

ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI
FAKULTA ELEKTROTECHNICKÁ

KATEDRA ELEKTROMECHANIKY A VÝKONOVÉ
ELEKTRONIKY

DIPLOMOVÁ PRÁCE

**Čidla otáček a polohy v elektrických regulovaných
pohonech**

ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI

Fakulta elektrotechnická
Akademický rok: 2020/2021

ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE (projektu, uměleckého díla, uměleckého výkonu)

Jméno a příjmení: **Bc. Matěj MÍKA**
Osobní číslo: **E19N0027K**
Studijní program: **N2644 Aplikovaná elektrotechnika**
Studijní obor: **Aplikovaná elektrotechnika**
Téma práce: **Čidla otáček a polohy v elektrických regulovaných pohonech**
Zadávací katedra: **Katedra elektroenergetiky**

Zásady pro vypracování

Práce bude obsahovat tyto dílčí body:

1. Zrealizujte popis stavu poznání: bezsensorové řízení a řízení s čidlem otáček, příp. polohy.
2. Porovnejte výhody a nevýhody pohonu s čidlem a bez čidla.
3. Analyzujte aplikace vyžadující čidla otáček a/nebo polohy.
4. Popište dostupná čidla na trhu a jejich vlastnosti.
5. Analyzujte aspekty rozhraní čidlo – pohon. Řešte přenosovou charakteristiku a vliv na regulaci (vliv časových zpoždění, přenos kmitu ve zpětné vazbě do řízení apod.).

Rozsah diplomové práce: **40 – 60 stran**
Rozsah grafických prací: **podle doporučení vedoucího**
Forma zpracování diplomové práce: **tištěná/elektronická**

Seznam doporučené literatury:

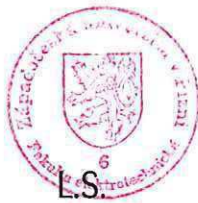
1. firemní literatura výrobců čidel

Vedoucí diplomové práce: **Doc. Ing. Martin Pittermann, Ph.D.**
Katedra výkonové elektroniky a strojů

Datum zadání diplomové práce: **9. října 2020**
Termín odevzdání diplomové práce: **27. května 2021**



Prof. Ing. Zdeněk Peroutka, Ph.D.
děkan



Doc. Ing. Karel Noháč, Ph.D.
vedoucí katedry

Abstrakt

Předkládaná diplomová práce je zaměřena na využití čidel otáček a polohy v elektrických regulovaných pohonech. Text je rozdělen do tří částí. V první část se věnuje rozboru problematiky regulovaných elektrických pohonů a popisu současného stavu poznání v této oblasti. Zejména jsou zde porovnány pohony využívající čidla otáček či polohy a pohony využívající tzv. bezsensorové řízení. V druhé části jsou pak rozebrána používaná čidla, a to nejprve z hlediska používaných fyzikálních principů, a poté jsou popsány konkrétní vybrané produkty, které jsou v současnosti dostupné na trhu. V závěrečné třetí části je pak za použití software MatLab/Simulink vytvořen model regulovaného pohonu a je zde provedeno několik simulací, jejichž účelem je zjistit vliv čidla a jeho nedokonalostí na regulační pochod.

Klíčová slova

Elektrický pohon, čidlo otáček, čidlo polohy, IRC, ARC

Abstract

This thesis deals with applications of speed and position sensors in regulated electric drives. The text is divided into three parts. The first part focuses on analysing the problematic of regulated electric drives and describes the current state of knowledge. Particularly, sensorless drives and drives using speed and position sensors are compared here. Further, in the second part the sensors are analysed, firstly depending on used principles, and then the specific selected products currently available on the market are described. Finally, in the third part, the simulation model using MatLab/Simulink software is created and several simulations are carried out, for the purpose of determining the influence of the sensor and its imperfections on the control process.

Key words

Electric drive, speed sensor, position sensor, IRC, ARC

Prohlášení

Prohlašuji, že jsem tuto diplomovou práci vypracoval 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 diplomové práce, je legální.



.....

podpis

V Plzni dne 27.5.2021

Matěj Míka

Poděkování

Chtěl bych na tomto místě poděkovat panu vedoucímu diplomové práce doc. Ing. Martinu Pittermannovi, Ph.D. a rovněž panu konzultantovi Ing. Martinu Brůhovi, Ph.D. Oběma pánům jsem velice vděčný za cenné profesionální rady, připomínky a metodické vedení práce.

Obsah

| | |
|---|-----------|
| Úvod | 8 |
| Seznam symbolů a zkratk | 9 |
| Seznam obrázků | 10 |
| 1 Řízení elektrických pohonů | 11 |
| 1.1 Struktura a vlastnosti elektrického pohonu | 11 |
| 1.2 Řízení s použitím čidla otáček nebo polohy | 15 |
| 1.2.1 Výhody pohonů s čidlem otáček nebo polohy | 15 |
| 1.2.2 Nevýhody pohonů s čidlem otáček nebo polohy | 15 |
| 1.3 Bezsenzorové řízení | 16 |
| 1.3.1 Metoda odhadu pomocí zpětného elektromotorického napětí | 16 |
| 1.3.2 Metoda odhadu pomocí struktury MRAS | 17 |
| 1.3.3 Metoda rozšířeného Kálmánova filtru | 18 |
| 2 Čidla otáček a polohy | 19 |
| 2.1 Dělení dle fyzikálního principu | 20 |
| 2.1.1 Indukční princip | 20 |
| 2.1.2 Optoelektronický princip | 23 |
| 2.1.3 Magnetický princip | 25 |
| 2.2 Popis vybraných čidel dostupných na trhu | 28 |
| 2.2.1 ATAS K10A6-00 | 28 |
| 2.2.2 Omron E6C2-C | 29 |
| 2.2.3 LARM ARC 400 | 30 |
| 2.2.4 Leine Linde RHI 503 | 32 |
| 2.2.5 SICK DFS60 | 33 |
| 2.2.6 Kübler RLI 200 | 35 |
| 2.2.7 Porovnání popisovaných senzorů | 36 |
| 3 Simulace v prostředí MATLAB | 37 |
| 3.1 Popis simulačního prostředí | 37 |
| 3.2 Volba prvků a parametrů modelu | 37 |
| 3.2.1 Výkonová část | 37 |
| 3.2.2 Regulační část | 38 |
| 3.2.3 Negativní vlivy | 39 |
| 3.2.4 Sestavení simulačního modelu | 39 |
| 3.3 Simulace negativních vlivů | 41 |
| 3.3.1 Simulace č. 1 | 42 |
| 3.3.2 Simulace č. 2 | 44 |
| 3.3.3 Simulace č. 3 | 46 |
| 3.3.4 Vyhodnocení simulací | 47 |
| Závěr | 49 |
| Přílohy | 52 |

Úvod

Elektrický pohon může být obecně definován jako zařízení sloužící ke konverzi elektrické energie na energii mechanickou. Základním prvkem pohonu je tedy točivý elektrický stroj - elektromotor. Přestože elektrické pohony jsou používány již od 19. století, ještě před několika desetiletími se pod tímto pojmem rozuměl zejména právě motor, ostatní komponenty (např. odporníky pro odporovou regulaci) byly považovány za jakousi nadstavbu. Na konci 20. století však rozvoj aplikace polovodičů, a to jak ve výkonové tak v řídicí oblasti, způsobil zásadní rozvoj vědního oboru elektrické pohony, a proto bylo možné přijmout následující definici elektrického pohonu: “Elektrický pohon je soustava, vytvořená z vhodné kombinace elektrotechnických zařízení pro elektromechanickou přeměnu energie a pro vytváření, přenos a zpracování signálů, řídicích tuto elektromechanickou přeměnu, jejíž vstupní řídicí signály jsou určeny obsluhou nebo nadřazeným řídicím, regulačním nebo automatizačním členem a jejíž výstupní veličiny jsou parametry mechanického pohybu.” [1] [2]

Tato diplomová práce se zaměřuje právě na automatickou regulaci moderních elektrických pohonů, konkrétně na čidla otáček a polohy, která jsou zde používána. V první části práce se zaměřuji obecně na problematiku řízení elektrických pohonů a analyzuji základní typy řízení, tedy řízení bezsensorové a řízení s použitím sensorů zahrnujících čidla otáček nebo polohy. Dále jsou zde tyto typy řízení porovnány a je zde též věnována pozornost aplikacím vyžadujícím použití příslušných čidel. V části druhé se již soustředím na samotná čidla, která jsou zde rozebrána z hlediska používaných fyzikálních principů a dále jsou u konkrétních typů dostupných na trhu rozebrány jejich elektrické a mechanické specifikace. Konečně ve třetí části je pak provedena simulace příkladu v prostředí programu MatLab/Simulink s použitím nadstavby PLECS. Zde je řešena problematika přenosu signálu z čidla do řídicího systému pohonu a negativní vlivy na regulaci. Na simulačním modelu jsou zde tyto vlivy demonstrovány a popsány.

Seznam symbolů a zkratk

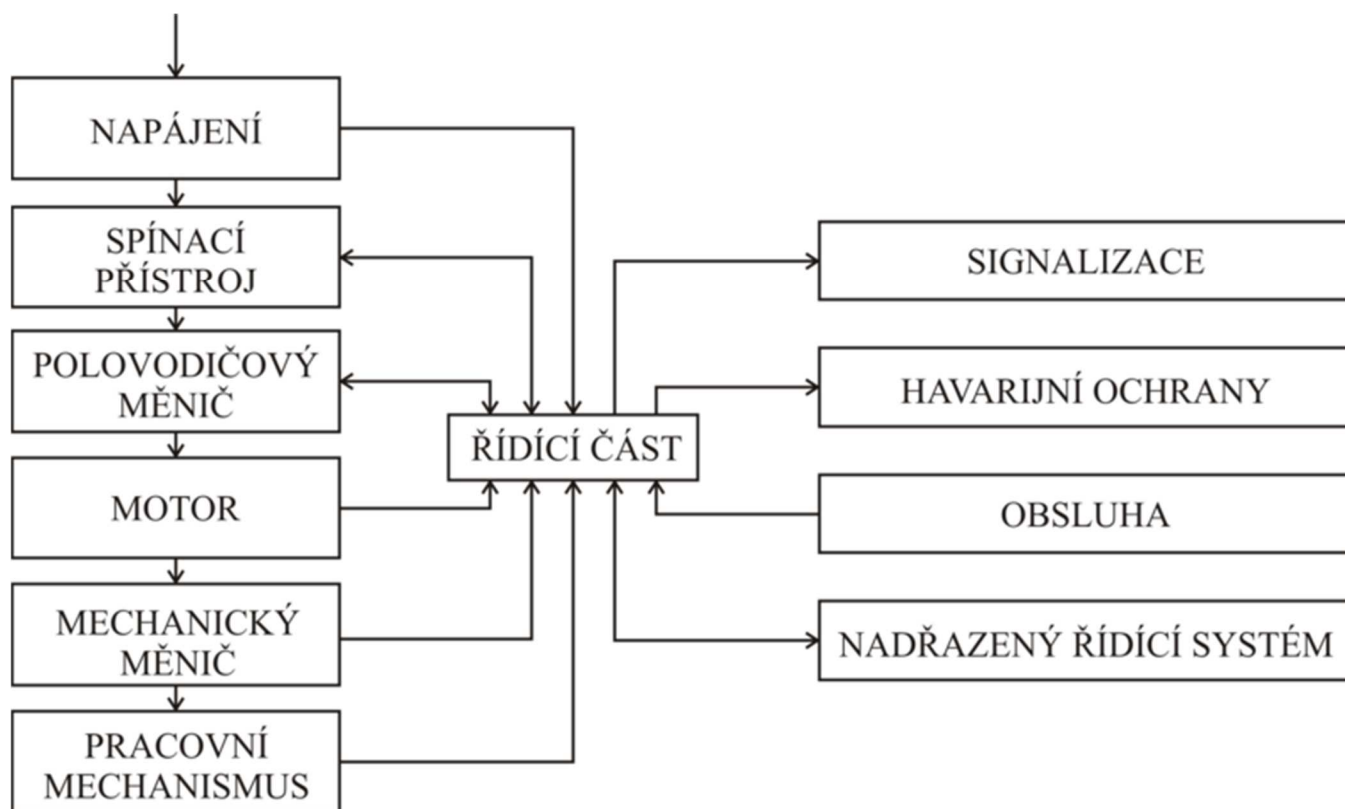
| | |
|------------|---|
| U_i | Indukované napětí [V] |
| U_H | Hallovo napětí [V] |
| K | Konstrukční konstanta stroje [-] |
| K_{TD} | Konstanta tachodynamy [V rad ⁻¹ s ⁻¹] |
| Φ | Magnetický indukční tok [Wb] |
| ω | Úhlová rychlost [rad/s] |
| ω_s | Synchronní úhlová rychlost [rad/s] |
| ω_w | Požadovaná úhlová rychlost [rad/s] |
| n_y | Otáčky motoru [min ⁻¹] |
| n_w | Požadované otáčky [min ⁻¹] |
| n_{MAX} | Maximální otáčky / Absolutní přeregulování [min ⁻¹] |
| n_p | Relativní přeregulování [%] |
| Δn | Absolutní rozkmit otáček po regulačním pochodu [min ⁻¹] |
| δn | Relativní rozkmit otáček po regulačním pochodu [%] |
| R_H | Hallův koeficient [m ³ A ⁻¹ s ⁻¹] |
| R_S | Činný odpor statorového vinutí [Ω] |
| L_S | Indukčnost statorového vinutí [H] |
| L_d | Podélná indukčnost statorového vinutí [H] |
| L_q | Příčná indukčnost statorového vinutí [H] |
| ψ | Spřažený magnetický tok permanentních magnetů [Wb] |
| J | Moment setrvačnosti pohyblivých částí motoru [kg·m ²] |
| p | Počet pólových dvojic na rotoru motoru [-] |
| t_r | Doba regulace [s] |
| Δt | Dopravní zpoždění [s] |
| μ | Střední hodnota bílého šumu [-] |
| σ | Směrodatná odchylka bílého šumu [-] |
| MatLab | Matrix Laboratory |
| Kč | Koruna česká |
| ARC | Absolute Rotary Encoder |
| IRC | Incremental Rotary Encoder |
| PMSM | Permanent Magnet Synchronous Motor |
| BLDC | Brushless DC Electric Motor |

Seznam obrázků

- Obrázek 1.1 - Blokové schéma elektrického pohonu, převzato z [3]
- Obrázek 1.2 - Základní schéma regulačního obvodu, převzato z [2]
- Obrázek 1.3 - Blokové schéma struktury MRAS, převzato z [6]
- Obrázek 1.4 - Struktura odhadu pomocí Kálmánova filtru, převzato z [6]
- Obrázek 2.1 - Blokové schéma inteligentního snímače, převzato z [9]
- Obrázek 2.2 - Princip resolveru, převzato z [8]
- Obrázek 2.3 - Možnosti provedení tachogenerátoru, převzato z [8]
- Obrázek 2.4 - Výstupní signály inkrementálního čidla, převzato z [15]
- Obrázek 2.5 - Znázornění absolutního senzoru zaznamenávající přesnou polohu, převzato z [8]
- Obrázek 2.6: Kódové kotoučky čidel využívajících: a) binární kód, b) Grayův kód, převzato z [15]
- Obrázek 2.7 - Principální schéma Hallovy sondy, převzato z [17]
- Obrázek 2.8 - Schéma popisující funkci rotačního snímače s Hallovy sondami, převzato z [8]
- Obrázek 2.9 - Tachodynamo ATAS K10A6-00, převzato z [18]
- Obrázek 2.10 - Čidlo otáček Omron E6C2-C, převzato z [19]
- Obrázek 2.11 - Čidlo LARM ARC 400, převzato z [20]
- Obrázek 2.12 - Enkodér Leine Linde RHI 503, převzato z [21]
- Obrázek 2.13 - Programovatelný enkodér SICK DFS60, převzato z [22]
- Obrázek 2.14 - Grafické znázornění závislosti nastavení rozlišení na skutečné (předpokládané) rychlosti rotace, převzato z [22]
- Obrázek 2.15 – Bezkontaktní enkodér Kübler RLI 200, převzato z [23]
- Obrázek 3.1 - Schéma simulačního modelu bez negativních vlivů
- Obrázek 3.2 - Průběh otáček při simulaci bez negativních vlivů
- Obrázek 3.3 - Schéma simulačního modelu s negativními vlivy
- Obrázek 3.4 - Průběh otáček při simulaci č. 1
- Obrázek 3.5 - Průběh otáček při simulaci č. 1, detail
- Obrázek 3.6 - Průběh otáček při simulaci č. 2
- Obrázek 3.7 - Průběh otáček při simulaci č. 2, detail
- Obrázek 3.8 - Průběh otáček při simulaci č. 3
- Obrázek č. 3.9 - Průběh otáček při simulaci č. 3, detail

1 Řízení elektrických pohonů

1.1 Struktura a vlastnosti elektrického pohonu



Obrázek 1.1 - Blokové schéma elektrického pohonu, převzato z [3]

Jak již bylo řečeno v úvodu této práce, oblast elektrických pohonů za poslední desetiletí prodělala prudký vývoj a sám pojem elektrický pohon již nepředstavuje jen motor s několika pomocnými prvky ale provázaný elektronický a elektromechanický systém, jehož blokové schéma zobrazuje obrázek 1.1. Obecně lze elektrický pohon rozdělit na dvě části - výkonovou, která je zde popsána kaskádou funkčních bloků v popisujících transformaci elektrické energie na energii mechanickou, a řídicí, která svými vstupními a výstupními signály umožňuje chod celého pohonného systému a součinnost všech jeho dílčích prvků.

- **Výkonová část pohonu**

Srdcem výkonové části elektrického pohonu je polovodičový měnič, který zajišťuje přeměnu elektrické energie z napájení na elektrickou energii vhodnou pro daný typ motoru. Typ měniče tedy závisí na napájení a typu motoru, jak ukazuje tabulka níže.

| | | |
|------------------|-------------------|-----------------|
| napájení \ motor | DC | AC |
| DC | pulsní měnič | střídač |
| AC | řízený usměrňovač | měnič frekvence |

Tabulka 1 - Typy měničů v závislosti na napájení a typu motoru

Polovodičový měnič také slouží k zajištění v takových parametru elektrické energie, které odpovídají požadovaným otáčkám. U stejnosměrných motorů se provádí řízení napětím, tedy napětím obvodu kotvy anebo řízení tokem, tedy napětím obvodu buzení, podle rovnice pro indukované napětí, která má při zanedbání odporu vinutí tvar:

$$U_i = K \cdot \Phi \cdot \omega \cdot \frac{\pi}{30} \quad (1.1)$$

Chceme-li z této rovnice vyjádřit úhlovou rychlost ω , získáme tvar:

$$\omega = \frac{U_i \cdot \pi}{K \cdot \Phi \cdot 30} \quad (1.2)$$

ze kterého vyplývá, že úhlová rychlost a tedy otáčky motoru jsou přímo úměrné napětí kotvy U_i a nepřímo úměrné budícímu toku Φ . Konstanta K je dána mechanickým uspořádáním stroje, její změnou tedy není možno plynule regulovat otáčky.

U střídavých motorů se používá řízení frekvencí, respektive řízení změnou frekvence a napětí, podle rovnice:

$$\omega_s = \frac{2\pi \cdot f}{p} \quad (1.3)$$

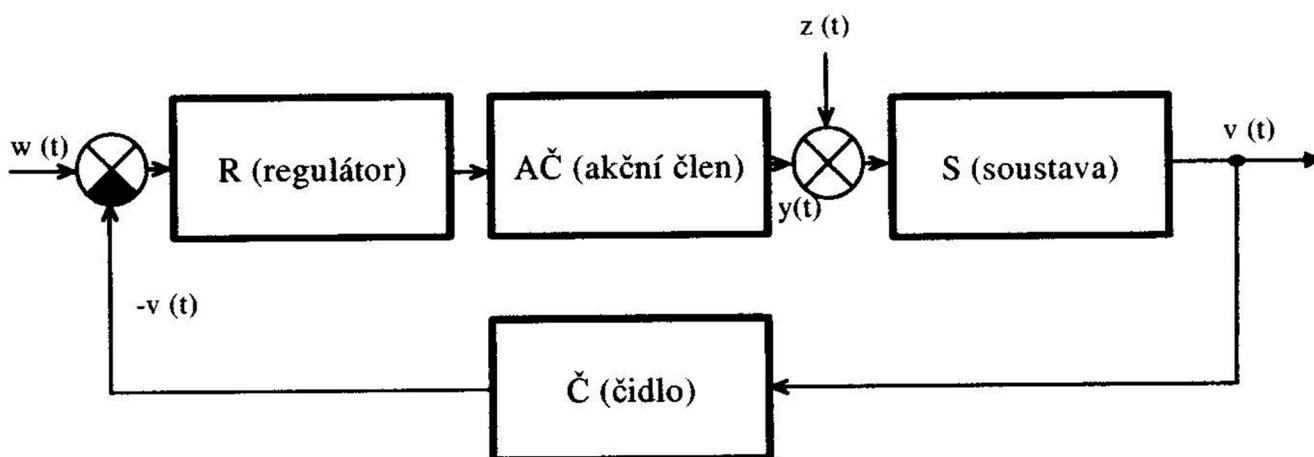
ze které vyplývá, že synchronní úhlová rychlost ω_s je přímo úměrná frekvenci f . Konstanta p značí počet pólových dvojic (pólpárů) stroje, její změnou tedy není možno plynule regulovat otáčky.

- **Řídicí část pohonu**

Přestože se používá obecný pojem řízení, přesnější by bylo použít pojem regulace. Regulací rozumíme pochod, při kterém je jedna veličina (regulovaná veličina) stále měřena a porovnávána s jinou veličinou (řídící veličinou) a v závislosti na výsledku tohoto porovnání je ovlivňována ve smyslu přizpůsobení se řídící veličině. Oproti tomu ovládání je pochod v systému, u kterého jedna nebo více veličin jako výstupní veličiny ovlivňují systém na základě známých zadaných zákonitostí. [3] Protože u moderních pohonů jsou nároky kladené na pohon a jeho vlastnosti vysoké, je splnění velmi přísných požadavků možné zpravidla pouze u pohonů s příslušnými regulačními obvody. [2]

Základem pro řídicí (regulační) část je záporná zpětná vazba. Základní schéma je na obrázku 1.2, kde je znázorněna vlastní regulovaná soustava (**S** - motor), akční člen (**AČ** – výkonový polovodičový měnič), regulátor (**R** - obvykle mikroprocesorový) a čidlo (**Č** - jeho součástí může být i případně převodník, viz obrázek 2.1). V regulačním obvodu pak rozlišujeme následující signály:

- $w(t)$: řídicí signál (též nazývaný “požadavek”)
- $y(t)$: akční zásah
- $z(t)$: porucha
- $v(t)$: regulovaná veličina



Obrázek 1.2 - Základní schéma regulačního obvodu, převzato z [2]

Hlavní regulovanou veličinou v elektrických pohonech je nejčastěji rychlost (otáčky), může jí být ale i poloha (servopohony) či moment (trakční pohony). U střídavých pohonů je re-gulovanou veličinou též často proud, neboť lze tím řídit zvláště tok a zvláště moment (tokotvorná a momentotvorná složka proudu). Kromě těchto veličin je nutné řešit v rámci pohonů i regulaci některých dalších veličin. [2] Akčním zásahem je, jak vyplývá z výše uvedených rovnic, u stejnosměrných pohonů nejčastěji napětí (1.2), u střídavých pak napětí a frekvence (1.3).

Jak bylo uvedeno výše, v případě stejnosměrných motorů můžeme jejich řízení rozdělit na řízení pomocí napětí kotvy (viz rovnice 1.2 - veličina U_i) a na řízení pomocí budícího napětí, jemuž je úměrný budící proud a potažmo magnetický tok (viz rovnice 1.2 - veličina Φ). U motorů střídavých pak rozlišujeme řízení skalární a vektorové. Skalární řízení vychází z rovnic pro ustálený stav stroje a model motoru nerespektuje elektromagnetické jevy uvnitř stroje, a proto neumožňuje řízení okamžité hodnoty momentu, což vede ke zhoršené dynamice regulace rychlosti. Vektorové řízení vychází z modelu popisujícího jak elektromagnetické, tak elektromechanické jevy ve stroji. Díky tomu lze efektivně řídit okamžité hodnoty toků a proudů ve stroji a v důsledku rovněž okamžitou hodnotu momentu stroje. Prostorové vektory veličin v modelu stroje jsou dále transformovány pomocí Parkovy a Clarkovy transformace do, případně ze souřadného systému svázaného s prostorovým vektorem spráženého rotorového nebo statorového magnetického toku. Díky tomu lze samostatně řídit tokotvornou a momentotvornou složku napájecího proudu. [4]

Specifickým typem řízení elektrického pohonu je pak metoda přímého řízení momentu, která je založena na tom, že se reguluje přímo moment ve zvoleném tolerančním pásmu a pohyb koncového bodu vektoru statorového magnetického toku probíhá po zadané křivce. Výhodou této metody je jednoduchost, rychlá odezva na změnu žádaného momentu a vyloučení regulačních překmitů. Nevýhodou je zde problematický provoz při práci ve velmi nízkých otáčkách a problémem může být také proměnná spínací frekvence a větší rozkmit momentu, existují však i metody přímého řízení momentu s konstantní spínací frekvencí, které používají vektorovou modulaci. [5]

1.2 Řízení s použitím čidla otáček nebo polohy

Jak vyplývá z předchozího textu a rovněž z obrázku 1.2, znalost skutečné okamžité hodnoty regulované veličiny je klíčovým aspektem regulace. Za tímto účelem jsou v elektrických pohonech aplikovány snímače otáček, které tuto zpětnou vazbu realizují. Základní možností pro získání hodnot mechanických veličin potřebných pro řízení je použití senzorů využívajících analogové či digitální snímače polohy. Principy těchto snímačů jsou dále popsány v části 2 této práce, kde jsou též popsány konkrétní výrobky dostupné na trhu.

1.2.1 Výhody pohonů s čidlem otáček nebo polohy

Přestože informace o rychlosti rotace je v případě bezsenzorového řízení možné za použití určitých algoritmů odhadnout (jak je podrobněji popsáno v části 1.3), přinášejí pohony využívající čidla otáček výrazně vyšší přesnost a dynamiku regulace, což je v některých aplikacích nezbytné. Může se jednat například o některé servopohony v oblasti automatizace nebo v automobilovém průmyslu, kde je žádoucí vysoce přesná regulace rychlosti u čerpadel, brzd, ventilů, a samozřejmě v oblasti elektromobilů, která se v současnosti prudce rozvíjí i vlastního pohonného systému. Další oblastí, kde lze čidla otáček považovat za nutná, nebo minimálně vysoce žádoucí jsou aplikace, kde lze očekávat velký náraz či skok zátěžného momentu. Čidlo polohy je pak nezbytně nutné v situaci, kdy se poháněný pracovní mechanismus nesmí pootočit při rozběhu do opačného směru. Obvyklou technikou používanou v aplikacích bezsenzorového řízení je provedení zarovnání rotoru na předem definovanou pozici přivedením stejnosměrného napětí na statorové vinutí. I když některé aplikace mohou do jisté míry tolerovat počáteční neřízený pohyb rotoru (např. ventilátory, čerpadla), v jiných případech (např. trakční pohony) je takové chování pohonu nepřijatelné [6]

1.2.2 Nevýhody pohonů s čidlem otáček nebo polohy

Lze říci, že nejmarkantnější nevýhody aplikací čidel v elektrických pohonech jsou dvojí. První z nich se týká ekonomického aspektu, kdy je při navrhování pohonu nutné posoudit, jaký vliv bude mít použití čidla, případně čidel, na celkovou cenu. V závislosti na typu, velikosti, přesnosti, spolehlivosti a dalších parametrech se cena senzoru pohybuje od několika stovek Kč do několika desítek tisíc Kč. V případě systému využívajícího několik desítek motorů, z nichž každý by byl vybaven svým čidlem, tak náklady jen na samotná čidla mohou představovat statisíce až miliony Kč. Naopak v případě pohonu tvořeného pouze

jedním motorem a jedním měničem by mohla cena čidla tvořit podstatnou část celkové ceny daného zařízení. Druhou nevýhodou pohonů vybavených snímači otáček či polohy je problematika prostorového umístění čidla. Přestože na trhu jsou v současnosti dostupná čidla, jejichž předností je minimální objem, stále existují aplikace, kde může vzniknout problém v podobě toho, že na senzor není v daném mechanismu dostatek prostoru. Další související problematikou je pak montáž snímače na hřídel, kde pak může docházet k výchyilkám v axiálním nebo radiálním směru. To je zpravidla řešeno použitím vhodných kinetických spojek, dle doporučení výrobce.

1.3 Bezsenzorové řízení

Jak bylo popsáno v části 1.2.2, významným důvodem, proč dochází k rozvoji pohonů s bezsenzorovým řízením je to, že v posledních letech se stále častěji objevují aplikace, které kladou důraz na cenu pohonu. Může jít například o různé pohony v bílé technice, kde je kladen stále větší důraz na energetickou úspornost, rozměry a také nízkou cenu. Právě z ekonomického hlediska je v těchto aplikacích obvykle nepřijatelné použití snímačů polohy a pro realizaci řízení je nutno řešit problematiku odhadu rychlosti, případně též polohy rotoru na základě pouhého měření statorového proudu, respektive napětí. Případně může být algoritmus pro odhad polohy a otáček využit jako záložní systém pro případ selhání senzoru. Další oblastí, kde je princip bezsenzorového řízení hojně využíván jsou pohony umístěné v prostředí s nebezpečím výbuchu, kde je žádoucí minimální množství vodičů a pohyblivých součástí. [7] Nevýhody bezsenzorového řízení lze označit za komplementární k výhodám řízení využívající snímače, tedy zejména nižší přesnost a dynamika regulace. Existuje několik metod používaných k realizaci bezsenzorového řízení, ty nejvýznamnější jsou popsány dále.

1.3.1 Metoda odhadu pomocí zpětného elektromotorického napětí

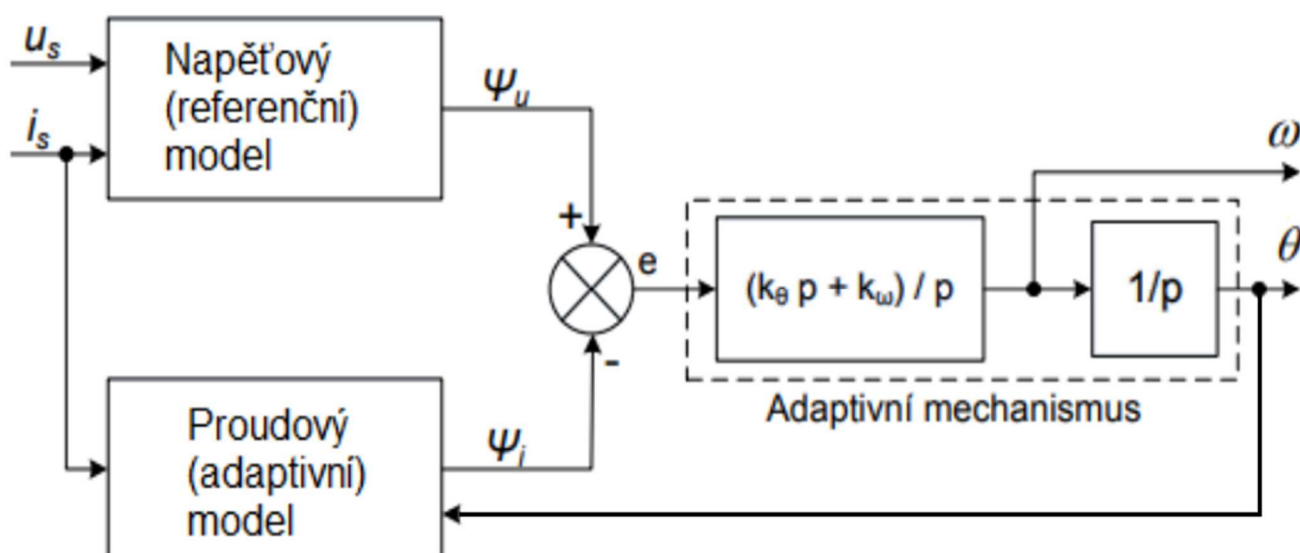
Princip této metody je založen na pozorování třetí harmonické zpětného elektromotorického napětí. Metoda je proto primárně určena pro bezkartáčové stejnosměrné motory, které mají lichoběžníkový průběh zpětného elektromotorického napětí. Základem funkčnosti tohoto algoritmu je přesná detekce okamžiku, kdy dochází ke spínání tranzistorů. Nejjednodušším řešením je využití detekce průchodu nulou zpětného elektromotorického napětí avšak průběh samotného zpětného elektromotorického napětí (respektive jeho základní harmonické) prochází nulou během jedné elektrické otáčky pouze dvakrát, což je

nepostačující. Proto je nutné přistoupit k analýze vyšších harmonických. Třetí harmonická rotorového toku, u kterého bude detekován průchod nulou, je určena vztahem [6] :

$$\Psi_{R3} = \int u_3 dt \quad (1.4)$$

1.3.2 Metoda odhadu pomocí struktury MRAS

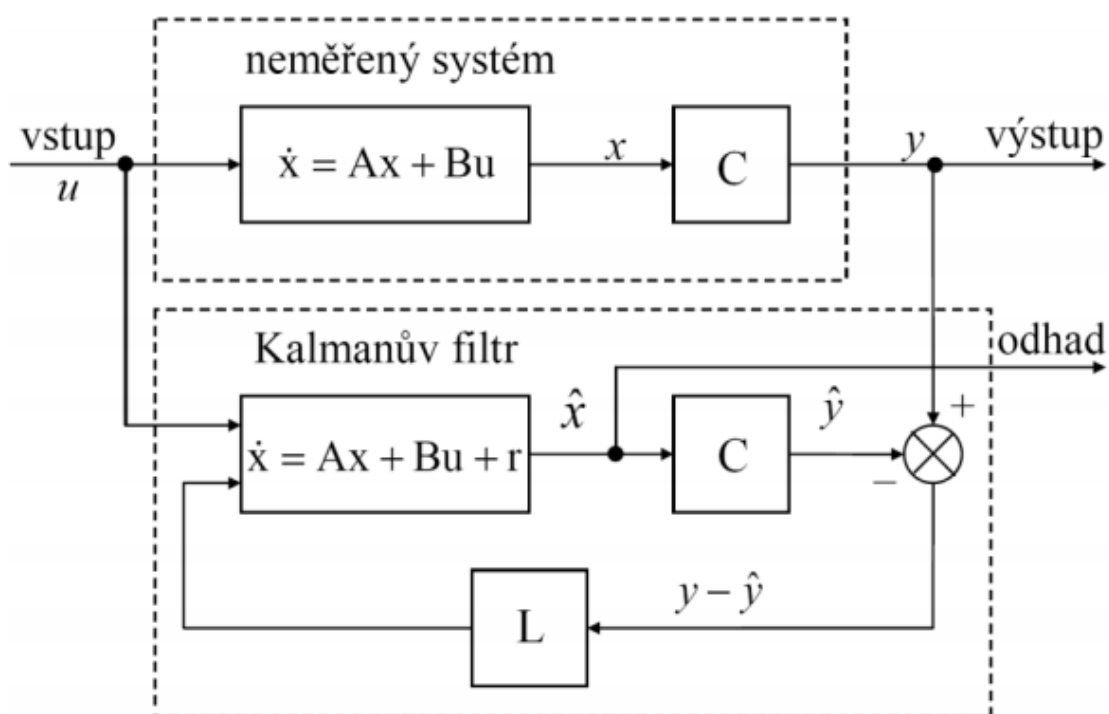
MRAS je zkratkou z anglického *model reference adaptive systems*. Tato metoda vychází z myšlenky, že pro určitou veličinu existují dva modely, z nichž jeden je nezávislý na hledaném parametru (referenční), a druhý na hledané veličině závisí (adaptivní). Algoritmus poté porovnává výstupní hodnoty obou modelů a vhodným adaptivním mechanismem odhaduje polohu rotoru tak, aby odchylka mezi modely byla minimální. Blokové schéma systému fungujícím na tomto principu je uvedeno na obrázku 1.3. Odhadovanou veličinou je zde rychlost otáčení rotoru, z které je poté integrací stanovena poloha rotoru. Informace o rychlosti rotoru je zavedena jako zpětná vazba do proudového modelu, který zde plní roli modelu adaptivního. Rovnice popisující napěťový model magnetického toku neobsahuje informaci o úhlu natočení rotoru, proto je tento uvažován jako referenční model. [6]



Obrázek 1.3 - Blokové schéma struktury MRAS, převzato z [6]

1.3.3 Metoda rozšířeného Kálmánova filtru

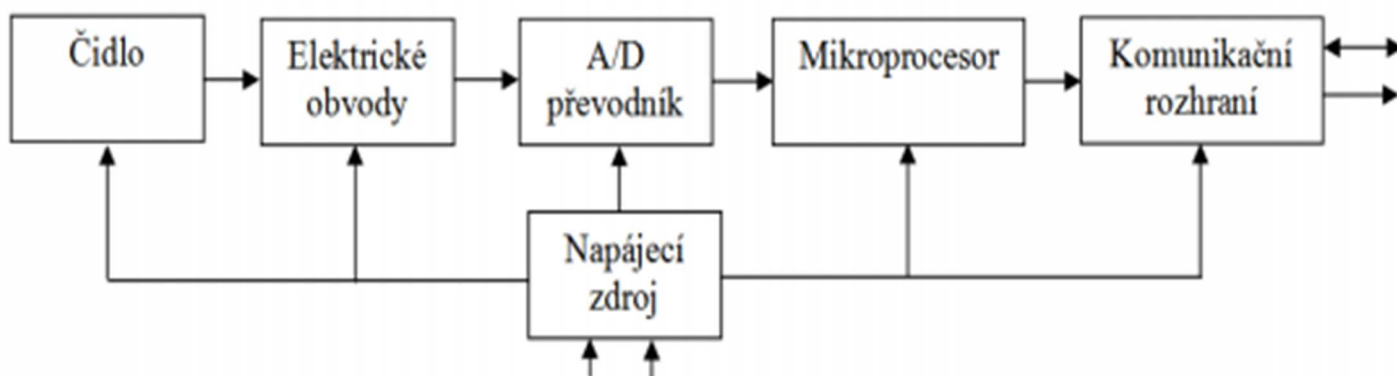
Kálmánův filtr je označení pro algoritmus, který z dat, zatížených nepřesnostmi a šumem, odhaduje neznámé hodnoty proměnných. K tomu využívá nejen naposledy naměřená data a model systému, ale také vektor popisující předchozí stav systému. Obecně algoritmus Kálmánova filtru lze použít pro lineární systémy. Pro odhad stavů nelineárního dynamického systému se používá algoritmu rozšířeného Kálmánova filtru. Rozdíl mezi Kálmánovým filtrem a rozšířeným Kálmánovým filtrem spočívá v linearizaci, která je prováděna kolem pracovního bodu rozvojem do Taylorovy řady s využitím pouze prvního členu. Algoritmus Kálmánova filtru je rekurzivní a odhad stavů se tedy provádí ve dvou krocích. Prvním je časově obnovený odhad, tedy predikce, a druhým krokem je měřením obnovený odhad označovaný jako korekce odhadu. [6]



Obrázek 1.4 - Struktura odhadu pomocí Kálmánova filtru, převzato z [6]

2 Čidla otáček a polohy

Pod pojmem čidlo je chápána tzv. citlivá část snímače (senzoru). Jedná se o funkční prvek, který tvoří vstup informačního řetězce, v němž dochází k převodu neelektrické veličiny na elektrickou. V případě jednoduchých provedení je senzor tvořen pouze samotným čidlem, u moderních inteligentních senzorů je signál z čidla poté zesílen a dále je důležité zajistit odstup signál od šumu, čím větší je tento odstup, tím lepší je výstupní signál. Signál se poté zpracovává v nadřazených obvodech. Vzniklý signál se dále upravuje např. pomocí mikroprocesoru. [8]



2.1 - Blokové schéma inteligentního snímače, převzato z [9]

Čidla lze rozdělit podle využívaného fyzikálního principu, přičemž některé principy jsou častěji využívány pro snímání polohy, jiné pro snímání otáček. Používaných fyzikálních principů je mnoho, ty nejčastěji používané v oblasti elektrických pohonů jsou popsány v následující části této práce (2.1). Pokud však odhlédneme od toho, jaká je vnitřní struktura snímače a budeme sledovat pouze jeho výstupní signál, můžeme podle jeho charakteru rozdělit snímače obecně na dvě skupiny - analogové a digitální. Výstupem analogových snímačů je spojitě se měnící veličina, jehož hodnota je úměrná sledované veličině, tedy poloze či rychlosti rotace. V případě digitálních snímačů jsou výstupem obdélníkové pulzy, které pak v závislosti na typu snímače můžeme interpretovat různě; může jít o sled pulzů, který je pro zjištění rychlosti nutné zpracovat čítačem (princip inkrementálního enkodéru - viz část 2.1.2) nebo může jít o údaj zapsaný pomocí určitého typu kódování (princip inkrementálního enkodéru - viz část 2.1.2) [10].

2.1 Dělení dle fyzikálního principu

2.1.1 Indukční princip

- **Resolver**

Resolver je v principu rotační transformátor, který se používá k měření absolutního úhlu natočení rotoru. Svojí konstrukcí připomíná synchronní motor. Jeho funkce spočívá ve změně vzájemné indukčnosti rotoru a statoru. Resolver má dvoufázové vinutí na statoru, kde jsou fáze vůči sobě posunuty o 90° a jednofázové na rotoru. Senzor může být napájen jak do rotoru, tak do statoru; v této práci se omezíme na princip resolveru napájeného do statoru, jehož vinutí napájena střídavým napětím:

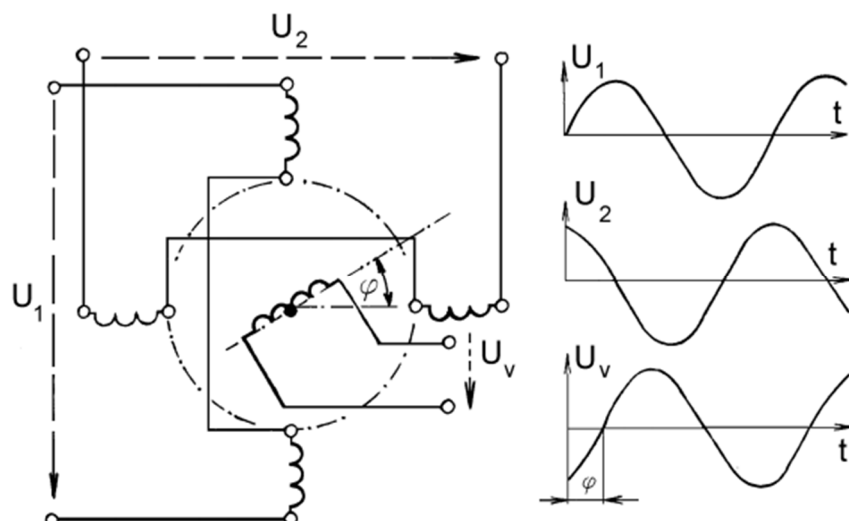
$$u_1(t) = U_M \cdot \sin(\omega t) \quad (2.1)$$

$$u_2(t) = U_M \cdot \cos(\omega t) \quad (2.2)$$

Vlivem toho se vytvoří se točivé magnetické pole, které indukuje do rotoru napětí o stejné frekvenci, které je však fázově posunuté vůči statorovému referenčnímu napětí o úhel natočení φ .

$$u_V(t) = K \cdot U_M \cdot \sin(\omega t - \varphi) \quad (2.3)$$

Vyhodnocování úhlu natočení je realizováno na principu vzorkování výstupních napětí, které je synchronizováno s budícím signálem resolveru. Synchronizační signál, kterým je spouštěno měření A/D převodníku je vytvářen z průběhu budícího napětí rotoru pomocí komparátoru. Díky synchronizovanému vzorkování dochází k měření analogové hodnoty výstupního napětí vždy ve stejném úhlu. Vzorkované hodnoty jsou tedy závislé pouze na velikosti vzájemné indukčnosti statoru vůči rotoru, tedy na úhlu natočení. [11] [12] [13] Resolver je používán zejména v pohonech se synchronními motory. Mimo oblast pohonů je pak využíván například pro snímání polohy volantů v systémech elektrického posilovače řízení EPS (*electric power steering*).



Obrázek 2.2 - Princip resolveru, převzato z [8]

- **Selsyn**

Selsyn, měří úhel natočení, podobně jako resolver. Jedná se o transformátor s otočným primárním vinutím (rotorem) a pevným statorem, na kterém je výstupní napětí. Vinutí statoru je trojfázové a vinutí rotoru jednofázové. Cívky statoru mezi sebou svírají úhel 120° a konce rotorového vinutí jsou vyvedeny na kroužky. Pro dálkový přenos úhlové odchylky je možné využít dvojice selsynů, kde jeden selsyn je použit jako vysílač a druhý jako přijímač. V oblasti pohonů však selsyny nenašly široké uplatnění. Dříve 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 však již nahrazovány přístroji digitálními.

- **Tachogenerátor**

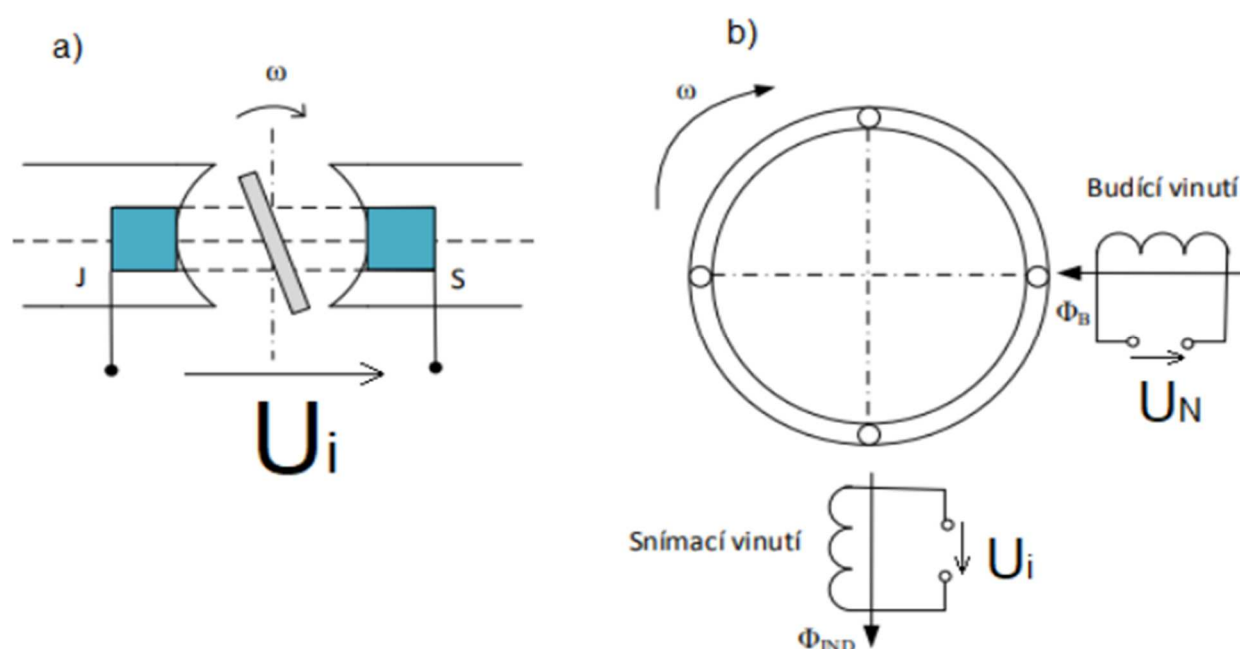
Jako tachogenerátory označujeme snímače otáček fungující jako elektrický generátor, kde indukované napětí na výstupu je úměrné rychlosti otáčení rotoru. Obecně je můžeme rozdělit do dvou skupin, a to tachodynamo (stejnoseměrné generátory) a tachoalternátory (střídavé generátory).

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. Výhodou tohoto druhu snímače je velká citlivost, nedostatkem snímače je poměrně

velké zvlnění a obtíže s komutací (jiskření a opotřebení). [13] Napětí indukované ve vinutí je přímo úměrné rychlosti otáčení:

$$U_i = K_{TD} \cdot \omega \quad (2.4)$$

Jednou z možností provedení tachalternátoru je permanentní magnet sloužící jako rotor, který může mít různý počet pólových dvojic, otáčející se mezi pólovými nástavci statoru s vícepólovým vinutím. Rotací vzniká indukované napětí, které je snímáno kroužky, nebo jednoduchým vinutím (viz obr. 2.3a). Jinou variantou je tachogenerátor s bubínkovým rotorem, který má na statoru dvě cívky pootočené o 90°.



Obrázek 2.3 - Možnosti provedení tachalternátoru, převzato z [8]

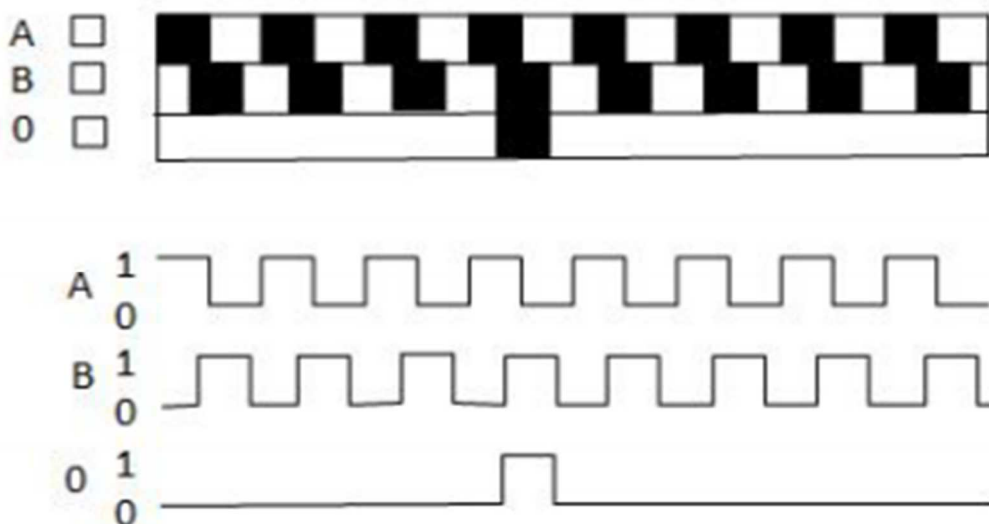
Budící cívka je zde napájena střídavým napětím, na druhé cívce - snímací - se indukuje výstupní napětí a frekvence stejná jako frekvence budícího napětí (viz obr. 2.3). Indukované napětí je úměrné rychlosti otáčení ω , při vysokých rychlostech však dochází k nelineární závislosti. [13]

2.1.2 Optoelektronický princip

Optoelektronický snímač využívá vysílač a přijímač světelného signálu, který prochází optickou mřížkou. Při otáčení mřížkou dochází ke střídání propustných a matných oblastí, což způsobuje změny napětí v důsledku změny množství detekovaného světla.

- **Inkrementální enkodér (IRC)**

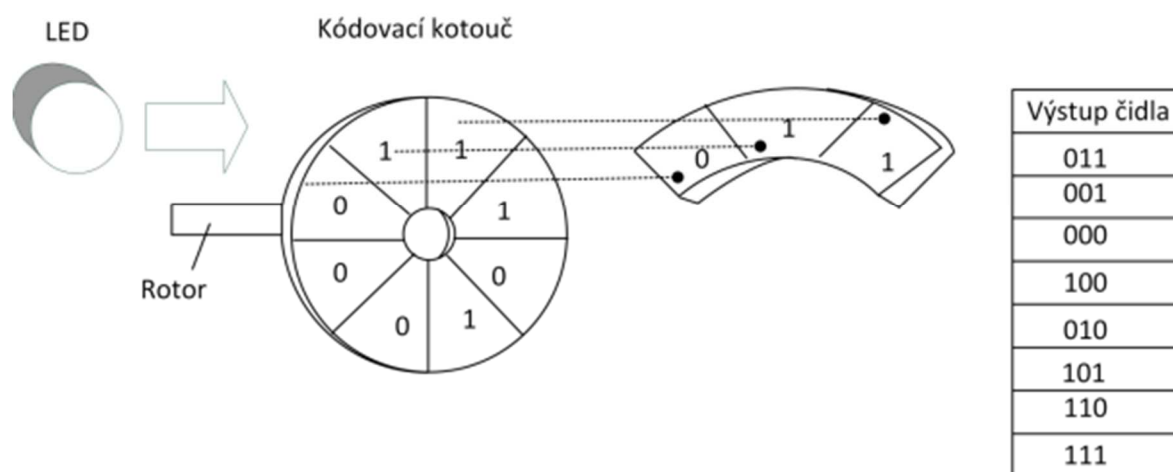
Inkrementální snímače, nazývané též inkrementální enkodéry patří mezi nejvyužívanější princip sensorů pro zjišťování polohy nebo měření otáček. Jejich základem je otočný optický disk, umístěný na hřídeli snímače, která je uložena ve dvojici kuličkových ložisek. Na disku se pravidelně střídají průhledné a neprůhledné rysky, které během otáčení cloní světlo z infračervené LED diody. Jelikož světlo ze zdroje může procházet pouze průhlednými ryskami a neprůhledná část světlo pohltí, vzniká tak výstupní elektrický signál (viz obr. 2.4). Inkrementální senzory generují pulzy postupně pro každý krok rotace. V senzoru jsou zapojeny antiparalelně dvě fotodiody a jsou posunuty o čtvrtinu kroku. Senzor má tři kanály - A, B a 0; snímání rychlosti či polohy má podobu počítání impulzů kanálu A či B. Posuv mezi kanály slouží k určení směru otáčení - 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. Kanál 0 představuje nulový (též referenční) výstupní signál, který udává polohu hřídele snímače. [14][15][16]



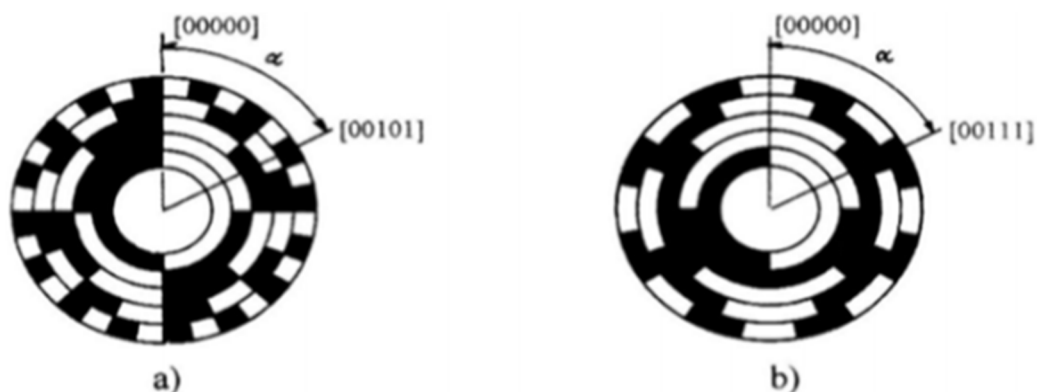
Obrázek 2.4 - Výstupní signály inkrementálního čidla, převzato z [15]

- **Absolutní enkodér (ARC)**

Absolutní enkodéry jsou konstruovány na stejném principu jako enkodéry inkrementální, ale výstupní signály jsou rozdílné. Velkou výhodou absolutního čidla je, že zaznamenává správný údaj i po předchozí ztrátě napájecího napětí. [9] Absolutní čidla neustále zaznamenávají přesnou hodnotu pozice hřídele. Absolutní senzor má odlišný typ kódování než čidlo inkrementální. Absolutní čidlo polohy má na rozdíl od čidla inkrementálního kotouč s ryskami, takzvaný kódovací kotouč (viz obr. 2.5). Na kotouči se střídají průhledná a neprůhledná políčka. Tato políčka jsou v několika řadách, z nichž každá má svůj snímač (viz obr. 2.6). 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. Průhledná a neprůhledná políčka jsou řazena v závislosti na použitém kódu. Jsou zde využívány dva typy kódů - binární a 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.



Obrázek 2.5: Znárodnění absolutního senzoru zaznamenávající přesnou polohu, převzato z [8]



Obrázek 2.6: Kódové kotoučky čidel využívajících: a) binární kód, b) Grayův kód, převzato z [15]

2.1.3 Magnetický princip

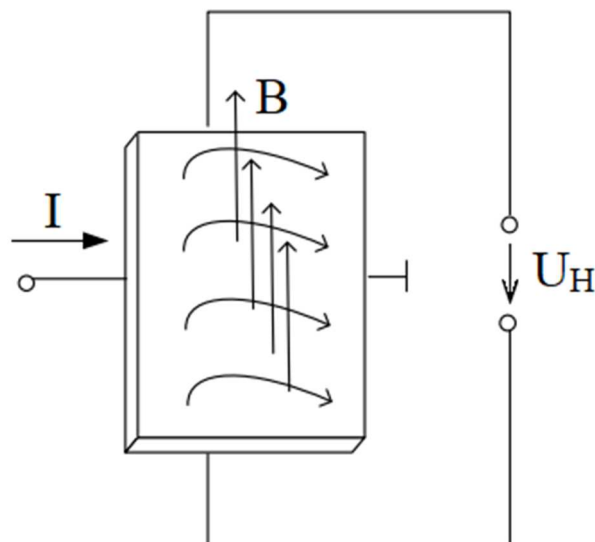
Snímače pracující na magnetickém principu využívají magnetického pole trvalého magnetu. Typickým zástupcem této skupiny jsou čidla využívající tzv. Hallova jevu, který byl v 19. století objeven Edwinem Hallem. Jelikož jsou založeny na bezkontaktním snímání, mohou se aplikovat i tam, kde kvůli náročným pracovním podmínkám není vhodné použít snímač na optoelektronickém principu. Pokud protéká mezi dvěma elektrodami na opačných stranách sondy proud a zároveň kolmo na tuto sondu působí magnetická indukce \mathbf{B} , dochází k vychylování náboje ke stranám sondy. Příčinou této odchylky je Lorentzova síla, která je určena vzorcem:

$$\vec{F} = Q \cdot (\vec{E} + \vec{v} \times \vec{B}) \quad (2.5)$$

kde Q značí náboj, v rychlost vychýlení elektronů, \mathbf{E} představuje intenzitu elektrického pole \mathbf{B} je indukce působícího magnetického pole. Během působení se tak mění rozložení náboje, na jedné straně je větší koncentrace elektronů než na druhé. Majoritní nosiče vytvoří příčné elektrické pole, čímž vzniká tzv. Hallovo napětí U_H :

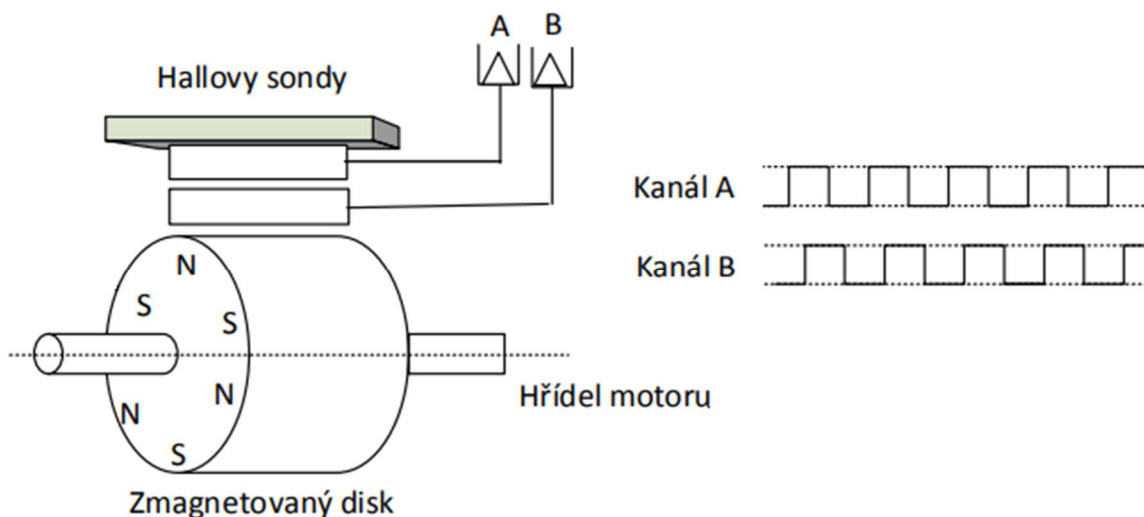
$$U_H = \frac{I \cdot B \cdot R_H}{d} \quad (2.6)$$

kde I představuje proud protékající sondou, \mathbf{B} je indukce působícího magnetického pole, d je tloušťka sondy a R_H je tzv. Hallův koeficient, definovaný jako převrácená hodnota součinu elementárního náboje a koncentrace nositelů náboje v jednotce objemu. Hodnota Hallova napětí se pohybuje řádově v milivoltech.



Obrázek 2.7 - Principiální schéma Hallovy sondy, převzato z [17]

Pomocí tohoto jevu můžeme měřit magnetické pole různých materiálů (což je využíváno např. v měřicích převodnicích proudu) nebo modulovat elektrický signál magnetickým polem. Jako materiál pro Hallovy sondy se používá křemík (Si), galium (Ga), germanium (Ge), arsenid india (InAs), antimonit india (InSb) a arsenid galia (GaAs). Z hlediska citlivosti a teplotní závislosti jsou výhodnější polovodiče ze sloučenin 13. a 15. skupiny prvků periodické tabulky (GaAs, InSb).



Obrázek 2.8 - Schéma popisující funkci rotačního snímače s Hallovými sondami, převzato z [8]

V praxi se používají dvě možná zhotovení rotačního magnetického senzoru s Hallovými sondami. První typ je založen na snímání výstupního napětí sond, které je závislé na magnetické indukci B . Toto napětí se mění v závislosti na rotaci hřídele současně se zmagnetovaným diskem. Výstupní signál je pak tvarován pomocí komparátoru, čímž vzniká obdélníkový průběh. Druhý typ se skládá z malého dvoupólového magnetu a čipu s maticí Hallových sond. Sondy v tomto čipu snímají změny magnetického toku, které jsou závislé na Hallova napětí vznikajícím při rotaci magnetu. Tyto snímače reagují pouze na složku, která je kolmá k povrchu čipu, snímač tak může pracovat i v prostředí s vysokou úrovní magnetického rušení. Čip je konstruován tak, aby byl schopen zpracovat analogový, inkrementální i absolutní formát výstupního signálu. [8]

2.2 Popis vybraných čidel dostupných na trhu

V této podkapitole jsou popsány vybrané senzory, které jsou v současnosti dostupné na trhu. Jdou zde popsány jejich elektrické a mechanické vlastnosti a parametry udávané jejich výrobcem a tyto údaje jsou uřízeny tak, aby bylo možné na jejich základě vybrat vhodný senzor pro konkrétní aplikaci.

2.2.1 ATAS K10A6-00



Obrázek 2.9 - Tachodynamo ATAS K10A6-00, převzato z [18]

Jak je uvedeno výše, digitální čidla jsou v současnosti aplikována častěji než analogová, přesto nelze analogové snímače zcela zanedbat. Pro účely této práce byl jako zástupce analogových senzorů otáček vybrán produkt společnosti ATAS elektromotory Náchod a.s. s typovým označením K10A6-00. [18]

- Mechanické vlastnosti

Udávaný stupeň krytí tohoto zařízení je IP40, to je tedy odolné vůči vniknutí velmi malých předmětů (cca 1 mm), není však chráněno proti vniknutí prachu a vody. Nejvyšší přípustná rychlost je stanovena na 6000 otáček za minutu.

- Výstup

Toto čidlo pracuje na principu tachogenerátoru, konkrétně tachodynamu, jeho výstupem je tak analogový napěťový signál přímo úměrný rychlosti otáčení. Udávaný poměr výstupního napětí a rychlosti je $80\text{V} / 1000\text{ min}^{-1}$, konstanta K_{TD} je tak rovna přibližně 0,7639. Nejvyšší možné indukované napětí je tak při maximálních otáčkách 480 V. Jako maximální výstupní proud je uvedena hodnota 20mA, proto je výrobcem doporučeno výstup zatěžovat odporem minimálně 24 k Ω , aby ani při maximálním napětí nebyl překročen maximální proud.

2.2.2 Omron E6C2-C



Obrázek 2.10 - Čidlo otáček Omron E6C2-C, převzato z [19]

Tento výrobek japonské společnosti OMRON Corporation využívá pravděpodobně nejčastěji aplikovaného principu rotačních čidel, tedy principu inkrementálního enkodéru. [19]

- Mechanické vlastnosti

Přednostmi jeho mechanické konstrukce je stupeň krytí IP64, tedy úplná odolnost vůči vniknutí pevných částic a rovněž stříkající vody a dále díky použití většího ložiska než u starších modelů této řady vyšší odolnost vůči mechanickému namáhání, dle dokumentace odolá působení síly až 50 N v radiálním a 30 N v axiálním směru. Maximální přípustná rychlost otáčení hřídele je stanovena na 6000 ot/min. Maximální uváděné zrychlení vibrací je zde 150 m/s².

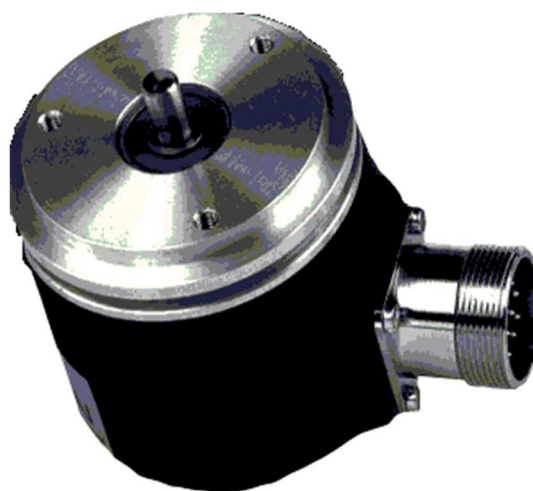
- Napájení

Různá provedení tohoto senzoru vyžadují různé hodnoty napájecího napětí, nicméně ve všech případech se jedná o napájení nesymetrické. Obecně lze říci, že se jedná o hodnoty v rozsahu 5 - 24 V stejnosměrných, tedy standardní hodnoty napájecího napětí. Uváděné jmenovité hodnoty odebíraného proudu se taktéž liší dle provedení a pohybují se v rozsahu od 80 mA pro typ připouštějící napájecí napětí 24 V po 160 mA u typu vyžadujícího napájení 5 V. Z výše uvedeného tak vyplývá, že výkonová ztráta, kterou senzor představuje, se pohybuje zhruba v rozmezí 1-2 W.

- Výstup

Jak bylo popsáno v části 2.1.2, výstupem tohoto senzoru jsou tři kanály, zde označené A, B a Z. Posun mezi kanály A a B se pohybuje v rozmezí $45^\circ - 135^\circ$. Doba náběžné a sestupné hrany výstupních pulsů nepřekročí $1\mu\text{s}$ při dodržení maximální délky kabelu 2 m. Rozlišení senzoru, tedy počet pulsů na jednu otáčku se pro různá provedení pohybuje v rozmezí 10 - 2000. V základním provedení s proudovým výstupem je výstupním prvkem bipolární tranzistor (vyrábí se v provedení NPN i PNP) který připouští maximální výstupní proud 35 mA. Dalším provedením výstupu je výstup napěťový s bipolárním tranzistorem NPN, umožňující maximální proud 20mA. Posledním typem výstupu provedení s diferenciálním linkovým driverem s výstupním proudem $\pm 20\text{ mA}$. Tento způsob provedení umožňuje propojit výstup přímo se sériovou sběrnicí dle standardu RS-422, který využívá rozdíl potenciálů mezi vodiči a je díky němu možné přenášet data rychlostí až 10 milionů bit/s.

2.2.3 LARM ARC 400



Obrázek 2.11 - Čidlo LARM ARC 400, převzato z [20]

Společnost LARM a.s. je tradiční český výrobce optoelektronických a magnetických snímačů, dále se věnuje mechanickým a elektrotechnickým montážím a taktéž je dodavatelem CNC soustružení a frézování. Pro tuto práci byl z jejich produkce vybrán senzor s typovým označením ARC 400, fungující na principu absolutního enkodéru. [20]

- Mechanické vlastnosti

Stupeň krytí je u tohoto senzoru udáván IP 65, vedle absolutní odolnosti proti vniknutí pevných těles tak poskytuje ochranu proti tryskající vodě, přesto v prostředích mokřých, se stékající nebo stříkající kapalinou výrobce nedoporučuje snímač polohovat hřídélí nahoru. Zatížení hřídele je omezeno hodnotami 40 N v axiálním a 60 N v radiálním směru. Maximální rychlost, je stejně jako v předchozím případě 6000 otáček za minutu. Pro správnou funkci mechanismu je doporučeno použití vhodné homokinetické spojky. Maximální uvedené zrychlení vibrací je $10 g_n$ což odpovídá zhruba 98 m/s^2 , senzor je tedy zhruba o třetinu méně odolný než typ Omron E6C2-C.

- Napájení

Senzor vyžaduje napájení stejnosměrným napětím v rozsahu 10-30 V, může tak být napájen pomocí obou nejčastěji využívaných hodnot napětí pro ovládací obvody, tedy 12 V a 24 V. Udávaný odběr proudu je 60-70mA, výkon odebíraný senzorem je tak cca 1,6 W.

- Výstup

Digitální výstup tohoto senzoru je zakódován v Grayově kódu. Rozlišení výstupu může být v závislosti na provedení 2^8 , 2^{10} , 2^{12} nebo 2^{13} . Výstupní bity jsou vyvedeny paralelně na jednotlivé piny konektoru, respektive vodiče kabelu. U maximálního rozlišení 2^{13} je navíc ke třináctému bitu vyveden fázově posunutý signál s rozlišení 2048 impulzů na otáčku, senzor tak lze využít též jako inkrementální. Pro rozlišení do 2^{10} je použit 12 pinový konektor, pro vyšší je konektor 16 pinový, pro speciální provedení až 19 pinový. Maximální proudové zatížení výstupu je stanoveno na $\pm 20 \text{ mA}$. Napěťové úrovně výstupního signálu jsou stanoveny takto: logická nula je napětí menší než 1,2 V a logická jednička je v rozmezí od napětí o 3 V nižšího, než je napájecí do napětí napájecího.

2.2.4 Leine Linde RHI 503



Obrázek 2.12 - Enkodér Leine Linde RHI 503, převzato z [21]

Švédská společnost Leine Linde se zaměřuje na výrobu a vývoj zejména enkodérů ale i dalších typů snímačů již více než 50 let. Pro účely této práce byl vybrán jeden z jejich nejpoužívanějších výrobků s typovým označením RHI 503. [21]

- Mechanické vlastnosti

Tento snímač má stupeň krytí IP 67, oproti předchozím tak má výrazně vyšší odolnost vůči vniknutí vody, je chráněn proti ponoření do vody na 30 minut do hloubky 1 metr. Naopak odolnost vůči mechanickému namáhání je zde podstatně nižší, udávané hodnoty jsou 10 N v axiálním a 20 N v radiálním směru. Nejvyšší rychlost je zde stejně jako v předchozích případech stanovena na 6000 otáček za minutu. Odolnost vůči vibracím je podstatně vyšší, uvedená maximální hodnota zrychlení je 300 m/s^2 , tedy dvojnásobná oproti typu E6C2-C a trojnásobná oproti LARM ARC 400.

- Napájení

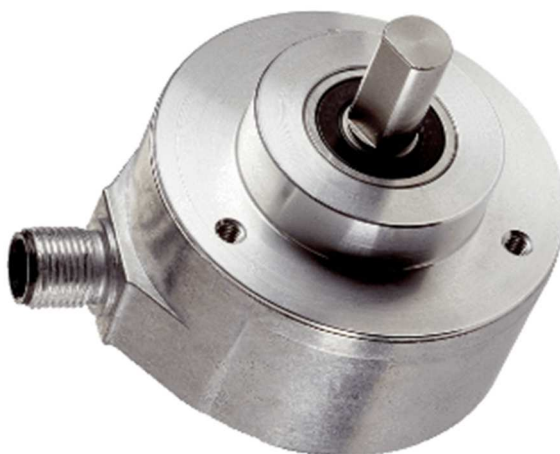
Napájení je obdobně jako v případě senzoru LARM ARC 400 v rozsahu 9-30 V, přičemž odběr proudu je pro nejčastěji používanou hodnotu napětí 24 V uveden 50 mA. Výkon odebíraný senzorem je tak cca 1,2 W.

- Výstup

Výstup tohoto čidla je inkrementální s udávanou přesností 2048 pulsů na otáčku. Oproti E6C2-C má však dvojnásobný počet výstupních vodičů, tedy 6, neboť jeho výstupní kanály jsou vyvedeny jak v přímé tak invertované formě. Výstupní signál využívá logiku HTL. Dále je zde též vyveden výstup s označením “Status” který pokud je v logické jedničce

signalizuje, že je senzor je v chodu, logická nula pak znamená poruchu či varování. Výstup může být zatěžován proudem až 40 mA, tedy více než předchozí typy.

2.2.5 SICK DFS60



Obrázek 2.13 - Programovatelný enkodér SICK DFS60, převzato z [22]

Tento senzor pracuje na principu inkrementálního enkodéru, oproti výše uváděným enkodérům má však velkou výhodu v tom, že jej lze pomocí programovacího softwaru PGT-08-S flexibilně přizpůsobovat konkrétním aplikacím a navíc programovatelná poloha nulového impulsu zjednodušuje instalaci. [22]

- Mechanické vlastnosti

Stupeň krytí je v tomto případě IP 67 ze strany konektoru (je-li konektor osazen a utažen) a IP65 ze strany hřídele. Odolnost vůči mechanickému namáhání je zde 80 N v radiálním, respektive 40 N v axiálním směru. Nejvyšší rychlost je zde o 50% vyšší než předchozích případech, tedy 9000 otáček za minutu. Odolnost vůči vibracím je 30 g_n, tedy zhruba 294 m/s², tedy hodnota srovnatelná s typem Leine Linde RHI 503.

- Napájení

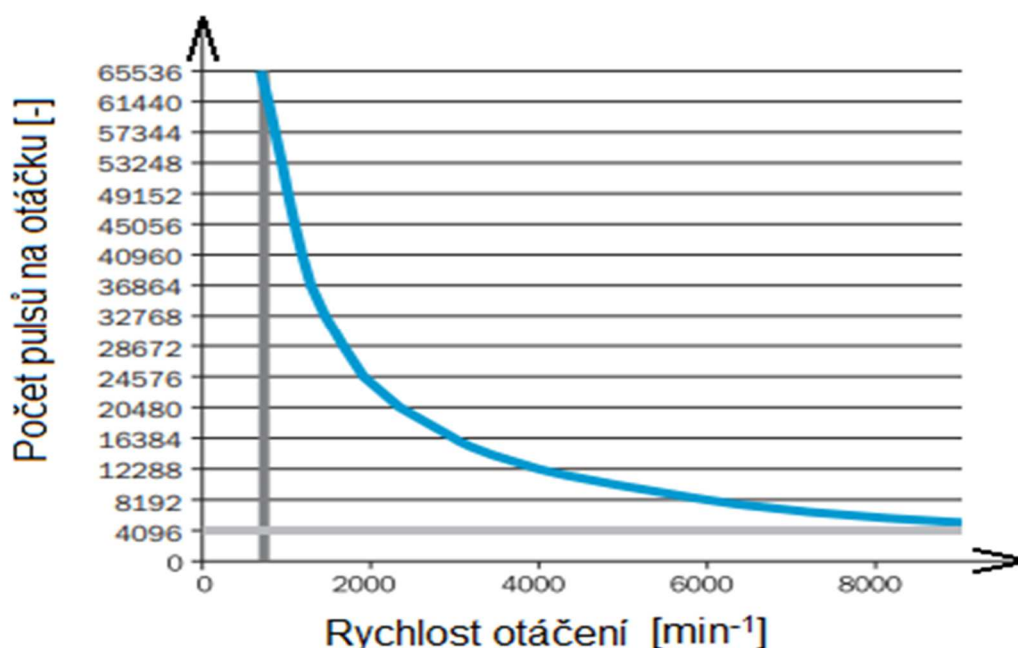
Napájecí napětí může být v rozsahu 4,5 až 32 V, což je největší rozsah ze zde uváděných čidel. Odebíraný proud není výrobcem uveden, nicméně je uveden odebíraný výkon, který je v případě, že senzor není zatížen 0,7 W.

- Výstup

Výstup je inkrementální s možností výběru logiky TTL nebo HTL, přičemž v továrním nastavení jde o TTL. Rozlišení je možné nastavit v rozsahu 2^{12} až 2^{16} pulsů na otáčku, přičemž závisí na předpokládané rychlosti otáčení, jak ukazuje graf níže (obrázek 2.14). Maximální výstupní proud je stanoven na 30 mA, je tedy vyšší než u všech předchozích enkodérů s výjimkou typu Leine Linde RHI 503. Stejně jako tento typ je vybaven šesti výstupními vodiči.

- Konfigurace

Výstupní vodiče slouží taktéž k programování enkodéru. V takové případě jsou připojeny do přípravku s typovým označením PGT-08-S, který je vybaven konektorem dle standardu USB. Po jeho připojení do PC je za použití příslušného software možné nakonfigurovat rozlišení a logiku výstupu, a rovněž pozici a délku nulového pulsu. Pozici nulového pulsu je však možné nastavit i bez použití PC, a to připojením vodiče s označením „0-SET“ na napájecí napětí na dobu delší než 250 ms.



Obrázek 2.14 - Grafické znázornění závislosti nastavení rozlišení na skutečné (předpokládané) rychlosti rotace, převzato z [22]

2.2.6 Kübler RLI 200



Obrázek 2.15 – Bezkontaktní enkodér Kübler RLI 200, převzato z [23]

Tento snímač pracuje jako inkrementální enkodér, jeho velkou předností oproti výše uváděným typům je to, že je bezkontaktní. Je dodáván německou společností Kübler a dodávka se skládá z magnetického prstence a snímací hlavy na principu Hallovy sondy.

- Mechanické vlastnosti

Snímací hlava musí být umístěna nejméně 10 mm nad prstencem, který lze namontovat na hřídele o průměru až 390 mm. Upevnění pomocí štěrbinových otvorů zajišťuje jednoduché vyrovnání a bezkontaktní měřicí princip umožňuje dlouhou životnost a bezchybný provoz i za nepříznivých podmínek prostředí. Stupeň krytí IP68, speciální technologie zapouzdření a testovaná odolnost proti cyklické vlhkosti a teple poskytují maximální spolehlivost i při nechráněném venkovním použití.

- Napájení

Napájecí napětí může být v rozsahu 4,8 až 26 V. Maximální odebíraný proud je výrobcem udán 60 mA, maximální odebíraný výkon je tedy roven zhruba 1,6 W.

- Výstup

Jak bylo uvedeno výše, výstup je inkrementální, s maximálním výstupním proudem ± 20 mA, a v závislosti na provedení používá logiku TTL nebo HTL. Rozlišení výstupu závisí na konkrétním provedení a koreluje s maximální rychlostí otáčení, jak ukazuje tabulka níže. Snímací hlava je dále vybavena dvojicí signalizačních LED diod. Zelená signalizuje chod senzoru, červená pak poruchu, překročení maximální rychlosti, nebo přílišnou vzdálenost od hřídele a z toho plynoucí slabé magnetické pole.

| | | | | | | | | |
|--|-------|------|------|------|------|------|------|-------|
| Pulsy na otáčku [-] | 700 | 1600 | 2240 | 2800 | 5120 | 6400 | 7000 | 16000 |
| Maximální rychlost [min^{-1}] | 12000 | 9300 | 6600 | 5300 | 2900 | 2300 | 2100 | 900 |

Tabulka 2 – Závislost rozlišení senzoru RLI 200 na maximální rychlosti

2.2.7 Porovnání popisovaných senzorů

Výše uvedené senzory se vyznačují různými parametry, z nichž je třeba vycházet při volbě vhodného senzoru pro konkrétní aplikaci. Jde o parametry jak elektrické (napájení, spotřeba energie, typ výstupu atd.) tak mechanické (odolnost hřídele vůči namáhání, odolnost vůči vibracím, stupeň krytí atd.). Tyto parametry jsou shrnuty v tabulce níže (Tabulka 2). Díky velkému počtu výrobců a mezinárodnímu obchodu je v současné době dostatek dostupných senzorů, které se svými parametry odlišují a je tak možné pro každou specifickou aplikaci zvolit vhodný senzor, s ohledem na používaný řídicí systém, rozsah otáček, prostředí, v němž je pohon instalován a další kritéria.

| Výrobce | ATAS | Omron | LARM | Leine Linde | SICK | Kübler |
|--|---|--|---|---|---|---|
| Typové označení | K10A6-00 | E6C2-C | ARC 400 | RHI 503 | DFS60 | RLI 200 |
| Princip | Indukční | Optoelektronický | Optoelektronický | Optoelektronický | Optoelektronický | Magnetický |
| Výstup | analogový | digitální - impulsní | digitální - Grayův kód | digitální - impulsní | digitální - impulsní | digitální - impulsní |
| Rozlišení | $\frac{80V}{1000 \text{ ot/min}}$ | 10-2000 pulsů na otáčku * | 8 - 13 bitů * | 2048 pulsů na otáčku | 4096 - 65536 pulsů na otáčku * | 700 - 16000 pulsů na otáčku * |
| Maximální výstupní proud [mA] | 20 | 20 / 35 * | 20 | 40 | 30 | 20 |
| Stupeň krytí | IP 40 | IP 64 | IP 65 | IP 67 | IP 65/67 | IP 68 |
| Maximální rychlost [min ⁻¹] | 6000 | 6000 | 6000 | 6000 | 9000 | 900-12000 * |
| Maximální namáhání hřídele [N] | N/A | 30 (v axiálním směru) / 60 (v radiálním směru) | 40(v axiálním směru) / 60 (v radiálním směru) | 10(v axiálním směru) / 20 (v radiálním směru) | 40(v axiálním směru) / 80 (v radiálním směru) | - |
| Maximální zrychlení vibrací [m/s ²] ** | N/A | 150 | 98 | 300 | 294 | 300 |
| Napájecí napětí [V] | - | 5 - 24 | 10 - 30 | 9 - 30 | 4,5 - 32 | 4,8 - 26 |
| Odebíraný výkon [W] | - | 1-2 * | 1,6 | 1,2 | 0,7 | 1,6 |
| Hmotnost [kg] | 1,6 | 0,4 | 0,3 | 0,3 | 0,3 | 0,2 |
| Rozměry [mm] | 80 (průměr) / 123 (délka bez hřídele) | 50 (průměr) / 40 (délka bez hřídele) | 58 (průměr) /56 (délka bez hřídele) | 58 (průměr) / 29,4 (délka bez hřídele) | 60 (průměr) / 40 (délka bez hřídele) | 26 (výška) x 10 (šířka) x 40 (délka) |

* V závislosti na provedení

** Při frekvenci 10-2000 Hz

Tabulka 3 - Přehled parametrů porovnávaných čidel otáček

3 Simulace v prostředí MATLAB

Obsahem této kapitoly je analýza rozhraní čidlo-pohon, kdy jsou na simulačním modelu pozorovány negativní vlivy, ovlivňující přenos signálu z čidla otáček do regulátoru. Tyto vlivy jsou graficky znázorněny a vyhodnoceny.

3.1 Popis simulačního prostředí

Pro simulaci elektrického pohonu byla zvolena platforma MatLab, která představuje velmi mocný nástroj pro řešení a analýzu technické problematiky. Integruje výpočty, vizualizaci a programování do jednoho uživatelského prostředí, kde problémy a řešení jsou vyjádřeny pomocí dobře známých matematických vztahů. Nejsilnější vlastností tohoto softwarového nástroje je práce s datovými poli, které není nutné dimenzovat, což umožňuje řešit mnoho technických problémů s použitím formulací pomocí vektorů a matic. Typické použití zahrnuje výpočty, tvorbu algoritmů, analýzu dat, výzkum a vizualizaci; pro tuto práci je nejdůležitějším aspektem aplikace modelování a simulace dynamických systémů. K tomu slouží primárně nadstavba nazývaná Simulink. Ta poskytuje uživateli možnost rychle a snadno vytvářet modely dynamických soustav ve formě blokových schémat. Modely mohou být popsány rovnicemi nebo mohou být sestavené z bloků reprezentujících prvky reálných systémů. Pro účely této práce byl navíc implementován program PLECS jako doplňkový modul. Tento program byl vytvořen primárně pro tvorbu elektrických obvodů a jejich simulaci. [24]

3.2 Volba prvků a parametrů modelu

3.2.1 Výkonová část

Nejstarším typem elektromotoru je motor stejnosměrný, který ještě před několika desetiletími představoval nejpoužívanější pohonnou jednotku, avšak s rozvojem technologie výkonových polovodičových měničů na bázi křemíkových součástek byl postupně vytlačen konstrukčně jednoduššími a provozně spolehlivějšími asynchronní motory, jejichž velká výhoda spočívá v tom, že ke své funkci nepotřebují kluzné kontakty. Avšak aplikace permanentních magnetů ze speciálních slitin s velkou magnetickou indukcí umožňuje konstruovat bez kluzných kontaktů i synchronní (PMSM - Permanent Magnet Synchronous Motor) a stejnosměrné (BLDC - Brushless DC electric motor) motory. Zejména PMSM se již více než 20 let standardně využívají v servotechnice, robotice a automatizační technice,

a v posledních letech taktéž v trakci. Proto v této práci budu simulovat chování regulovaného pohonu, jehož výkonovou část tvoří PMSM řízený napěťovým střídačem napájeným ze stejnosměrného zdroje napětí. Pro provádění simulací je nutné znát následující parametry motoru:

- Činný odpor statorového vinutí - R_s
- Podélná indukčnost statorového vinutí - L_d
- Příčná indukčnost statorového vinutí - L_q
- Spřažený magnetický tok permanentních magnetů - ψ
- Moment setrvačnosti pohyblivých částí motoru - J
- Počet pólových dvojic na rotoru motoru - p

Pro tento příklad volíme motor s typovým označením PE1R 132 z produkce společnosti VEM, který má následující parametry [25]:

- Jmenovitý výkon 5,5 kW; jmenovité napětí 400V (ef)
- Jmenovitý moment 35 Nm, maximální moment 100 Nm
- Jmenovité otáčky $n_N = 1500 \text{ min}^{-1}$; jmenovitá frekvence $f_N = 50 \text{ Hz}$
→ $p = 2$
- $R_s = 0,55 \Omega$
- $L_s = 8,2 \text{ mH}$ (Jde o provedení s přisazenými magnety, tedy platí $L_s = L_d = L_q$)
- $\psi = 80 \text{ mWb}$
- $J = 0,011 \text{ kg}\cdot\text{m}^2$

3.2.2 Regulační část

Řídící obvod pohonu obvykle tvoří několik regulačních smyček (viz 1.1). K hlavnímu regulátoru se přidává ještě pomocný regulátor. Vhodným propojením je možné dosáhnout vyšší dynamiky regulace a větší stability. Pomocná veličina je veličina, kterou nemusíme z technologického hlediska regulovat, ale co je důležité, musí podstatně rychleji reagovat na vstupy poruchové veličiny než hlavní regulační smyčka. Hlavní regulační smyčkou je pochopitelně regulace rychlosti otáček a pomocným regulátorem je zde regulace proudu. Rychlost je regulována vnější rychlostní smyčkou pomocí PI regulátoru, který je doplněn mechanismem pro potlačení nepříznivých následků nasycení integrační složky (tzv. wind-up jevu). Výstupem regulátoru rychlosti je požadavek na proud, který se pak převádí

se na ekvivalentní hodnotu fázového proudu. Měřené fázové proudy jsou pak porovnávány s těmito referenčními proudy. Chybový signál vytvořený jako rozdíl mezi nimi je pak zaveden do hysterezního proudového regulátoru, který generuje spínací signál pro řízení střídače. Jelikož se jedná o vektorovou regulaci, je zde vedle snímače otáček aplikován též snímač polohy rotoru, neboť údaj o aktuálním natočení rotoru je nutný pro transformaci dvourozměrného vektoru (výstup regulátoru otáček) do trojfázového signálu (vstup regulátoru proudu).

3.2.3 Negativní vlivy

V tomto modelu budeme pozorovat negativní vlivy působící na signál přenášený z čidla otáček do regulátoru. Zanedbáme zde vlivy působící na signál přenášený z čidla polohy, které by co do charakteru a intenzity byly v zásadě stejné. Tyto vlivy jsou v modelu reprezentovány těmito typy zkreslení:

- Zpoždění

Zpoždění signálu v senzoru otáček může být způsobeno převodem analogového signálu na číslicový a následným zpracováním, případně následným přenosem po sběrnici (viz obrázek 2.1). Významný je zde vliv omezeného počtu pulsů na otáčku a z toho vyplývající doby čekání na další puls. Problémem je též kvantování na omezený počet úrovní. Hodnotu tohoto zpoždění lze očekávat řádově v jednotkách mikrosekund.

- Šum

Zarušení přenášeného signálu může být způsobeno elektromagnetickým šumem, který je generován například činností výkonového měniče, spínaných napájecích zdrojů a dalšími zařízeními, případně může být zdrojem rušení i napájení o síťové frekvenci 50 Hz.

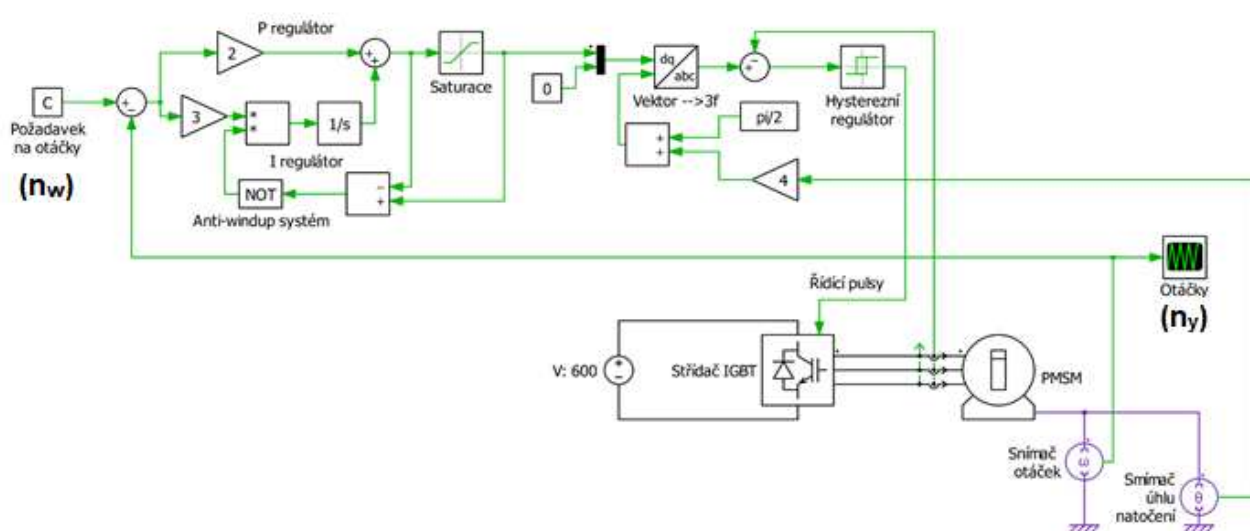
- Nelinearita

Nelinearita čidla může být následkem nevhodné montáže či výrobní nedokonalosti mechanického provedení senzoru, následkem čehož dochází k výchybkám a signál tak nedopovídá skutečné fyzické poloze rotoru. Může se zde též projevit elasticita spojky, která se projeví zejména při rozběhu a změnách zátěžného momentu.

3.2.4 Sestavení simulačního modelu

Simulační model byl sestaven za použití knihovny funkčních bloků, která je součástí software PLECS. Model motoru byl nakonfigurován pomocí parametrů zjištěných z katalogového listu (viz 3.2.1). Motor je provozován ve stavu na prázdno. Správné nastavení proměnných v jednotlivých součástech regulačního systému bylo provedeno metodou kvalifikovaného odhadu a postupným doladováním bylo dosaženo optimálního stavu. Výchozí konfigurace regulátoru pak je:

- Hodnoty zesílení PI (rychlostního) regulátoru:
 - $K_P = 2$
 - $K_I = 3$
- Mezní hodnoty saturace = ± 7
- Mezní hodnoty hysterezního (proudového) regulátoru = $\pm 0,5$



Obrázek 3.1 - Schéma simulačního modelu bez negativních vlivů

Funkce modelu byla otestována spuštěním simulace bez negativních vlivů ve zpětné vazbě. Požadavek na otáčky byl zvolen $n_w = 1000 \text{ min}^{-1}$, tedy $\omega_w = 104,719 \frac{\text{rad}}{\text{s}}$. Průběh otáček je graficky znázorněn níže (obrázek 3.2). V rámci této simulace byla zjištěna doba regulace $t_r = 2,731 \text{ ms}$. Maximální překmit neboli hodnota přeregulování je zde $n_{MAX} \approx 1000,05 \text{ min}^{-1}$, vyjádřeno v procentech:

$$n_p = \frac{n_{MAX} - n_w}{n_w} \cdot 100 = 0,05\% \quad (3.1)$$



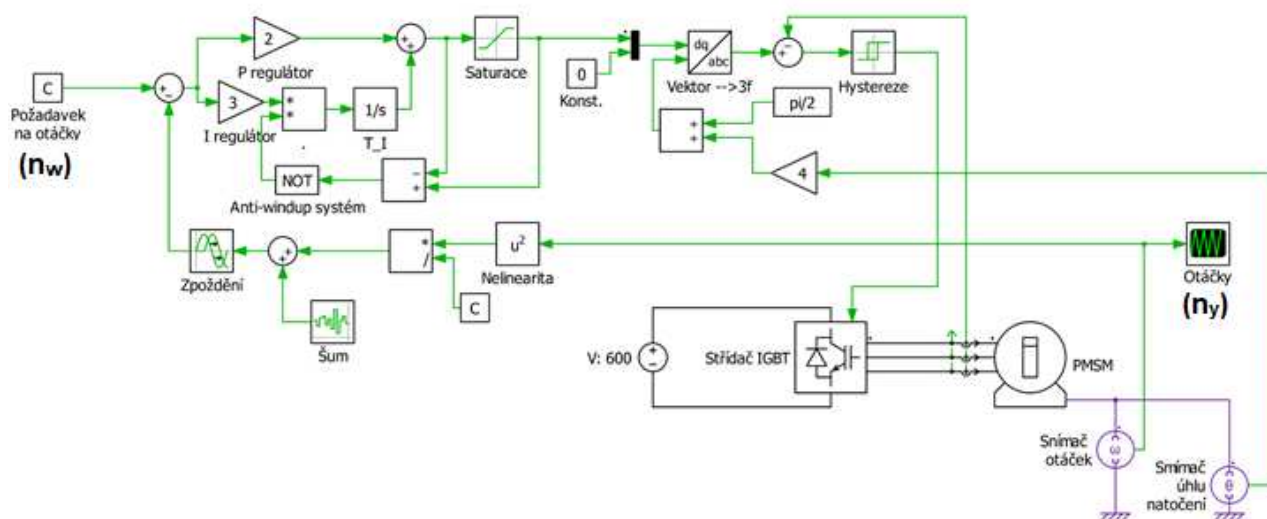
Obrázek 3.2 - Průběh otáček při simulaci bez negativních vlivů

V tomto idealizovaném případě se po odeznění překmitu ustálí hodnota otáček přímo na hodnotě požadovaných otáček n_w . Z těchto vlastností regulačního pochodu lze usoudit, že výše uvedené nastavení regulačního obvodu je vhodné a může tak být použito pro další simulace.

3.3 Simulace negativních vlivů

Simulační model je nutné doplnit o negativní vlivy popsané v části 3.2.3. Zpoždění je zde simulováno blokem “Transport delay”, tedy dopravní zpoždění, jehož jediným parametrem je časová hodnota Δt . Šum je reprezentován blokem “White noise”, tedy bílý šum, který je pomocí součtového bloku superponován na signál ve zpětné vazbě. Tento blok generuje náhodná čísla, jejichž rozdělení pravděpodobnosti odpovídá Gaussovu normálnímu rozdělení. Parametry tohoto bloku jsou střední hodnota μ a směrodatná odchylka σ . Nelinearita je zde modelována kvadratickou funkcí:

$$y = \frac{x^2}{1000} \quad (3.3)$$



Obrázek 3.3 - Schéma simulačního modelu s negativními vlivy

Jelikož odhad výše zmíněných parametrů je obtížný a jejich velikost se různí podle konkrétní aplikace, budou provedeny tři simulace s různými hodnotami těchto parametrů a poté budou porovnány a vyhodnoceny.

3.3.1 Simulace č. 1

Hodnoty parametrů negativních vlivů:

- $\Delta t = 1 \mu s$
- $\mu = 10$
- $\sigma = 1$

Při těchto parametrech lze negativní vlivy považovat za velice mírné, přesto se projeví ve zhoršení regulačního pochodu, jak ukazují grafy níže (obrázky 3.5 a 3.6). Zde můžeme pozorovat nárůst doby regulace, která je v tomto případě $t_r = 3,428 \text{ ms}$, tedy zhruba o 0,7 ms delší než v případě kdy byly negativní vlivy zcela zanedbány (viz část 3.2.4). Další zhoršení regulačního pochodu lze spatřit ve výrazně vyšším překmitu a celkově ve zvlnění otáček. Překmit, tedy maximální hodnota přeregulování zde dosahuje hodnoty $n_{MAX} = 1005 \text{ min}^{-1}$, vyjádřeno v procentech:

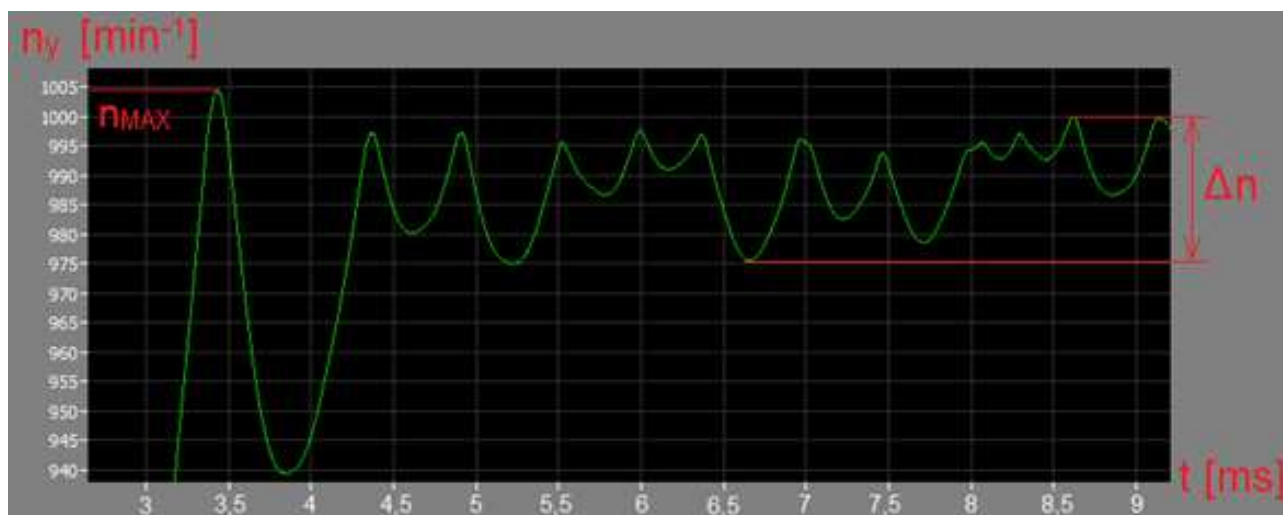
$$n_p = \frac{n_{MAX} - n_w}{n_w} \cdot 100 = 0,5\% \quad (3.4)$$



Obrázek 3.4 - Průběh otáček při simulaci č. 1

Po odeznění tohoto překmitu se hodnota otáček dále pohybuje v pásmu o šířce $\Delta n \approx 1000 - 975 = 25$, vyjádřeno v procentech:

$$\delta n = \frac{\Delta n}{n_w} \cdot 100 = 2,5\% \quad (3.5)$$



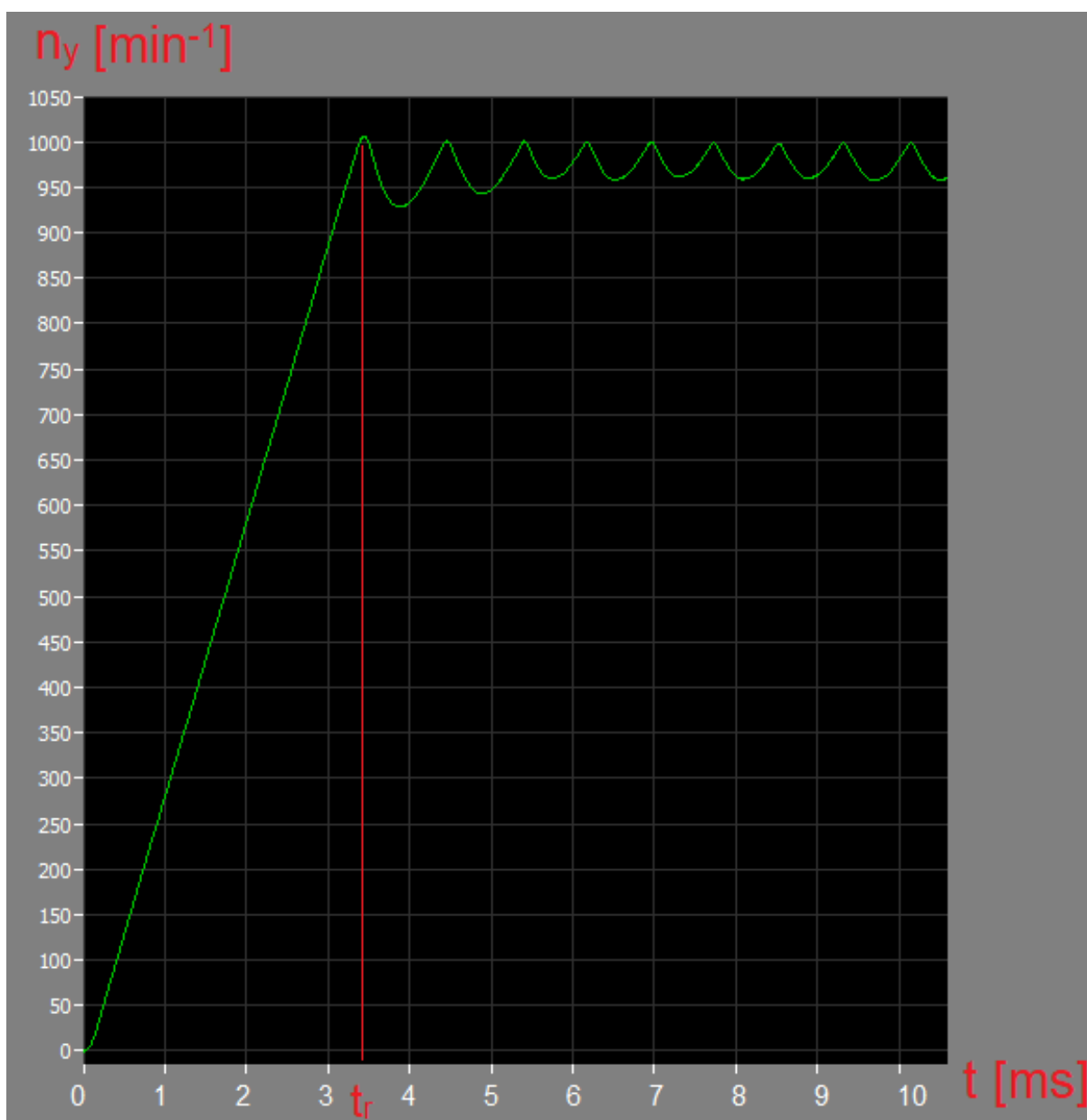
Obrázek 3.5 - Průběh otáček při simulaci č. 1, detail

3.3.2 Simulace č. 2

Hodnoty parametrů negativních vlivů:

- $\Delta t = 10 \mu\text{s}$
- $\mu = 10$
- $\sigma = 1$

Při této simulaci byla hodnota zpoždění zvýšena na desetinásobek, hodnoty popisující šum byly ponechány. Průběh otáček zobrazují grafy níže (obrázky 3.7 a 3.8).



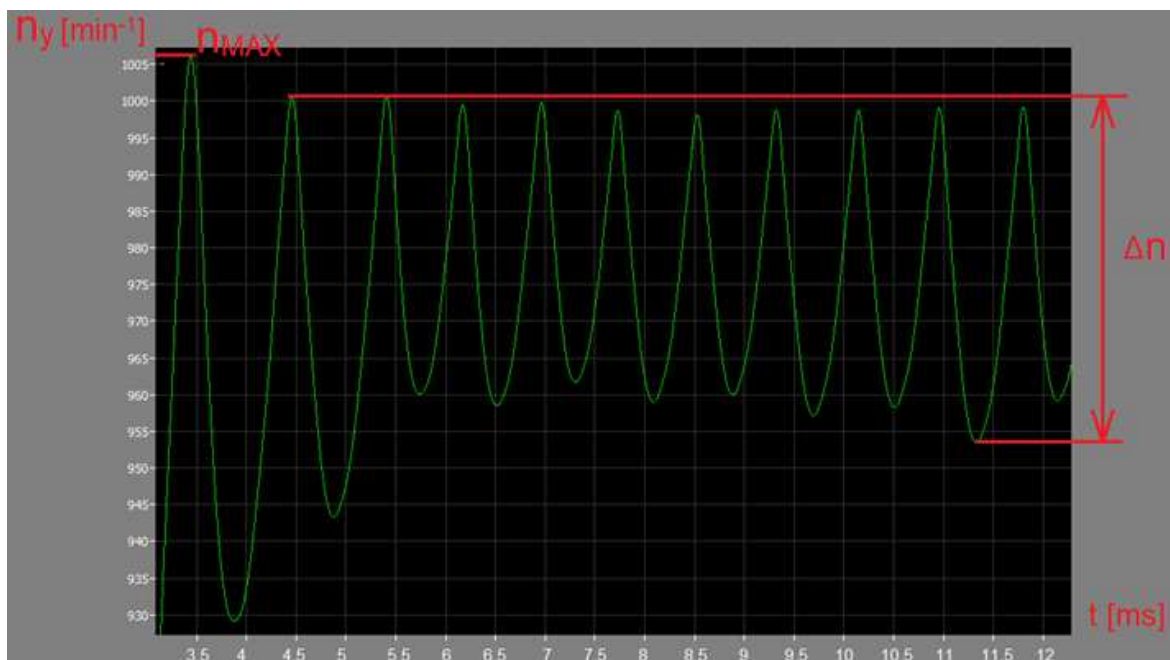
Obrázek 3.6 - Průběh otáček při simulaci č. 2

Doba regulace je zde stejná jako v předchozím případě, tedy $t_r = 3,428$ ms. Taktěž hodnota překmitu se zvýšila jen velice mírně, $n_{MAX} = 1006 \text{ min}^{-1}$, vyjádřeno v procentech:

$$n_p = \frac{n_{MAX} - n_w}{n_w} \cdot 100 = 0,6\% \quad (3.6)$$

Šířka pásma, v němž se po odeznění překmitu otáčky pohybují, se však výrazně zvětšila. Dosahuje nyní hodnoty $\Delta n \approx 1001 - 953 = 48$, vyjádřeno v procentech:

$$\delta n = \frac{\Delta n}{n_w} \cdot 100 = 4,8\% \quad (3.7)$$



Obrázek 3.7 - Průběh otáček při simulaci č.2, detail

3.3.3 Simulace č. 3

Hodnoty parametrů negativních vlivů:

- $\Delta t = 1 \mu\text{s}$
- $\mu = 20$
- $\sigma = 5$

Při této simulaci bylo hodnota zpoždění ponechána na stejné hodnotě jako při simulaci č. 1, byly však zvýšeny parametry šumu. Střední hodnota je zde dvojnásobná, hodnota směrodatné odchylky je pětinasobná. Průběh otáček zobrazují grafy níže (obrázky 3.9 a 3.10).



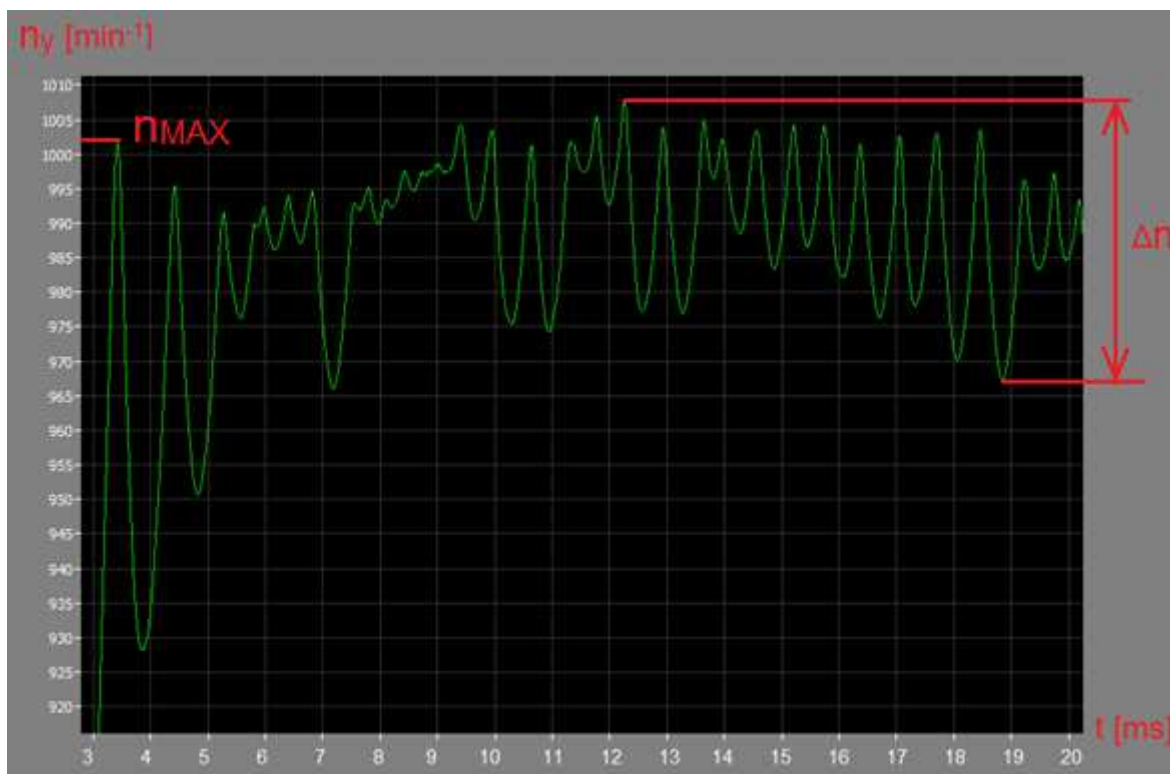
Obrázek 3.8 - Průběh otáček při simulaci č. 3

Doba regulace je zde opět stejná jako v předchozích případech, tedy $t_r = 3,428 \text{ ms}$. Hodnota překmitu je velice nízká, $n_{MAX} = 1002 \text{ min}^{-1}$, vyjádřeno v procentech:

$$n_p = \frac{n_{MAX} - n_w}{n_w} \cdot 100 = 0,2\% \quad (3.8)$$

Po odeznění překmitu se otáčky pohybují ve zhruba stejně širokém pásmu, vzniká zde však problém v tom, že hodnota otáček vlivem zarušení signálu může překročit i hodnotu překmitu. Šířka pásma otáček je pak $\Delta n \approx 1012 - 954 = 58$, vyjádřeno v procentech:

$$\delta n = \frac{\Delta n}{n_w} \cdot 100 = 5,8\% \quad (3.9)$$



Obrázek č. 3.9 - Průběh otáček při simulaci č. 3, detail

3.3.4 Vyhodnocení simulací

Provedené simulace ukazují, jak může rozhraní čidlo-pohon negativně ovlivňovat regulační pochod. Ve všech případech bylo zaznamenáno prodloužení doby regulace z původních 2,731 ms na 3,428 ms, tedy vyjádřeno v procentech:

$$\frac{3,428 - 2,731}{2,731} \cdot 100 = 25,521\% \quad (3.10)$$

tedy zhruba o jednu čtvrtinu.

Hodnoty přeregulování neboli překmitu v žádné ze simulací nedosahovaly kritických hodnot, ani v jednom případě nepřekročily 1% z požadované hodnoty. Byl zde však pozorován značný vliv na přesnost regulace, kdy šířka pásma, v němž se otáčky po odeznění překmitu pohybují, dosahovala v tom nejméně příznivém případě (simulace č. 3 - viz část 3.3.3) hodnoty téměř 6% z požadované hodnoty. Výsledky jednotlivých simulací jsou popsány v tabulce 3.

| | Parametry negativních vlivů | | | Kritéria regulačního pochodu | | |
|---------------------------------------|------------------------------|-----------|--------------|------------------------------|-----------|----------------|
| | Δt [μs] | μ [-] | σ [-] | t_r [ms] | n_p [%] | δn [%] |
| Simulace bez negativních vlivů | 0 | 0 | 0 | 2,731 | 0,05 | 0 |
| Simulace č. 1 | 1 | 10 | 1 | 3,428 | 0,5 | 2,5 |
| Simulace č. 2 | 10 | 10 | 1 | 3,428 | 0,6 | 4,8 |
| Simulace č. 3 | 1 | 10 | 5 | 3,428 | 0,2 | 5,8 |

Tabulka 4 - Porovnání výsledků jednotlivých simulací

Závěr

Oblast elektrických pohonů se v současnosti dynamicky rozvíjí, což vyplývá zejména s požadavky na dopravní prostředky šetrné k životnímu prostředí, které zanechávají nízkou uhlíkovou stopou. Popis současného stavu poznání v této oblasti byl realizován v první kapitole této práce, kde byla s ohledem na téma věnována hlavní pozornost aplikaci čidel otáček a polohy. Byly zde popsány základní principy a algoritmy využívané při bezsenzorovém řízení pohonů a dále byla tato možnost řízení porovnána s klasickým přístupem, kdy poloha rotoru a jeho rychlost nejsou estimovány za použití matematických modelů, nýbrž jsou snímány vhodným čidlem. Byly zde dále popsány výhody a nevýhody, které obě možnosti přináší a rovněž zde byly uvedeny příklady aplikací, kdy je použití příslušného čidla vyžadováno. Souhrnně lze říci, že současný stav poznání umožňuje bez závažnějších problémů konstruovat elektrické pohony bez čidel otáček a polohy, nicméně bezsenzorové řízení nedosahuje takové přesnosti a dynamiky jako řízení s využitím senzorů a stále jsou zde aplikace, které použití senzorů vyžadují.

V druhé kapitole pak byly popsány fyzikální principy, používané v těch čidlech, která nacházejí uplatnění v elektrických pohonech. Jedná se tedy o indukční princip, využívající elektromagnetické indukce a tedy čidla na tomto principu tak konstrukčně a principiálně připomínají točivé elektrické stroje. Dalším principem pak je princip optoelektronický, který je využíván v senzorech označovaných jako enkodéry. Ty jsou dnes bezmála synonymem pro snímače otáček a polohy, neboť dosahují vysoké přesnosti a jsou vybaveny digitálním výstupem, vhodným pro další zpracování signálu. A konečně se jedná o princip magnetický, který využívá tzv. Hallova jevu. Dále pak ve druhé kapitole bylo provedeno porovnání čidel v současnosti dostupných na trhu. Za tímto účelem bylo vybráno pět senzorů od různých výrobců, z nichž každý má jiné vlastnosti a parametry, a to jak mechanické tak elektrické, a každý je tak vhodný pro jinou aplikaci. Tyto senzory jsou porovnány v tabulce 2.

V závěrečné třetí kapitole práce pak byla pozornost věnována rozhraní čidlo-pohon, zejména tedy negativním vlivům, které se zde mohou vyskytnout. Za použití simulačního software MatLab/Simulink s nadstavbou PLESC zde byla provedena série simulací, zobrazujících dopady těchto negativních vlivů na regulační pochod. Výsledky jednotlivých simulací jsou shrnuty v tabulce 4. Tuto problematiku lze shrnout tak, že nevhodná volba čidla, chybná instalace či interference prostředí mohou mít negativní vliv na regulaci, může mít za následek značně zhoršený průběh regulačního pochodu.

Seznam literatury a informačních zdrojů

- [1] PAVELKA, Jiří; JAVŮREK, Jiří a ČEŘOVSKÝ, Zdeněk. *Elektrické pohony*. Praha: ČVUT, 2001. ISBN: 80-01-02314-1.
- [2] KŮS, Václav. *Elektrické pohony a výkonová elektronika*. Plzeň: ZČU, 2016. ISBN: 978-80-261-0639-5
- [3] BAŠTA, Jiří. *Rozdíl mezi regulací a ovládním*. [online] TZBinfo: ©2004 [cit. 16.5.2021]
Dostupné z: <https://vytapani.tzb-info.cz/teorie-a-schemata/2203-rozdil-mezi-regulaci-a-ovladanim>
- [4] GAJDŮŠEK, Pavel. *Přehled metod řízení asynchronních motorů*. [online] Elektorevue: ©2005 [cit. 16.5.2021] Dostupné z: <http://www.elektorevue.cz/clanky/05020/index.html>
- [5] *Přímá regulace momentu*. [online] Praha: ČVUT, ©2015 [cit. 16.5.2018]. Dostupné z: http://motor.feld.cvut.cz/sites/default/files/predmety/A1M14VE2/Prima_regulace_momentu.pdf
- [6] VESELÝ, Libor. *Algoritmy bezsnímačového řízení synchronního motoru s permanentními magnety*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, 2013. Vedoucí disertační práce doc. Ing. Pavel Václavek, Ph.D.
- [7] HRUBÝ, Jaromír. *Elektrická zařízení do prostředí s nebezpečím výbuchu*. [online] ELEKTRO: ©2010 [cit. 16.5.2021] Dostupné z: <http://www.odbornecasopisy.cz/elektro/casopis/tema/elektricka-zarizeni-do-prostredi-s-nebezpecim-vybuchu--10368>
- [8] MAIXNER, Ladislav. *Mechatronika*. Brno: Computer press, 2006. ISBN: 80-251-1299-3
- [9] KOCHANÍČEK, Ludvík. *Automatizace: Nejpoužívanější snímače*. [online]. Coptel: Internetový portál ©2010 [cit. 16.5.2021] Dostupné z: : <http://coptel.coptkm.cz/index.php?action=2&doc=7943>
- [10] JEHLÁŘ, Zbyněk. *Vliv externích elektromagnetických polí na funkci snímačů otáček*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2009. Vedoucí diplomové práce doc. Ing. Vladislav Singule, CSc.
- [11] *Měření polohy a rozměrů*. [online] Praha: ČVUT, ©2015 [cit. 16.5.2021]. Dostupné z: <http://elektro.fs.cvut.cz/ZS/2372080.pdf/07.pdf>

- [12] ČAMBÁL, Marek, Martin NOVÁK a Jaroslav NOVÁK. *XXIX. konference Elektrické pohony: Vyhodnocování výstupního signálu resolveru pro určování polohy rotoru synchronního stroje*. [online] Praha: ČVUT, ©2005 [cit. 16.5.2021]. Dostupné z: http://www3.fs.cvut.cz/web/fileadmin/documents/12241-BOZEK/publikace/2005/2005_017.pdf
- [13] *Snímače otáček a polohy*. [online] Ústav mechatroniky a technické informatiky: Fakulty mechatroniky IMS, Technická univerzita v Liberci [cit. 16.5.2021]. Dostupné z: http://www.mti.tul.cz/files/svm/Snimace_polohy.pdf
- [14] Incremental Encoders. PC in control [online]. © 2008 [cit. 16.5.2021]. Dostupné z: http://www.pc-control.co.uk/incremental_encoders.htm
- [15] Sensing: Encoders and Resolvers. Automation primer [online]. 15.7.2012, © 2013 [cit. 16.5.2021]. Dostupné z: <http://automationprimer.com/2012/07/15/encoders-and-resolvers/>
- [16] VOJÁČEK, Antonín. *Rotační enkodéry pro řízení pohonů a pohybu*. [online]. 30.5.2017 © 2017 [cit. 16.5.2021]. Dostupné z: <https://automatizace.hw.cz/rotacni-ekodery-pro-rizeni-pohonu-a-pohybu.html>
- [17] MYNÁŘOVÁ, Věra a Jiří ČENGERY. *Elektronické součástky: cvičení*. 1. vyd. Plzeň: Západočeská univerzita, Elektrotechnická fakulta, 2001, 63 s. ISBN 80-708-2778-5.
- [18] Katalogový list tachodynamu ATAS K10A6-00, viz příloha č. 1
- [19] Katalogový list enkodéru Omron E6C2-C, viz příloha č. 2
- [20] Katalogový list enkodéru LARM ARC 400, viz příloha č. 3
- [21] Katalogový list enkodéru Leine Linde RHI 503, viz příloha č. 4
- [22] Katalogový list enkodéru SICK DFS60, viz příloha č. 5
- [23] Katalogový list enkodéru RLI 200, viz příloha č. 6
- [24] MathWorks. *Product Documentation*. [online]. [cit. 16.5.2021]. Dostupné z: <http://www.mathworks.com/access/helpdesk/help/techdoc/matlab.html>
- [25] Katalogový list motoru VEM PE1R 132, viz příloha č. 7

Přílohy

- Příloha č. 1 - katalogový list ATAS K10A6-00 (soubor *.pdf)
- Příloha č. 2 - katalogový list Omron E6C2-C (soubor *.pdf)
- Příloha č. 3 - katalogový list LARM ARC 400 (soubor *.pdf)
- Příloha č. 4 - katalogový list Leine Linde RHI 503 (soubor *.pdf)
- Příloha č. 5 - katalogový list SICK DFS60 (soubor *.pdf)
- Příloha č. 6 - katalogový list RLI 200 (soubor *.pdf)
- Příloha č. 7 - katalogový list VEM PE1R 132 (soubor *.pdf)
- Příloha č. 8 - simulační model (soubor *.slx)