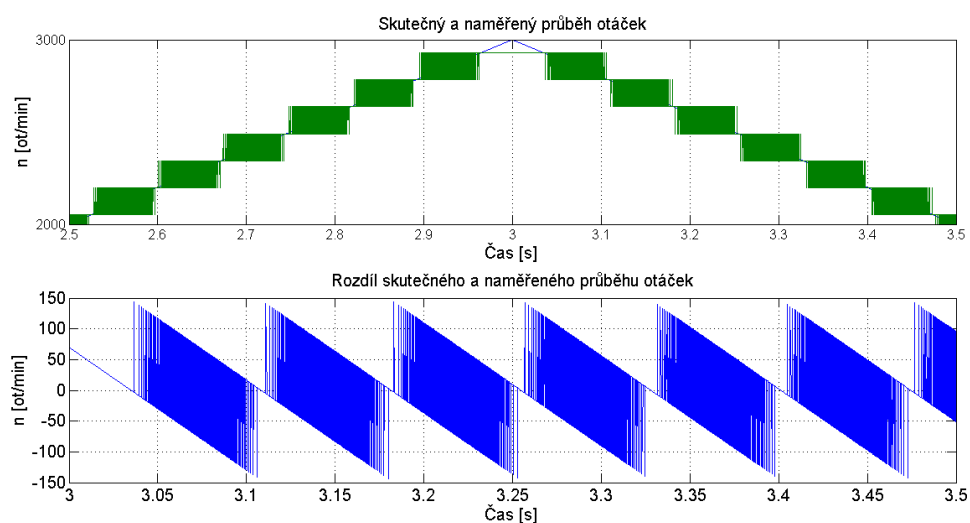
Přesnost 12 bitů



Obrázek 6.10 : Průběh skutečné a naměřené rychlosti při $t_{vz}=0,01s$ a jejich rozdíl

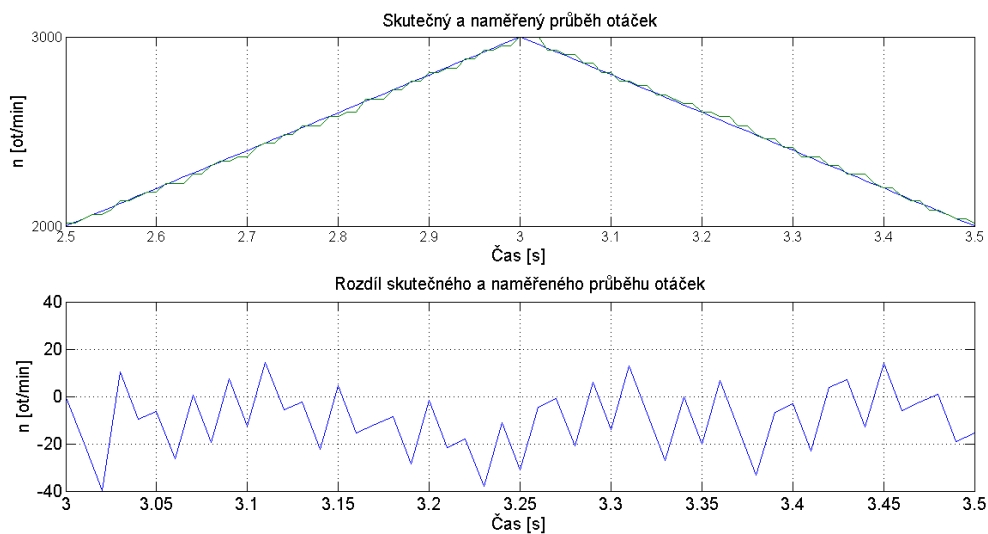


Obrázek 6.11: Průběh skutečné a naměřené rychlosti při $t_{vz}=0,001s$ a jejich rozdíl

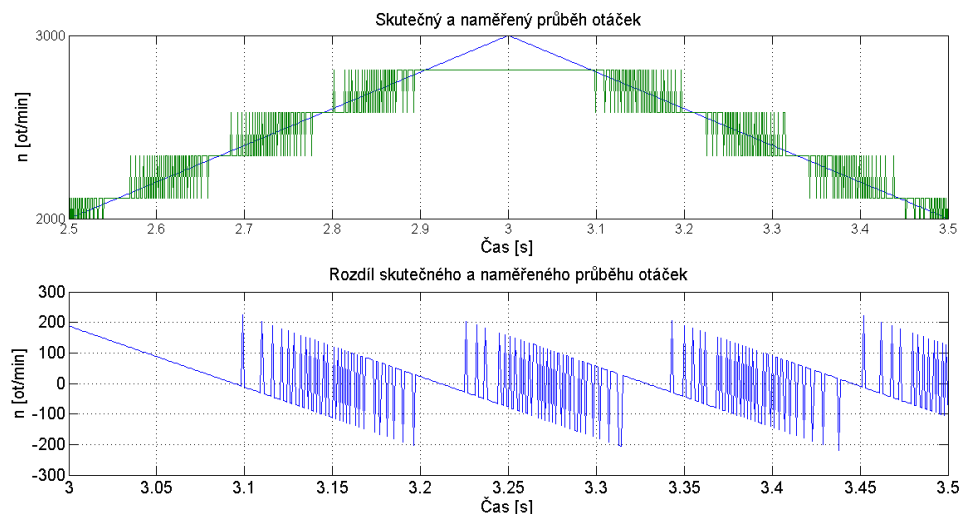


Obrázek 6.12 : Průběh skutečné a naměřené rychlosti při $t_{vz}=0,0001s$ a jejich rozdíl

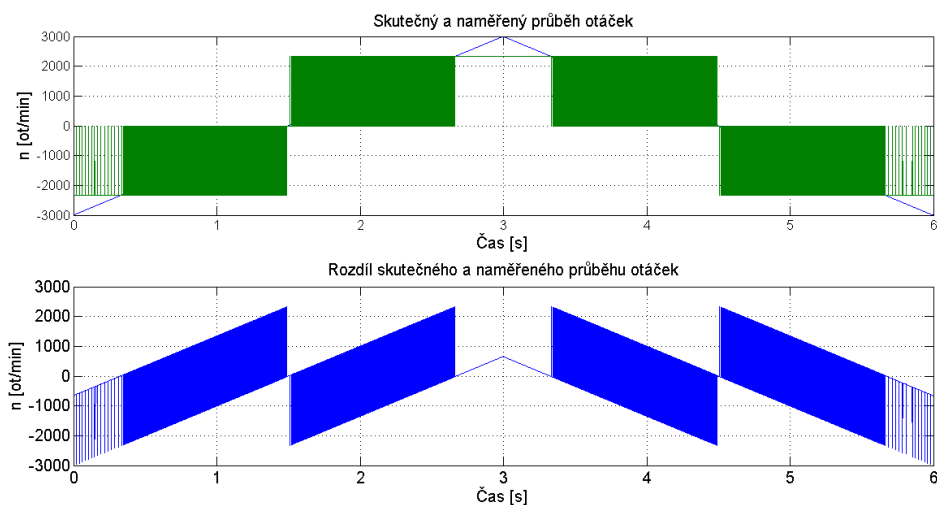
Přesnost 8 bitů



Obrázek 6.13: Průběh skutečné a naměřené rychlosti při $t_{vz}=0,01s$ a jejich rozdíl



Obrázek 6.14: Průběh skutečné a naměřené rychlosti při $t_{vz}=0,001s$ a jejich rozdíl



Obrázek 6.15: Průběh skutečné a naměřené rychlosti při $t_{vz}=0,0001s$ a jejich rozdíl

Závěr

Cílem této práce bylo porovnat vlastnosti a principy funkce a použití vybraných typů čidel otáček a polohy a vytvořit simulaci pro přečtení a zpracování signálu z absolutního čidla polohy. V první části práce je stručně popsáno čidlo, funkční prvek informačního řetězce.

Následující kapitola představuje rešerši dostupných čidel polohy. V této části jsou podrobně popsány čidla, která se používají na měření polohy rotoru u elektromotoru. Nejběžnějšími motory jsou motory asynchronní, u nich se pro měření polohy využívají inkrementální snímače. Inkrementální senzory udávají na výstupu lehce zpracovatelný signál. Informaci o poloze určují jen s pomocí referenční polohy, to je jednou za otáčku. V extrémnějších podmínkách jsou nahrazovány čidly ultrazvukovými, které pro měření polohy využívají odraz zvuku. Dalšími čidly polohy, které jsou na rozdíl od inkrementálních snímačů robustní, jsou resolvers. Z uvedených čidel mají resolvers největší rozsah otáček, a také umí určit informaci o absolutní poloze v jakémkoliv okamžiku. Nejpřesnější snímač je snímač absolutní, ten určuje údaj o poloze i po odpojení a opětovném připojení napájení. Přesnost absolutního snímače je dána kódovacím kotoučem, který je zakódován na základě binárního nebo Grayova kódu. Snímač polohy vyznačující se velmi širokým spektrem použitelnosti je Hallův senzor. Je to senzor bezdotykový, používaný v mnoha různých provedeních, vyskytuje se jako rotační, lineární snímač nebo v podobě čipu. V práci jsou popsány i snímače kapacitní, které reagují na změnu kapacity vyvolanou přiblížením předmětu.

Další kapitola se zabývá popisem snímačů otáček. Pro měření otáček motoru u pohonů se stejnosměrnými motory jsou používané tachogenerátory. Jsou konstruovány jako dynamo (stejnosměrné generátory) nebo jako alternátory (generátory střídavého napětí).

V poslední kapitole byl vytvořen algoritmus pro snímání polohy motoru čidlem polohy a výpočet rychlosti (otáček). Bylo nasimulováno zpracování údajů z absolutního senzoru pro různá bitová rozlišení a pro různé periody vzorkování. Pomocí simulací byla ověřena přesnost vyhodnocené polohy a rychlosti v závislosti na periodě vzorkování senzoru. Přesnost vyhodnocení byla dále sledována v závislosti na bitovém rozlišení čidla. Simulovaný snímač s největším bitovým rozlišením dosahoval přesnosti 19 bitů.

Seznam literatury a informačních zdrojů

- [1] Maixner, Ladislav, a kol. Mechatronika, Computer Press, Brno, 2006. Vydání první
- [2] KOCHANÍČEK, Ludvík. Automatizace: Nejpoužívanější snímače. *Coptel: Internetový portál* [online]. 2009-2012, 14.10.2010 [cit. 2012-12-15]. Dostupné z: : <http://coptel.coptkm.cz/index.php?action=2&doc=7943>
- [3] Princip - Encoder. *Pohonnatechnika.cz* [online]. © 2007-2013 [cit. 2013-04-13]. Dostupné z: <http://www.pohonnatechnika.cz/skola/encodery>
- [4] Häberle, Heinz a kolektiv. Průmyslová elektronika a informační technologie, *EUROPA-SOBOTÁLES cz.*, Praha 2003
- [5] ČAMBÁL, Marek, Martin NOVÁK a Jaroslav NOVÁK. XXIX. konference Elektrické pohony: Vyhodnocování výstupního signálu resolveru pro určování polohy rotoru synchronního stroje. *České vysoké učení technické v Praze: Fakulta strojní* [online]. Plzeň, , 14-16.6. 2005 [cit. 2013-02-16]. Dostupné z: http://www3.fs.cvut.cz/web/fileadmin/documents/12241-BOZEK/publikace/2005/2005_017.pdf
- [6] Snímače otáček a polohy. *Ústav mechatroniky a technické informatiky: Fakulty mechatroniky IMS, Technická univerzita v Liberci* [online]. [cit. 2013-04-13]. Dostupné z: http://www.mti.tul.cz/files/svm/Snimace_polohy.pdf
- [7] LEPKA, Jaroslav. Současné trendy vývoje moderních aplikací s elektrickými pohony: Učební texty k semináři. *Centrum pro rozvoj výzkumu pokročilých řídicích a senzorických technologií* [online]. Brno: Ústav automatizace a měřicí techniky, 15. 12. 2010 [cit. 2013-04-20]. Dostupné z: http://www.crr.vutbr.cz/system/files/brozura_10_1012.pdf
- [8] Špičkové technologie do automatizace a robotizace. *UZIMEX* [online]. [cit. 2013-02-16]. Dostupné z http://www.uzimex.cz/foto.php?file_name=/img/db/rady/55v_resolvery.jpg
- [9] Resolver Transducers: HT-6 Single-turn Brushless Resolver Transducer. *AMCI: Advaced micro controls Inc.* [online]. © 1999-2013 [cit. 2013-02-16]. Dostupné z: <http://amci.com/resolvers/ht6-resolver.asp>
- [10] Products: Resolvers. *MICRONOR: automation components* [online]. [cit. 2013-02-26]. Dostupné z: <http://www.micronor.com/products.php?category=Resolvers>
- [11] Resolver. *ESTUN: Automation* [online]. © 2009 [cit. 2013-02-20]. Dostupné z: <http://www.estun.com.cn/products-en/ps/9.html>
- [12] KLOBOUČEK, Jan. *Snímače v průmyslu*. Vyd. 1. Liberec: Technická univerzita v Liberci, 2012, 120, 21 s. ISBN 978-80-7372-828-1.
- [13] Automatizace a automatizační technika: *Snímače polohy, rychlosti a zrychlení*. [online]. [cit. 2013-02-16]. Dostupné z: http://static.eplanet.sk/files/9788025125236_01.pdf
- [14] Selsyn. *HardWeb: The hardware group and students of Dept. of Computer Science and Engineering present* [online]. [cit. 2013-04-20]. Dostupné z: http://service.felk.cvut.cz/courses/X36PJV/archiv/Jak/_tech/t248/start.htm
- [15] AC instrumentation transducers. *All About Circuits* [online]. 2003-2012 [cit. 2013-02-20]. Dostupné z: http://www.allaboutcircuits.com/vol_2/chpt_12/6.html
- [16] Soviet selsyn DS-400 110V/400Hz first class. *Ebay: shop by category: electronics* [online]. [cit. 2013-05-20]. Dostupné z: <http://www.ebay.com/itm/SOVIET-SELSSYN-DS-400-110V-400Hz-FIRST-class-NOS-NIB-/32078062109>
- [17] Inkrementální snímače: Enkodéry. *Tecon: Produkty-snímače* [online]. [cit. 2013-02-20]. Dostupné z: http://www.tecon.cz/prod_snimace_ekodery.php
- [18] Incremental Encoders. *PC in control* [online]. © 2008 [cit. 2013-04-20]. Dostupné z:

- http://www.pc-control.co.uk/incremental_encoders.htm
- [19] Novák, Petr. *Mobilní roboty-pohony, senzory, řízení*, Nakladatelství BEN-technická literatura, Věšínova 5, Praha 10, 2005
- [20] Ripka, Pavel. Stanislav, Ďaďo. Kreidl, Marcel. Novák, Jiří. *Senzory a převodníky*, Vydavatelství ČVUT, 2005
- [21] KEJZLAR, Luděk. Projekt řídicího systému hvězdářského dalekohledu: Zpracování signálu z optoelektronického čidla v aplikaci snímače polohy astronomického dalekohledu. *Astronomie: Stránky věnované astronomické technice* [online]. [cit. 2013-04-20]. Dostupné z: <http://www.grecner.cz/astro/irc-01.pdf>
- [22] Princip optických enkodérů polohy pro řízení motorů. *Jonatan: Cvičný, výukový, demonstrační, volně přístupný webový server pro studenty i zaměstnance*. [online]. [cit. 2013-04-20]. Dostupné z: http://jonatan.spse.pilsedu.cz/~mazanec/opticke_ekodery.htm
- [23] FALC, Petr. Rotační inkrementální snímače polohy. *AUTOMA: Časopis pro automatizační techniku* [online]. © 2013 [cit. 2013-04-28]. Dostupné z: http://www.odbornecasopisy.cz/index.php?id_document=30393
- [24] Sensing: Encoders and Resolvers. *Automation primer* [online]. 15.7.2012, © 2013 [cit. 2013-05-26]. Dostupné z: <http://automationprimer.com/2012/07/15/encoders-and-resolvers/>
- [25] E. KISSELL, Thomas. Linear and Rotary Encoders. *National Instruments: NI Developer Zone* [online]. Second Edition. Sep 6, 2006 [cit. 2013-04-28]. Dostupné z: <http://zone.ni.com/devzone/cda/ph/p/id/132>
- [26] Snímače a převodníky: Lineární snímač S30. *RS components: Elektrotechnika, automatizace a kabely* [online]. [cit. 2013-02-16]. Dostupné z: <http://cz.rs-online.com/web/c/automatizace-a-ridici-zarizeni/snimace-a-prevodniky/>
- [27] LINHART, Miroslav. Inkrementální rotační čidla. *Linhatronik: komponenty pro průmyslovou automatizaci a elektroinstalaci* [online]. © 2013 [cit. 2013-04-28]. Dostupné z: <http://www.linhartronik.cz/file.php?nid=3507&oid=431442>
- [28] Optoelektronické snímače: Inkrementální snímače - rotační snímače. *LARM a.s.* [online]. 2010 [cit. 2013-03-20]. Dostupné z: <http://www.larm.cz/>
- [29] Products: Incremental Encoders. *SCANCON: Industrial Encoders* [online]. Scandinavian Construction Company. [cit. 2013-03-28]. Dostupné z: <http://www.scancon.dk/incremental.php>
- [30] Produkty: Ruční kolečka. *Euchner: More than safety* [online]. Euchner Electric s.r.o. 2010 [cit. 2013-03-28]. © 2010 Dostupné z: <http://www.euchner.cz/produkty/clovek-stroj/rucni-kolecka/>
- [31] Katalog produktů: Snímače otáček a polohy: Inkrementální snímače. *MED elektronik* [online]. [cit. 2013-03-28]. © 2011 Dostupné z: <http://www.medelektronik.cz/katalog-produktu/snimace-otacek-a-polohy/inkrementalni-snimace/>
- [32] Encoders: Incremental vs. Absolute. *Nidec: Nidec Avtron Automation* [online]. © 2013 [cit. 2013-04-16]. Dostupné z: <http://www.nidec-avtron.com/encoders/knowledge-base/incremental-absolute.aspx>
- [33] Servo Motor Glossary of Terms: *Encoder. Oriental motor* [online]. U.S.A., © 2013 [cit. 2013-03-27]. Dostupné z: <http://www.orientalmotor.com/technology/articles/servo-motor-glossary.html>
- [34] Snímače otáček a polohy: *Absolutní snímač polohy. Ústav mechatroniky a technické informatiky* [online]. Fakulty mechatroniky IMS ,Fakulty mechatroniky IMS [cit. 2013-05-27]. Dostupné z: http://www.mti.tul.cz/files/svm/Snimace_polohy.pdf
- [35] DLOUHÝ, Martin a Zbyněk WINKLER. *Enkodéry: senzory pro detekci pohybu kol. Robotika.cz* [online]. 2003-10-30 [cit. 2013-04-16]. Dostupné z:

- <http://robotika.cz/guide/encoders/en>
- [36] Products: Absolute Encoders. *SCANCON: Industrial Encoders* [online]. Scandinavian [cit. 2013-04-20]. Dostupné z: <http://www.scancon.dk/absolute.php>
- [37] Kompaktní servomotory od B&R. *AUTOMA: časopis pro automatizační techniku* [online]. © 2013 - [cit. 2013-05-26]. Dostupné z: http://www.odbornecasopisy.cz/index.php?id_document=34340
- [38] Binární a BCD kódy: Grayův kód. *Mikrokontroléry PIC: Web o číslicové technice a mikrokontrolérech PIC* [online]. © 2012 [cit. 2013-05-26]. Dostupné z: <http://mikrokontrolery-pic.cz/zaciname/cislicova-technika/binarni-bcd-kody/>
- [39] Grayův kód: Převod na binární kód a naopak. *Webgarden: webové stránky* [online]. © 2013 [cit. 2013-05-26]. Dostupné z: <http://media0.webgarden.name/files/media0:50f86ef32e434.pdf.upl/Gray%C5%AFv%20k%C3%B3d.pdf>
- [40] Grayův kód. *COP: Centrum odborné přípravy, Vyšší odborná škola, Střední škola* [online]. © 2011 [cit. 2013-04-20]. Dostupné z: http://www.copsu.cz/mikrop/didakticka_pomucka/cislicova_technika/kodovani/gray/gray.html
- [41] Praktické úlohy – 1.oblast zaměření. *Výukový portál: Střední průmyslová škola elektrotechnická a informačních technologií* [online]. Brno [cit. 2013-04-20]. Dostupné z: http://moodle.sspbrno.cz/pluginfile.php/7125/mod_resource/content/1/PRC_-MAPA/grayuv_kod_1.pdf
- [42] Converting Between Gray and Binary Codes. *WISC -online: Learning activities help people succeed - find your success here!* [online]. ©1999-2012 [cit. 2013-04-20]. Dostupné z: <http://www.wisc-online.com/Objects/ViewObject.aspx?ID=IAU8307>
- [43] Objev spinového Hallova jevu v polovodičovém čipu. *ELEKTRO: Odborný časopis pro elektrotechniku* [online]. © 2013 [cit. 2013-05-27]. Dostupné z: http://www.odbornecasopisy.cz/index.php?id_document=26330
- [44] VOJÁČEK, Antonín. *Magnetické senzory s Hallovým efektem - 1. princip. Automatice.hw.cz: rady a poslední novinky z oboru* [online]. © 1997 - 2009, 23. 11. 2007 [cit. 2013-05-28]. Dostupné z: <http://automatizace.hw.cz/magneticke-senzory-s-hallovym-efektem-1-princip>
- [45] MYNÁŘOVÁ, Věra a Jiří ČENGERY. *Elektronické součástky: cvičení. 1. vyd. Plzeň: Západočeská univerzita, Elektrotechnická fakulta, 2001, 63 s. ISBN 80-708-2778-5.*
- [46] Hallový snímač: Snímač úhlu natočení. *Elektronika a automatizace: Melexis* [online]. [cit. 2013-05-28]. Dostupné z: <https://www.distrelec.cz/sn%C3%ADma%C4%8D-%C3%BAhlu-nato%C4%8Den%C3%AD/melexis/mlx90316kdc-bdg-spi>
- [47] Hall Effect Sensor ICs. *Melexis: Microelectronic Integrated Systems* [online]. ©1998 - 2011 [cit. 2013-05-28]. Dostupné z: <http://www.melexis.com/Products-By-Category/Hall-Effect-Sensor-ICs-1.aspx>
- [48] Hallový senzory. *GM electronic: elektronika, kterou znáte* [online]. 1990–2013 [cit. 2013-02-28]. Dostupné z: <http://www.gme.cz/hallovvy-senzory/>
- [49] Hallův snímač H02. *IMG soft, s.r.o.* [online]. © 2006 – 2013 [cit. 2013-05-30]. Dostupné z: <http://imfsoft.cz/hardware/prislusenstvi/halluv-snimac-H02.asp>
- [50] Magnetic Position Sensors: Rotary Magnetic Position Sensors. *AMS* [online]. © 2013 [cit. 2013-02-28]. Dostupné z: <http://www.ams.com/eng/Products/Magnetic-Position-Sensors/Rotary-Magnetic-Position-Sensors>
- [51] Senzory pro měření vzdálenosti: Inkrementální lineární systémy. *Schmacht! Profesionální technika vítězí* [online]. [cit. 2013-02-28]. Dostupné z:

- <http://www.schmactl.cz/senzorika-senzory-pro-mereni-vzdalenosti-inkrementalni-linearni-systemy>
- [52] Magnetic Position Sensors: Linear Incremental Magnetic Position Sensors. AMS [online]. © 2013 [cit. 2013-02-28]. Dostupné z: <http://www.ams.com/eng/Products/Magnetic-Position-Sensors/Linear-Incremental-Magnetic-Position-Sensors>
- [53] LINHART, Miroslav. Zásady kapacitní detekce. *Linhatronik: komponenty pro průmyslovou automatizaci a elektroinstalaci*[online]. © 2013 [cit. 2013-05-12]. Dostupné z: <http://www.linhartronik.cz/file.php?nid=3507&oid=427539>
- [54] SCHMID, Dietmar. *Řízení a regulace pro strojírenství a mechatroniku*. 1. vyd. Překlad Jiří Handlří. Praha: Europa-Sobotáles, 2005, 420 s. ISBN 80-867-0610-9.
- [55] Automatizace a automatizační technika 1: systémové pojetí automatizace. 1. vyd. Brno: Computer Press, 2012, 217 s. ISBN 978-80-251-3628-7.
- [56] Zásady ultrazvukové detekce. LINHART, Miroslav. *Linhatronik: komponenty pro průmyslovou automatizaci a elektroinstalaci*[online]. © 2013 [cit. 2013-05-20]. Dostupné z: <http://www.linhartronik.cz/file.php?nid=3507&oid=427547>
- [57] Elektromotory Atas: Tachodynamy, tachogenerátory. *Ložiska Vokoun* [online]. © 2009 [cit. 2013-05-20]. Dostupné z: <http://www.loziska-vokoun.cz/elektromotory-atas/tachodynamy-tachogeneratory/>
- [58] Snímače polohy a otáček v praxi. *AUTOMA: časopis pro automatizační techniku* [online]. © 2013, 3/2003 [cit. 2013-05-28]. Dostupné z: http://www.odbornecasopisy.cz/index.php?id_document=28787

Přílohy

Příloha A – Výpis simulačního programu

```
int main()
{
FILE *mer;

double dt=1e-6; //prirustek casu t
double n=3000; //skutecne otacky motoru
double dtvz=1e-4; //prirustek casu tvz
double dy=0; //prirustek prubehu otacek
double y=-n; //linearni prubeh znazornujici otacky
double smer=1; //promenna hlidajici smer otaceni
double y1=0; //prubeh vzorkovaci sinusovky
double fi=0; //uhel fi
double f=100; //frekvence vzorkovaci sinusovky
double pi=3.14; //konstanta PI
double omega = n*2*pi/60; //uhlova rychlost omega
double A=1; //amplituda vzorkovaci sinusovky
double t=0; //aktualni cas simulace
double tvz=0; //cas tvz
double tmax=6; //doba prubehu
double sum=0; //soucet skutecných otáček a vzorkující sinusovky
double dfi=0; //prirustek uhlu fi
double fimer=0; //uhel fi měřený
double dfimer=omega*dtvz; //přírůstek měřeného úhlu
double omega1=0; //úhlová rychlost
//pomocné proměnné
double dfi1=0;
double dfi1n=0;
double fi1=0;
double fi2=0;
double fi1n=0;
double fi2n=0;
double n1=0;
double n2=0;
//počáteční podmínky
fimer = 2*pi;
fi2 = 2*pi;
fi2n = 2*pi;
//proměnné pro snímané otáčky
int fi_nepresne_int;
double fi_nepresne_double;
double omega_nepresna;
double n_nepresne;
double n_nepresne1;
double omega_max=n*2*pi/60;

mer=fopen("C:\\Users\\Marťa\\Documents\\MATLAB\\mer.txt","wt");

while (t<tmax)
{
dfi=2*pi*f*dt; //přírůstek úhlu fi pro sinusovku
fi=fi+dfi; //úhel fi pro sinusovku
y1=A*sin(fi); //průběh sinusovky
y=y+dy; //výpočet otáček
//smernice stoupající
if((y<n)&&(smer==1))
dy=2*n/3*dt;
if (y>=n)smer=-1;
if (y<=-n)smer=1;
```

```
//smernice klesajici
if((y>=-n)&&(smer==-1))
dy=-2*n/3*dt;
sum=y+y1; //součet sinusovky s průběhem otáček
//výpis času hlavního cyklu, sinusovky, průběhu otáček a součtu do souboru

if((t+1e-7>tvz)&&(t-1e-7<tvz)) //podmínka na porovnávání double
(double jinak nelze porovnávat)
{
omega = y*2*pi/60; //výpočet omegy z rychlosti (y)
dfimer=omega*dtvz; //výpočet přírůstku úhlu fimer
fimer=fimer+dfimer; //výpočet úhlu fimer

f1=fimer; // první krok f1=0,
f2=fimer; // druhý krok
df1=f2-f1; // výpočet rozdílu

fi_nepresne_int=(int)(fimer*4096/(2*pi));
fi_nepresne_double=(double)fi_nepresne_int*2*pi/4096;

f1n=f2n; // první krok nepresne f1n,
f2n=fi_nepresne_double; // druhý krok nepresne f2n
df1n=f2n-f1n; // výpočet rozdílu nepresneho fi

if(fimer>2*pi) // úhel polohy 1
fimer=fimer-2*pi;
if (fimer<0) // úhel polohy 2
fimer=fimer+2*pi;

omega1=df1/dtvz; // výpočet úhlový rychlosti
n1=60*omega1/(2*pi); //navzorkovane otacky bez zapocitane presnosti cidla

omega_nepresna=df1n/dtvz;

n_nepresne=60*omega_nepresna/(2*pi); //otacky se zapoctenou presnosti cidla

if((omega1>omega_max)|| (omega1<-omega_max))
n1=n2;
if((omega_nepresna>omega_max)|| (omega_nepresna<-omega_max))
n_nepresne=n_nepresne1;

fprintf(mer, "%10.5lf %10.5lf %10.5lf %10.5lf\n", tvz, y, n_nepresne, y-
n_nepresne); tvz=tvz+dtvz; //přírůstek času pro vzorkování
n2=n1;
n_nepresne1=n_nepresne;
}
t=t+dt; //přírůstek času pro hlavní cyklus
}
fclose(mer);
return 0;
}
```