

ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE
FAKULTA ELEKTROTECHNICKÁ
KATEDRA ELEKTRICKÝCH POHONŮ A TRAKCE

Zpětnovazební řízení BLDC servopohonu soft procesorem

Diplomová práce

Autor práce: Bc. Kuanysh Stikeyev

Vedoucí práce: Ing. Ondřej Zoubek

Studijní program: Elektrotechnika, energetika a management

Obor: Elektrické stroje, přístroje a pohony

I. OSOBNÍ A STUDIJNÍ ÚDAJE

Příjmení: **Stikeyev** Jméno: **Kuanysh** Osobní číslo: **406159**
Fakulta/ústav: **Fakulta elektrotechnická**
Zadávací katedra/ústav: **Katedra elektrických pohonů a trakce**
Studijní program: **Elektrotechnika, energetika a management**
Studijní obor: **Elektrické stroje, přístroje a pohony**

II. ÚDAJE K DIPLOMOVÉ PRÁCI

Název diplomové práce:

Zpětnovazební řízení BLDC servopohonu soft procesorem

Název diplomové práce anglicky:

Softprocessor Feedback Control of BLDC Servodrive

Pokyny pro vypracování:

- 1) Analyzujte možné způsoby řízení
- 2) Vyberte vhodnou strukturu regulátoru
- 3) Vytvořte program pro soft signálový procesor MicroBlaze implementovaný v FPGA firmy Xilinx

Seznam doporučené literatury:

- [1] Balátě, J.: Automatické řízení; BEN, Praha 2004
- [2] Firemní materiály Microchip: Brushless DC Motor Control Made Easy, AN857; Microchip, 2011
- [3] Firemní materiály Kollmorgen: AKD Servo Drive Installation Manual; Kollmorgen, 2016
- [4] Firemní materiály Xilinx: MicroBlaze Processor Reference Guide, UG081; Xilinx, 2012

Jméno a pracoviště vedoucí(ho) diplomové práce:

Ing. Ondřej Zoubek, katedra elektrických pohonů a trakce FEL

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

Datum zadání diplomové práce: **22.02.2017**

Termín odevzdání diplomové práce: **26.05.2017**

Platnost zadání diplomové práce: _____

Podpis vedoucí(ho) práce

Podpis vedoucí(ho) ústavu/katedry

Podpis děkana(ky)

III. PŘEVZETÍ ZADÁNÍ

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

Datum převzetí zadání

Podpis studenta

Prohlášení

Prohlašuji, že jsem předloženou práci vypracoval samostatně a uvedl jsem veškeré použité informační zdroje v souladu s Metodickým pokynem o dodržování etických principů při přípravě vysokoškolských závěrečných prací.

V Praze dne

Kuanysh Stikeyev

Poděkování

Děkuji vedoucímu této diplomové práce panu Ing. Ondřeji Zoubkovi, za odborné vedení práce, za cenné rady a připomínky. Dále bych chtěl poděkovat své rodině za plnou podporu při studiu.

Abstrakt

Tato diplomová práce se věnuje problematice řízení BLDC motoru pro statické testovací konstrukce. Práce je uvedena přehledem základních vlastností BLDC motorů, jejich konstrukce, princip činnosti a metody snímání polohy rotoru. Zároveň je zmíněn běžně používaný algoritmus pro řízení BLDC motorů – six-step komutace. Dále je v práci uveden detailní popis prvků testovací konstrukce a praktická realizace. Je zde proveden výpočet výkonové bilance pro transformaci pohybu z rotačního na translační a na výpočet kuličkového šroubu.

Klíčová slova

BLDC motor; snímání polohy rotoru; třífázový střídač; kuličkový šroub a matice; statická testovací konstrukce; rotační pohyb; translační pohyb

Abstract

This diploma thesis deals with the problematic of the Brushless DC motor control for static test structure. This work is presented with a summary of basic features of brushless DC motors, their construction, principles of operation and methods for the rotor position sensing. The control algorithm, which is commonly used for BLDC motors – six-step commutation is also mentioned. Further, there is a detailed description of the elements of the test structure. The theoretical part follows the practical realization, which is focused on calculating the power balance for the transformation of the rotary motion to linear and the calculation of the ball screw.

Key words

BLDC motor; rotor position sensing; three-phase convertor; ball screw and nut; static test structure; rotary motion; linear motion

Obsah

Úvod.....	8
1 BLDC motor.....	9
1.1 Princip BLDC motoru.....	9
1.2 Matematický model	10
1.2.1 Napěťové rovnice.....	11
1.2.2 Pohybová rovnice a moment BLDC motoru	12
2 Snímání polohy rotoru	14
2.1 Hallové senzory	14
2.2 Enkodéry.....	15
2.3 Resolvery	16
2.4 Bezsenzorové snímání	17
2.4.1 Metody vycházející z indukovaného napětí.....	17
2.4.2 Metody vycházející z matematického modelu.....	17
3 Třífázový napěťový střídač	19
3.1.1 Six-step komutace.....	19
4 Popis jednotlivých částí el. mech. konstrukce.....	21
4.1 BLDC servopohon	21
4.2 Advanced Kollmorgen Drive (AKD)	22
4.3 Řidičí jednotka.....	23
4.4 Kuličkový šroub a matice	24
4.4.1 Výpočet maximálních provozních otáček kuličkového šroubu	25
4.4.2 Výpočet maximální provozní rychlosti kuličkového šroubu	26
4.4.3 Výpočet provozního vzpěrného zatížení kuličkového šroubu	26
4.4.4 Krouticí moment a výkon na kuličkové matice	27
4.5 Siloměr.....	28
4.6 Výpočet momentu setrvačnosti rotující hmoty.....	28
5 Rotační a translační pohyb	30
5.1 Pohybová rovnice	30
5.1.1 Mechanická soustava konající rotační pohyb	30
5.1.2 Mechanická soustava konající translační pohyb.....	30
5.2 Redukce sil a hmotností	31
5.3 Výpočet mechanické soustavy testovací pracoviště	31

6	Realizace.....	35
6.1	HW.....	35
6.1.1	Mechanická část.....	35
6.1.2	Elektrická část.....	36
6.2	SW	37
6.2.1	Nastavení AKD.....	37
6.2.2	Program.....	39
	Závěr	43
	Seznam použité literatury	45
	Seznam obrázků.....	46
	Seznam příloh	48

Úvod

V poslední době se v oblasti elektrických pohonů stávají velké změny. S vývojem technologií dostáváme k dispozici nové konstrukce strojů. Bezkartáčové motory se stávají mnohem dostupnější a používají se ve více aplikacích. Je to dáno především dostupností složité výkonné elektroniky pro řízení těchto motorů. Hlavními výhodami bezkartáčových motorů jsou menší rozměry, tichý provoz, vysoká účinnost a dobré dynamické parametry.

V této diplomové práci se budu zabývat problematikou řízení BLDC motorů pro statické testovací konstrukce, které slouží k testování autosedaček. Cílem mé diplomové práce je zanalyzovat a navrhnout elektromechanickou testovací konstrukci. Statická testovací konstrukce je ve většině případů hydraulická, elektrický princip není běžný. Hlavní výhodou elektrického principu na rozdíl od hydraulického je že tato konstrukce je čistší, a možná i levnější.

Mým úkolem bude navrhnout elektromechanickou testovací konstrukci poháněnou BLDC servomotorem. Zvolený motor bude pohánět kuličkový šroub, který zajistí převod rotačního pohybu na pohyb translační. Dále budu potřebovat posoudit, jestli všechny elementy soustavy, které již máme k dispozici odpovídají teoretickým požadavkům, popřípadě jaké mají omezení a jaké řízení je potřeba.

V první polovině této diplomové práce se popíše obecná teorie BLDC motorů z pohledu konstrukce, principu, vlastností a parametrů. Z pohledu řízení bezkartáčových motorů je nezbytností znalost polohy rotoru stroje. Tuto informaci poskytují buď vhodné snímače, nebo bezsenzorové metody detekce aktuální polohy rotoru.

Ve druhé polovině této diplomové práce se popisují jednotlivé části elektromechanické konstrukce, provádí se teoretické výpočty konstrukce a zkoušky různých vstupních parametrů. Poslední kapitola je věnována realizaci.

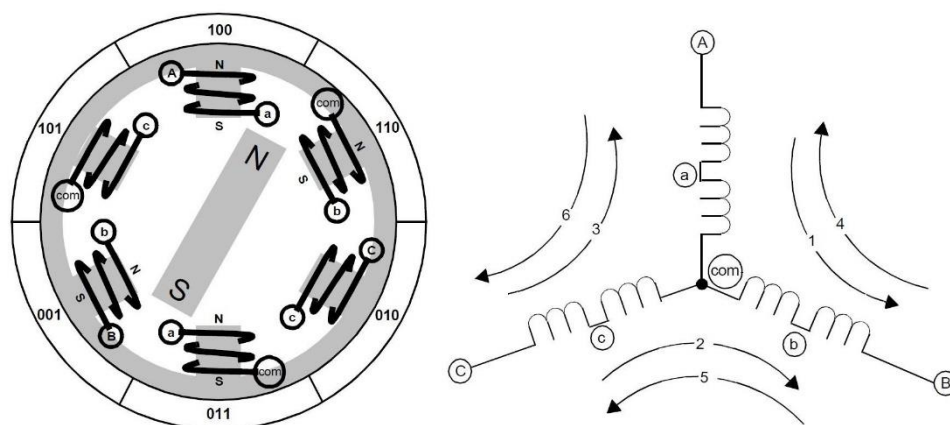
1 BLDC motor

BLDC (brushless DC) motor je bezkartáčový synchronní stroj s permanentními magnety. BLDC motor využívá stejnosměrné napájení a komutace se provádí elektronicky pomocí napěťového střídače. Spínací impulzy pro řízení napěťového střídače obstarává řídicí jednotka, která běžně bývá součástí střídače.

1.1 Princip BLDC motoru

Na obrázku Obrázek 1. je znázorněna zjednodušená konstrukce BLDC motoru. Rotor je tvořen permanentním magnetem, který vytváří konstantní magnetické pole ve vzduchové mezeře. Rotor je zde pro jednoduchost znázorněn jako nejjednodušší možný případ, tedy dvoupólový. Běžně se používají rotory čtyř i více pólové. Vzhledem k tomu, že výsledný točivý moment je přímo úměrný hustotě magnetického toku \vec{B} , používají se magnety ze vzácných zemin jako Neodym. Stator je tvořen plechy z elektrotechnické oceli, na kterém je navinuto statorové vinutí. Vinutí se provádí v jednofázovém, 2 fázovém a 3 fázovém provedení. Většina BLDC motorů s třífázovou topologií má vinutí zapojené do hvězdy.

Elektrická energie je převáděna na mechanickou energii prostřednictvím přitažlivé magnetické síly mezi permanentními magnety na rotoru a rotujícím magnetickým polem vytvářeným ve vinutích na pólech statoru.



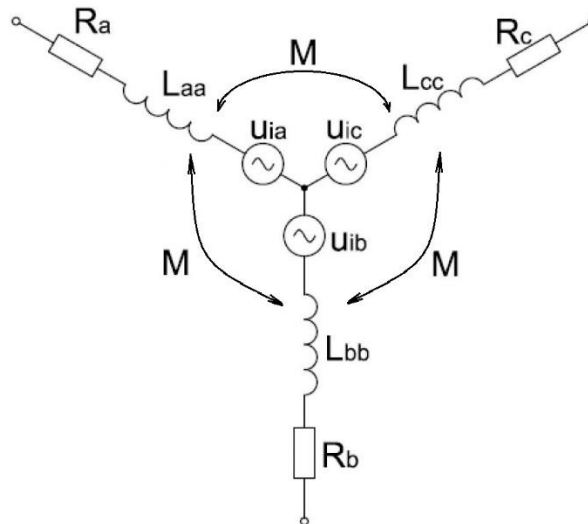
Obrázek 1. Zjednodušená konstrukce BLDC motoru.
Zdroj: [1]

Na obrázku výše jsou 3 statorové vinutí zapojeny do hvězdy a indukují rotující magnetické pole. Rotor s permanentními magnety je unášen tímto polem. V případě six – step komutace (viz 3.1.1) jsou v jednom časovém okamžiku vždy napájeny

pouze 2 vinutí statoru. Zbývající třetí vinutí je v tu danou chvíli není připojeno. Rotační pohyb magnetického pole statoru je dosažen postupným přepínáním stavů (napětových vektorů) 1 až 6 znázorněných na obrázku Obrázek 1 vpravo. [1][2]

1.2 Matematický model

Matematický model vychází z náhradního schématu BLDC motoru, viz obrázek 2.



Obrázek 2. Náhradní schéma BLDC motoru
Zdroj: [3], upraveno autorem

Matematický model představuje soustavu diferenciálních rovnic. Pro lepší názornost zavedeme následující zjednodušující podmínky:

- stroj je symetrický a vinutí statoru je zapojeno do hvězdy
- vinutí statoru je souměrné (tj. stejné odpory a indukčnosti všech fází statoru)

$$R_a = R_b = R_c = R$$

$$L_{aa} = L_{bb} = L_{cc} = L$$

$$L_{ab} = L_{ac} = L_{bc} = M$$

- zanedbáváme ztráty v železe
- zanedbáváme sycení magnetických obvodů
- vzduchová mezera je konstantní (zanedbáváme drážkování)
- vliv teploty není uvažován

1.2.1 Napěťové rovnice

Napětí každé fázi je dáno následujícími rovnicemi:

$$u_a = R \cdot i_a + \frac{d\Psi_a}{dt} + u_{ia}$$

$$u_b = R \cdot i_b + \frac{d\Psi_b}{dt} + u_{ib}$$

$$u_c = R \cdot i_c + \frac{d\Psi_c}{dt} + u_{ic}$$

- Kde u_a, u_b, u_c – napětí na jednotlivých fázích motoru
 i_a, i_b, i_c – proudy jednotlivými fázemi motoru
 Ψ_a, Ψ_b, Ψ_c – spřažené magnetické toky ve fázích
 R_a, R_b, R_c – odpory fází
 L_{aa}, L_{bb}, L_{cc} – vlastní indukčnosti jednotlivých fází
 L_{ab}, L_{bc}, L_{ca} – vzájemné indukčnosti mezi fázemi
 u_{ia}, u_{ib}, u_{ic} – indukované napětí ve fázích

Pro spřažené magnetické toky pak platí:

$$\Psi_a = L \cdot i_a + M \cdot i_b + M \cdot i_c$$

$$\Psi_b = L \cdot i_b + M \cdot i_a + M \cdot i_c$$

$$\Psi_c = L \cdot i_c + M \cdot i_a + M \cdot i_b$$

Dle proudového Kirchhoffova zákona pro symetrický stroj platí:

$$i_a + i_b + i_c = 0$$

Dosazením do napěťových rovnic za spřažené magnetické toky a uplatněním Kirchhoffova zákona

$$u_a = R \cdot i_a + \frac{d}{dt}(L \cdot i_a + M(i_b + i_c)) + u_{ia} = R \cdot i_a + \frac{d}{dt}(L \cdot i_a + M(-i_a)) + u_{ia}$$

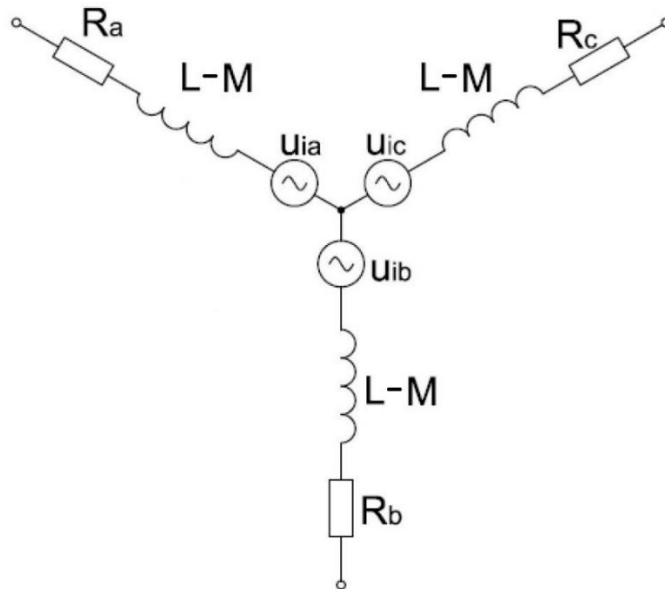
Dostaneme výsledné napěťové rovnice:

$$u_a = R \cdot i_a + (L - M) \frac{di_a}{dt} + u_{ia}$$

$$u_b = R \cdot i_b + (L - M) \frac{di_b}{dt} + u_{ib}$$

$$u_c = R \cdot i_c + (L - M) \frac{di_c}{dt} + u_{ic}$$

Těmto rovnicím odpovídá zjednodušené náhradní schéma BLDC motoru na obrázku 3.



Obrázek 3. Zjednodušené náhradní schéma BLDC motoru.
Zdroj: [3], upraveno autorem

Pro indukované napětí platí

$$u_i = k_e \cdot \omega_m$$

kde k_e – napěťová konstanta stroje

1.2.2 Pohybová rovnice a moment BLDC motoru

Elektromagnetický moment BLDC motoru je závislý na okamžité mechanické úhlové rychlosti otáčení motoru a výkonu přenášeného přes vzduchovou mezeru.

$$M_{ik} = \frac{P_{\delta k}}{\omega_m} = \frac{u_{ik} \cdot i_k}{\omega_m}, \quad k = a, b, c$$

Celkový elektromagnetický moment stroje je dán součtem momentů generovaných jednotlivými fázemi:

$$M_i = \frac{u_{ia} \cdot i_a + u_{ib} \cdot i_b + u_{ic} \cdot i_c}{\omega_m}$$

- Kde
- M_i – vnitřní elektromagnetický moment stroje
 - P_{δ} – výkon ve vzduchové mezeře
 - ω_m – mechanická úhlová rychlost stroje, $\omega_m = \omega \cdot p$
 - ω – elektrická úhlová rychlost stroje
 - p – počet pólových dvojic (pól párů) stroje

Vztah mezi elektrickým výkonem a mechanickým výkonem je popsán rovnicí

$$P_e = u_i \cdot i = P_m = M_i \cdot \omega_m$$

Pak elektromagnetický moment M_i je přímo úměrný proudu, který odebírá stroj

$$M_i = k_m \cdot i$$

kde k_m – momentová konstanta stroje

Vztah mezi napěťovou a momentovou konstantou stroje je stejný pro všechny stroje

$$k_e \cdot k_m = 1$$

Pohybová rovnice

$$M_i = M_z + J \frac{d\omega_m}{dt}$$

kde M_z – zátěžný moment včetně mechanických ztrát

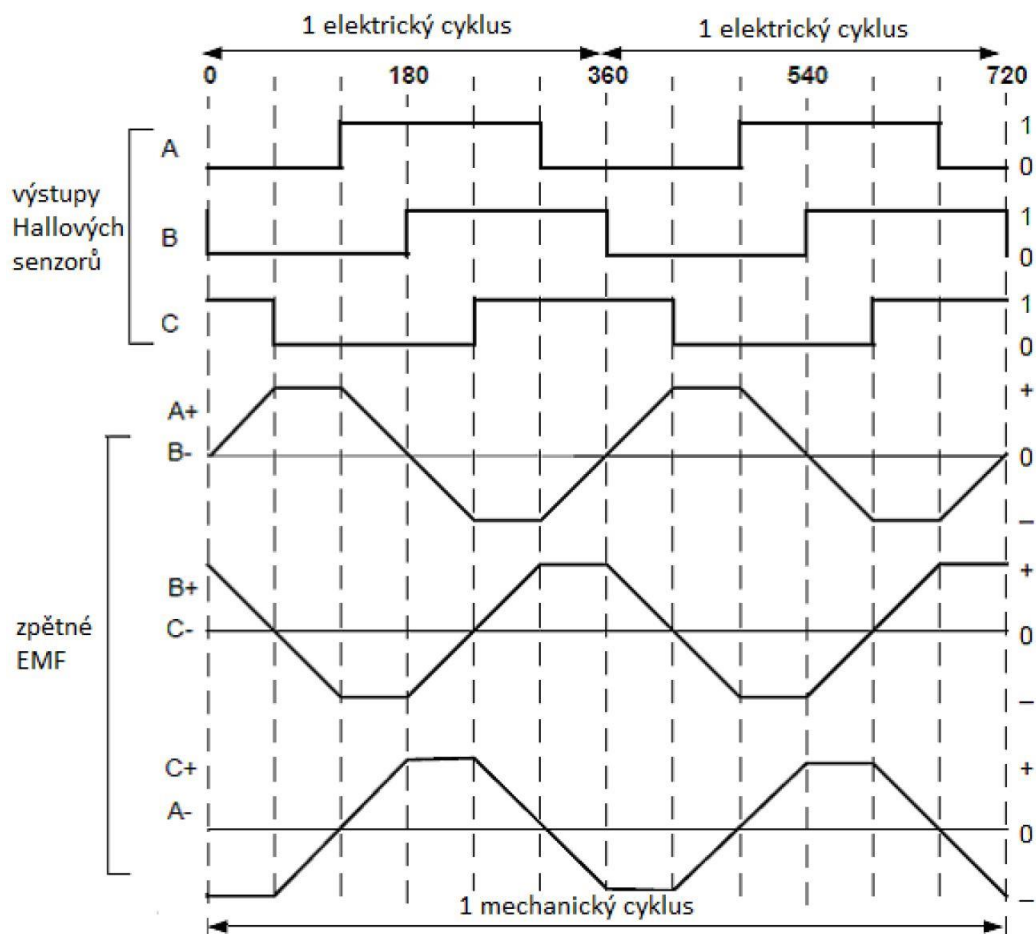
J – moment setrvačnosti stroje

2 Snímání polohy rotoru

BLDC motor na rozdíl od klasického stejnosměrného motoru nemá mechanický komutátor. Komutaci tedy zajišťuje střídač cestou přivedení DC napětí na vhodné fázi ve správný okamžik. Znalost okamžité polohy rotoru je klíčovým bodem pro provádění komutace a dosažení maximálního točivého momentu. Největšího točivého momentu lze dosáhnout v případě, že vytvářena vinutím statoru a permanentními magnety na rotoru magnetická pole budou vůči sobě posunuta o 90° .

2.1 Hallové senzory

Klasickým řešením polohování rotoru jsou 3 Hallové snímače zabudované do statoru. Tyto senzory využívají Hallův jev, při kterém je měřeno tzv. Hallovo napětí vznikající na tenké polovodičové destičce protékané proudem a vložené do magnetického pole. Senzory snímají okolní magnetické pole a jejich výstupní signál je 180° elektrických ve vysoké úrovni, a v dalších 180° elektrických v nízké. Mezi sebou jsou signály fázově posunuty o 120° elektrických. [2]



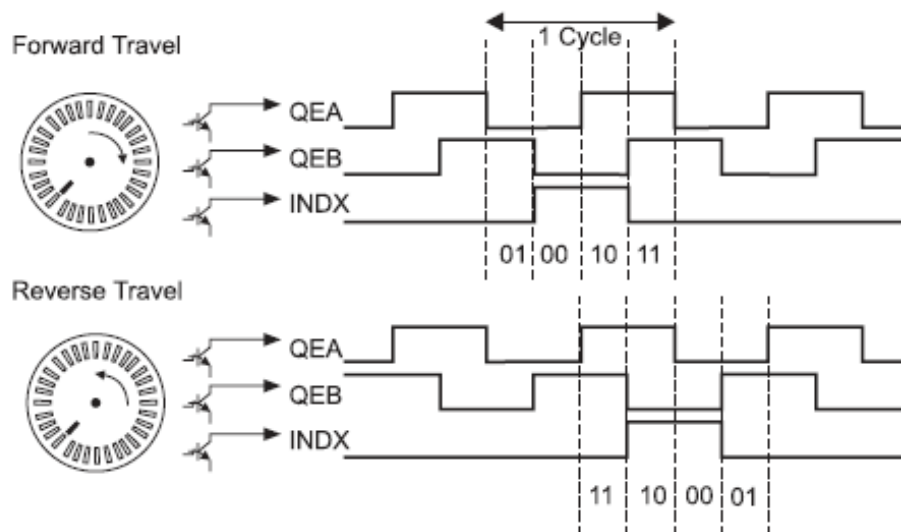
Obrázek 4. Signály z Hallových senzorů a průběhy zpětného EMF
Zdroj: [2], upraveno autorem

2.2 Enkodéry

Tyto snímače se v zásadě rozdělují na dvě základní skupiny – absolutní a inkrementální enkodéry. Jedná se zpravidla o optická snímací zařízení, obsahující zdroj světla a fotodetektor. Mezi zdrojem a přijímačem je vložen pulzní disk s otvory (viz. Obrázek 5 vlevo), který je mechanický spojen s hřídelí.

Inkrementální enkodér generuje data o poloze objektu prostřednictvím elektrických impulzů. Počet impulzů na jednu otáčku je hlavním parametrem charakterizujícím inkrementální enkodéry. Impulzy vznikají pouze v případě, když se hřídel otáčí. Poloha rotoru je pak určována čítáním výstupních pulsů enkodéru.

Standardem jsou snímače 3-kanálové. Signály dvou kanálů jsou vzájemně posunuty o 90°, což umožňuje rozpoznat směr otáčení. V průběhu jedné periody je pak možné detektovat náběžnou a sestupnou hranu kvadrurních signálů A a B, a tím pádem dosáhnout čtyřikrát vyššího rozlišení snímače. Třetí kanál generuje puls jednou za otáčku a zpravidla se nazývá “nulovým pulsem” (viz. Obrázek 5).



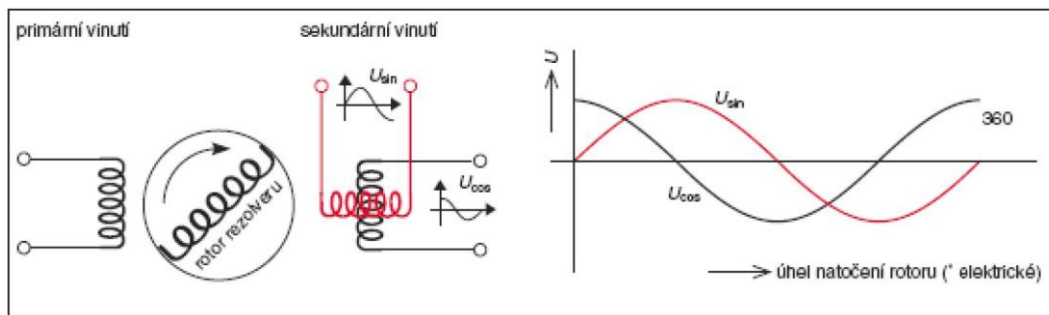
Obrázek 5. Výstupní signály inkrementálního čidla.
Zdroj: [4]

Absolutní otáčková čidla poskytují data o počtu otáček, úhlu a poloze hřídele pomocí unikátních kódů odpovídajících každému kroku. Počet unikátních kódů na jednu otáčku a počet otáček jsou základními charakteristikami daného typu zařízení. Počáteční nastavení čidla není nutné, protože absolutní poloha se určuje unikátním kódem. Existují jednootáčkové a víceotáčkové modely daného typu čidla. Jelikož absolutní

enkodér nepracuje na bázi prostého čítání impulsů, nedojde na rozdíl od inkrementálního typu ke ztrátě informace o poloze v případě výpadku napájení. [4]

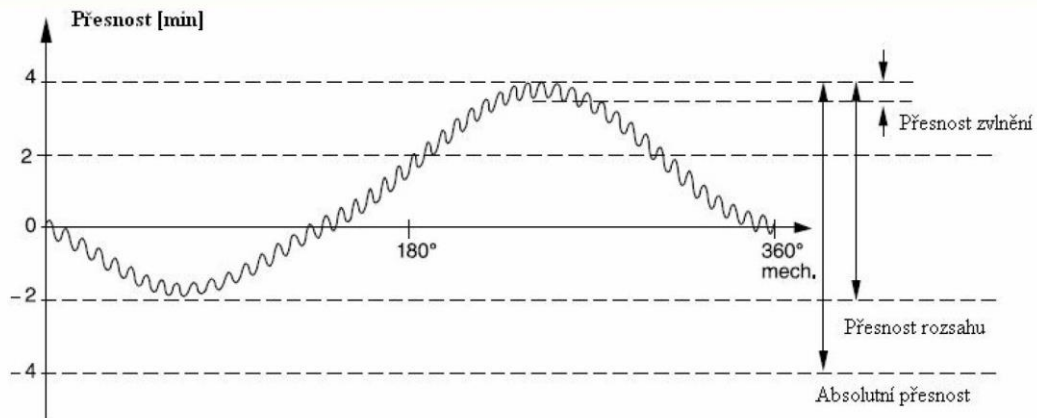
2.3 Resolvery

Jedná se o rotační elektromechanický transformátor, jehož výstupem jsou dvě harmonická napětí vzájemně posunutá o 90° . Resolver se skládá z primárního pohyblivého vinutí a dvou sekundárních vinutí svírajících pravý úhel. Primární vinutí je buzeno střídavým napětím, a v závislosti na jeho poloze jsou napětí indukována do sekundárních cívek. Tato napětí jsou funkcemi sinus a cosinus, a vyhodnocením jejich amplitud lze získat aktuální polohu rotoru. Rychlost otáčení je dána periodou těchto napětí a směr otáčení lze určit ze vzájemné polohy indukovaných napětí. [4]



Obrázek 6. Resolver a řídicí průběhy sinusových signálů. Zdroj: [5]

Přesnost resolveru je definována jako rozdíl mezi elektrickým úhlem indukovaných elektrických napětí na sekundárním vinutí a mechanickým úhlem nebo úhlovou pozicí rotoru. Výrobci resolverů udávají ve svých katalozích různé druhy přesnosti, nejčastější jsou zejména absolutní přesnost (accuracy absolute), přesnost rozsahu (accuracy spread) a přesnost zvlnění (accuracy ripple). Jednotlivé přesnosti jsou vidět na obrázku 7. Absolutní přesnost a přesnost rozsahu jsou způsobeny vnitřní chybou resolveru a montážní chybou. Přesnost zvlnění má velký efekt na stabilitu otáček při nízkých rychlostech. Novější resolvery mají přesnost zvlnění menší než 1 úhlová minuta. [5]



Obrázek 7. Jednotlivé přesnosti resolveru. Zdroj: [5]

2.4 Bezsenzorové snímání

Metody bezsenzorových snímání polohy jsou založeny na měření elektrických nebo magnetických veličin.

2.4.1 Metody vycházející z indukovaného napětí

Polohu rotoru lze určit snímáním indukovaného napětí na nespojené svorce během jednoho kroku komutace. Hlavní výhodou při takovémto snímání polohy je cena, ale existují také i nevýhody:

- Motor se musí pohybovat s minimální rychlostí, aby generoval dostatečné indukované napětí
- Náhlé změny zatížení motoru mohou způsobit nestabilitu řídicí smyčky.
- Měření indukovaného napětí lze měřit pouze v případě, když otáčky pohonu jsou v určitém rozsahu ideální komutační rychlosti
- Pokud komutace bude probíhat rychleji než ideální rychlost, odezva motoru bude představovat nespojitý signál.

2.4.2 Metody vycházející z matematického modelu

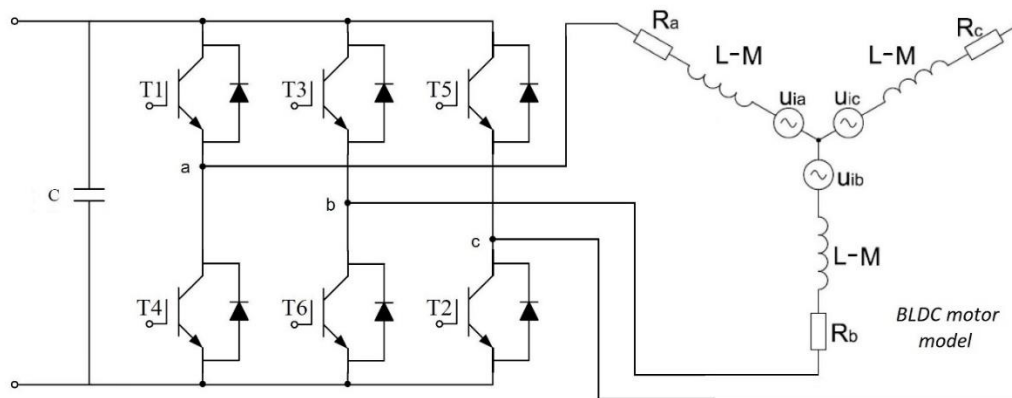
Určení polohy pomocí matematického modelu motoru je možné pomocí sledování spřaženého magnetického toku od permanentního magnetu. Určení spřaženého magnetického toku vyžaduje znalost fázových napětí na svorkách motoru a fázových proudů protékajících motorem. Z magnetického toku lze určit polohu rotoru, popřípadně vhodný komutační okamžik. Stejně jako metody založené na sledování indukovaného napětí motoru, vykazuje i tato metoda značnou chybu při nízkých rychlostech.

Pokud vaším hlavním kritériem pro rozhodnutí je cena a motor by neměl být provozován v nízkých otáčkách a zároveň se neočekávají rychlé změny zatížení, lepší volbou pro vaši aplikaci je bezsenzorové řízení. [1]

3 Třífázový napěťový střídač

Třífázový napěťový střídač je měnič napětí, který slouží k napájení třífázové zátěže střídavým napětím s proměnnou amplitudou a frekvencí. Na vstupní stranu střídače je připojeno stejnosměrné napětí, které může být generováno usměrňovačem nebo pulzním měničem s kondenzátorovou baterií.

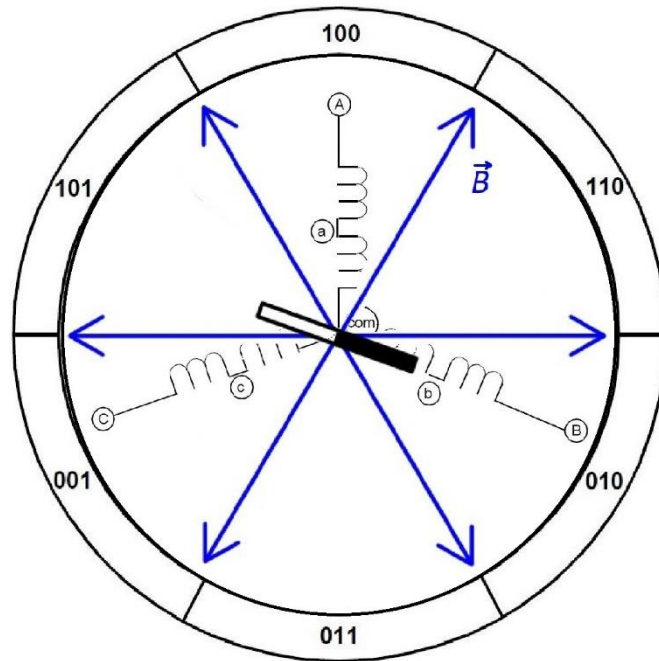
Třífázový střídač (viz obrázek 8) se skládá ze tří větví. V každé větvi jsou dva tranzistory a dvě diody. Nejčastěji používané tranzistory mají typ MOSFET nebo IGBT. Každá dioda je zapouzdřena se svým tranzistorem pro eliminaci teplotního rozdílu a následného vlivu na jejich spolupráce. Střední větvi trojfázového střídače tvoří jednotlivé fáze pro napájení vinutí motoru. Signály pro sepnutí tranzistorů jsou přiváděny z řídicího procesoru.



Obrázek 8. Schéma třífázového střídače se zátěží
Zdroj: [3]

3.1.1 Six-step komutace

Nejjednodušší metoda řízení BLDC motoru je six-step komutace. V jednom okamžiku proud vždy protéká pouze dvěma fázemi a třetí fáze je odpojena. Pro snímání polohy rotoru jsou nejčastěji použity Hallové senzory, případně metoda bezsenzorového snímání. V každém komutačním kroku vzniká na statoru vektor magnetického pole, ke kterému se zarovná rotor, viz Obrázek 9.



Obrázek 9. Vektor magnetického pole statoru
Zdroj: [1], upraveno autorem

Jak plyne z názvu metody, existuje jen 6 možných poloh vektoru magnetického pole, což vyvolává zvlnění momentu, které se projevuje především při nízkých otáčkách motoru. Pro eliminaci tohoto jevu v reálném motoru je na rotoru víc než jeden magnet.

Pro mechanické otáčky pak platí: $n_m = n * p$, kde p je počet pólových dvojic, tj. magnetů, n jsou elektrické otáčky. Metoda six-step komutace je nejčastěji používána v nenáročných aplikacích vyžadujících pouze jednoduché zpětnovazební řízení, u kterých zmíněné kolísání momentu není překážkou. Stavů snímačů v závislosti na poloze rotoru jsou na obrázku 9 vypsány pro každou vyseč. Jednotlivým kombinacím odpovídá připojení napětí dle tabulky 1. Proud motoru může být během komutačních kroků udržován pomocí regulátoru.

krok	Fáze A	Fáze B	Fáze C	Senzor A	Senzor B	Senzor C
1	- Ud	+ Ud	NC	1	0	0
2	NC	+ Ud	- Ud	1	0	1
3	+ Ud	NC	- Ud	0	0	1
4	+ Ud	- Ud	NC	0	1	1
5	NC	- Ud	+ Ud	0	1	0
6	- Ud	NC	+ Ud	1	1	0

Tabulka 1. Tabulka komutačních kroků six-step

4 Popis jednotlivých částí el. mech. konstrukce

V dané kapitole popisují jednotlivé části elektromechanické konstrukce, jejich funkce a základní parametry. A také provádím potřebné výpočty spojené s nimi.

4.1 BLDC servopohon

Má diplomová práce je zaměřena na práci s BLDC servomotorem řady TGN4 od české společnosti TG Drives. Táto řada je známá svými zvláštními parametry. Tenká vrstva magnetů ze vzácných zemin neodym/železo/bór je umístěna na povrchu rotorové hřídele, čímž je dosažen malý moment setrvačnosti motoru. Vyšší krouticí moment, tedy i vyšší výkon motorů nové řady TGN je dosažen zlepšením odvodu tepla ze statoru motoru do přední příruby spolu s optimalizovaným magnetickým obvodem. Zkrácení statorových svazků použitím segmentového vinutí spolu s dosažením vyššího plnění vinutí má za důsledek zkrácení délky celého motoru. Uvedené přednosti zvyšují poměr krouticího momentu k zastavěnému objemu servomotoru a rozšiřují oblasti použití z konstrukčního hlediska. To jsou 10 pólové stroje s rozsahem momentů 0,28–60 Nm. Optimální nasazení těchto motorů je pro aplikace vyžadující velkou rovnoměrnost chodu při nízkých otáčkách a při požadavku na co nejmenší rozměry motoru. Motory TGN jsou dodávány s různými snímači polohy. Standardně jsou motory vybaveny resolverem pro běžné aplikace a snímačem EnDat, Hiperface nebo Comcoder pro velmi přesné aplikace. [6]



Obrázek 10. Servomotory řady TGN4-0510

K dispozici jsem měl pohon s úplným názvem TGN4-0510-30-320. Parametry motoru jsou uvedeny v tabulce níže. Úplná tabulka s parametry a momentová charakteristika se dá najít v příloze č.1.

Parametr		Jednotka	TGN4-0510
Jmenovité napětí	U_N	V=	320
Jmenovitý moment	M_N	Nm	4,2
Maximální moment	M_{max}	Nm	15,3
Jmenovitý výkon	P_N	W	1319
Jmenovitý proud	I_N	A	7,01
Maximální proud	I_{max}	A	31
Vlastní moment setrvačnosti	J	kgcm ²	2,04

Tabulka 2. Parametry motoru TGN4-0510

4.2 Advanced Kollmorgen Drive (AKD)

Digitální servozsilovače (střídač) AKD jsou určeny pro řízení synchronních rotačních a lineárních servomotorů. Servozsilovače jsou vybaveny vstupy pro komunikaci s mnoha druhy snímačů polohy, což nabízí cenově optimální řešení z hlediska použitého zpětnovazebního snímače i aplikace servopohonu.

Digitální servozsilovače AKD jsou navrženy pro snadné připojení k různým řídicím systémům, a tím jsou využitelné v mnoha aplikacích. Podle náročnosti aplikace, použitého řídicího systému a jeho rozhraní pro řízení servopohonů lze využít integrované pohybové funkce nebo použít pouze základní funkce regulačních smyček.



Obrázek 11. Digitální servozsilovač AKD řady P01206

Pro řízení momentu nebo otáček je AKD vybaveno analogovým vstupem, v rozsahu ± 10 V. Pro další potřeby můžou být využity digitální vstupy a výstupy. Další možnost, jak provést řízení je pomocí komunikačních rozhraní CAN, EtherCAT, Profinet a Ethernet IP. Pro servisní účely, nastavení parametrů atd., se k AKD dá připojit přes Modbus TCP/IP. Pro polohování rotoru k AKD lze připojit resolver, snímač se signály sincos, nebo inkrementální snímač. Také lze připojit dva snímače současně (např. resolver a inkrementální snímač). Součástí AKD je také digitální proudová, rychlostní a polohová regulační smyčka zajišťující vysokou dynamiku pohonu a opakovatelnost nastavených pracovních pohybů. 1,5MHz proudová smyčka a 16kHz rychlostní smyčky nabízejí vysokou regulační odezvu a výkon. [7]

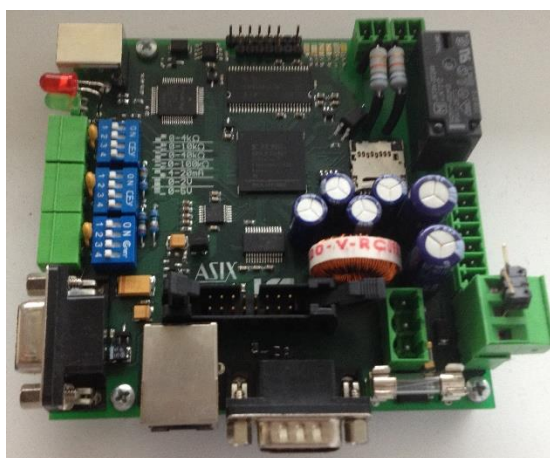
Pracoval jsem s digitálním servozesilovačem AKD-P01206. Hlavní parametry jsou v následující tabulce (úplná tabulka viz. příloha č.2).

Parametr	Jednotka	AKD-P01206
Jmenovité napětí	V \sim	3x108–264 V / 50–60 Hz 1x108-264 V / 50–60 Hz
Jmenovitý zdánlivý výkon	kVA	3,82
Jmenovitý proud (± 3 %)	Aef	12
Maximální proud (max. 5s, ± 3 %)	Aef	30

Tabulka 3. Parametry AKD-P01206.

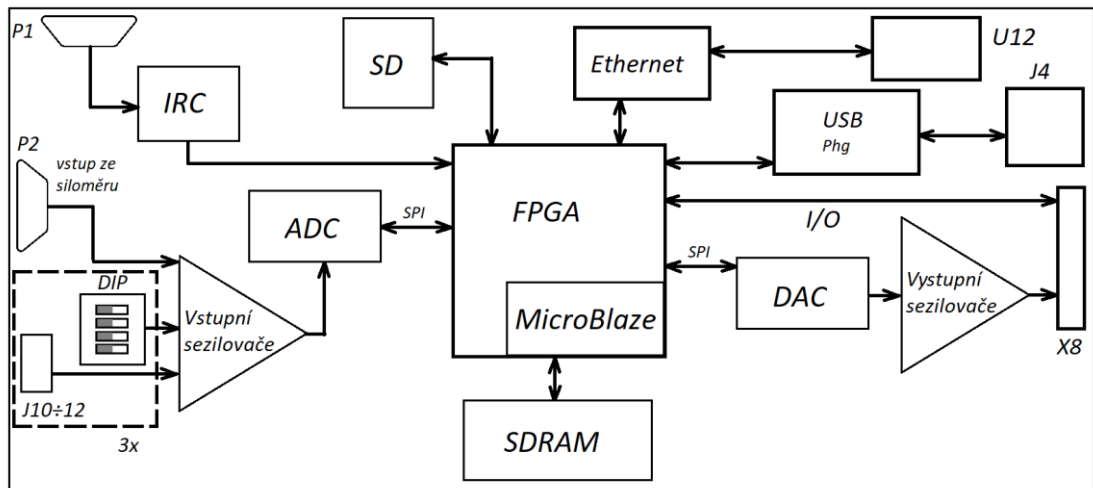
4.3 Řidiči jednotka

Do řídicí jednotky bude implementován řídicí algoritmus. Řídicí jednotka je realizována na FPGA generace Spartan 3 se soft mikroprocesorem MicroBlaze od firmy Xilinx.



Obrázek 12. Řídicí jednotka se soft procesorem
Zdroj: vlastní zpracování

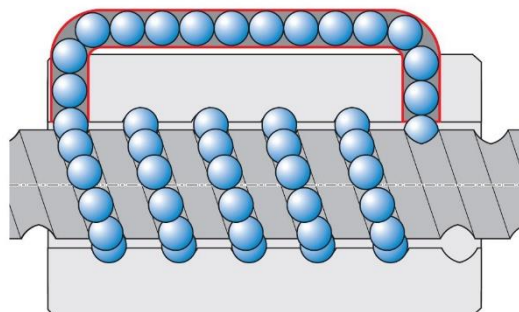
Deska plošného spoje byla přímo navržena pro tento projekt a obsahuje veškeré potřebné periferie, např. AD a DA převodníky, analogové a digitální vstupy/výstupy, slot na SD kartu, Ethernet a USB rozhraní. Blokové schéma desky plošného spoje se základními periferiemi je na obrázku 13. Osazovací plán desky plošného spoje je v příloze č.5.



Obrázek 13. Blokové schéma řídicí jednotky se soft procesorem
Zdroj: vlastní zpracování

4.4 Kuličkový šroub a matice

Kuličkový šroub je konstrukční prvek pohybových ústrojí, který převádí rotační pohyb na přímočarý pohyb. V drážce mezi hřídelí a maticí se pohybují kuličky, které vyvolávají lineární pohyb. Převod kuliček je zajištěn integrovanou recirkulací (viz obrázek 14). U této recirkulace je vývrt uvnitř po celé délce matice, kterým se vracejí kuličky zpět do funkčních závitů šroubu pod maticí. Tento vývrt společně s funkčními závitů tvoří uzavřený okruh.



Obrázek 14. Integrovaná recirkulace Zdroj: [9]

Kuličkový šroub a matice typu RSU od firmy GTEN Ball Screw Technology byl zvolen kvůli nízkému skluzu a malým rozměrům, na dobu objednání tohoto kuličkového šroubu. Požadavek na rozměr vyplývá z potřeby zmenšení momentu setrvačnosti a lepší dynamiky celkově.

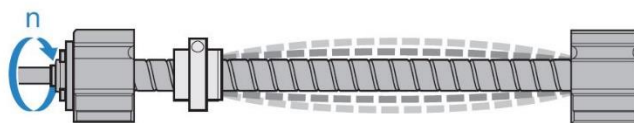
Parametry kuličkového šroubu jsou následující: jmenovitý průměr šroubu je 20 mm (průměr šroubu mezi středy kuliček), jednochodý závit, stoupání závitu šroubu je 5 mm, délka šroubu je 200 mm. Další rozměry a technické vlastnosti kuličkového šroubu jsou v příloze č.3.



Obrázek 15. Kuličkový šroub a matice. Zdroj: [10]

4.4.1 Výpočet maximálních provozních otáček kuličkového šroubu

Maximální provozní otáčky se počítají z důvodu zamezení vzniku nebezpečného rozkmitu kuličkového šroubu (viz obrázek 16), při kterém by došlo k deformaci stoupání závitu a tím k nevratným změnám na celém systému kuličkového šroubu s maticí.



Obrázek 16. Nebezpečný rozkmit kuličkového šroubu vlivem kritických otáček
Zdroj: [9]

Kritické otáčky jsou v podstatě ekvivalentem první vlastní rezonanční frekvence kuličkového šroubu, proto jsou kritické otáčky násobeny zmenšujícím koeficientem pro určení maximálních provozních otáček, aby se dalo vyhnout výše zmíněným problémům. [8]

Kritické otáčky kuličkového šroubu: (viz [9])

$$n_k = f_{nk} \cdot \frac{d_2}{l_n} \cdot 10^7$$

$$n_k = 4,3 \cdot \frac{17,5}{200^2} \cdot 10^7 = 18812 \text{ ot/min}$$

- kde n_k kritické otáčky kuličkového šroubu [ot/min]
 f_{nk} koeficient jako funkce koncových ložisek (viz [9], str.5-27) [-]
 d_2 malý průměr závitu kuličkového šroubu [mm]
 l_n maximální nepodepřená délka kuličkového šroubu [mm]

Maximální provozní otáčky kuličkového šroubu: (viz [9])

$$n_{kperm} = n_k \cdot 0,8$$

$$n_{kperm} = 18812 \cdot 0,8 = 15050 \text{ ot/min}$$

- kde: n_{kperm} maximální provozní otáčky kuličkového šroubu [ot/min]

4.4.2 Vypočet maximální provozní rychlosti kuličkového šroubu

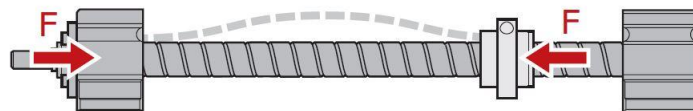
$$v_{max} = \frac{n_{kperm} \cdot P}{60000}$$

$$v_{max} = \frac{15050 \cdot 5}{60000} = 1,25 \text{ m/s}$$

- kde: v_{max} maximální provozní rychlost kuličkového šroubu [m/s]
 P stoupání (rozteč) závitu kuličkového šroubu [mm]

4.4.3 Výpočet provozního vzpěrného zatížení kuličkového šroubu

Jedná se o maximální axiální zatížení kuličkového šroubu v závislosti na jeho vzpěrné tuhosti. Výpočet se provádí z důvodu zamezení vzniku deformace šroubu (viz obrázek 17), ke které by došlo při překročení vzpěrné tuhosti šroubu.



Obrázek 17. Nebezpečné axiální vzpěrné zatížení kuličkového šroubu.
Zdroj: [9]

Maximální provozní vzpěrné zatížení se vypočítá podělením kritického vzpěrného zatížení vzpěrným bezpečnostním faktorem závislým na vlastnostech kuličkového šroubu a jiných doprovodných faktorech (opotřebení, vznik lomu, vznik kolize při rychlém posuvu apod.). [8]

Kritické vzpěrné zatížení kuličkového šroubu: (viz [9])

$$F_k = f_{Fk} \cdot \frac{d_2^4}{l_k^2} \cdot 10^4$$

$$F_k = 2,6 \cdot \frac{17,5^4}{200^2} \cdot 10^4 = 60963 \text{ N}$$

- kde F_k teoretické vzpěrné zatížení kuličkového šroubu [N]
 f_{Fk} koeficient jako funkce koncových ložisek (viz [9], str.5-28) [-]
 d_2 malý průměr závitu kuličkového šroubu [mm]
 l_k efektivní vzpěrná délka kuličkového šroubu [mm]

Maximální provozní vzpěrné zatížení kuličkového šroubu: (viz [9])

Volím $k_{vz} = 5$ - vzpěrný bezpečnostní faktor (je dán výrobcem), ve kterém je zahrnuto opotřebení částí kuličkového šroubu a matice, zadření kuliček nebo vznik kolize při rychloposuvovém módu.

$$F_{kperm} = \frac{F_k}{k_{vz}}$$

$$F_{kperm} = \frac{60963}{5} = 12193 \text{ N}$$

- kde F_{kperm} maximální provozní vzpěrné zatížení kuličkového šroubu [N]
 k_{vz} vzpěrný bezpečnostní faktor [-]

4.4.4 Kroucí moment a výkon na kuličkové matice

Kroucí moment na kuličkové matice: (viz [9])

Je to minimální kroucí moment, který by měl poskytovat motor, aby byl schopen pohanět lineární jednotku.

$$M_{ta} = \frac{F \cdot P}{2000 \cdot \pi \cdot \eta}$$

- kde: M_{ta} provozní kroucí moment [Nm]
 F provozní zatížení [N]
 P stoupání (rozteč) závitu kuličkového šroubu [mm]
 η mechanická účinnost pro převod rotačního pohybu na lineární [-]

Teoretický výkon: (viz [9])

Je to minimální výkon, který by měl poskytovat motor pro to, aby byl schopen pohánět lineární jednotku.

$$P_a = \frac{M_{ta} \cdot n_{kperm}}{9550}$$

kde: P_a provozní výkon [kW]

n_{kperm} maximální provozní otáčky kuličkového šroubu [ot/min]

4.5 Siloměr

Siloměr je z řady UM od korejského výrobce DACELL. Tato řada se vyznačuje malými rozměry a hmotností. Měření je prováděno pomocí měřicího můstku, proto máme 4 vývody: 2 jsou napájecí, 2 – signálové. Siloměr je připojen do analogového vstupu řídicí jednotky.



Obrázek 18. Siloměr UM-T1. Zdroj: [11]

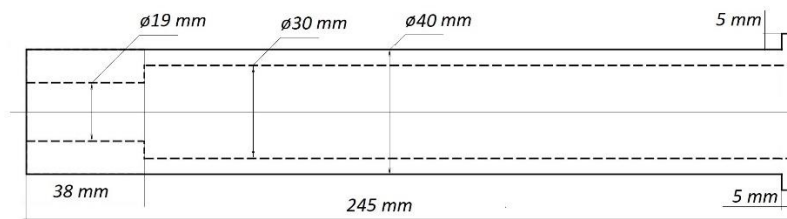
Model	UM-T1
Rozsah	1 tf (9,807 kN)

Tabulka 4 Parametry siloměru UM-T1. Zdroj: [11]

Úplná tabulka s parametry je v příloze č.4.

4.6 Výpočet momentu setrvačnosti rotující hmoty

Hřídel pohonu a matice jsou mechanicky propojeny součástkou, která představuje dutý válec. Z jedné strany je závit pro zašroubování matice, z druhé je vysoustružen otvor pro nasazení na rotor motoru (viz. obrázek 19). Moment setrvačnosti pro tuto spojku vypočítám jako součet její dílčích částí, představujících duté válce s různými poloměry.

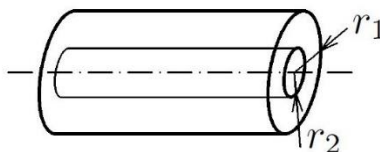


Obrázek 19. Nákres spojky motoru a matice.

Zdroj: vlastní zpracování

Moment setrvačnosti dutého válce se vypočítá dle následujícího vzorce:

$$J = m (r_1^2 + r_2^2)$$



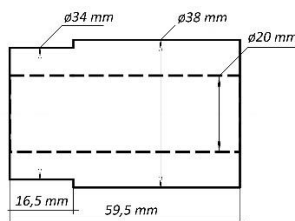
Obrázek 20. Dutý válec. Zdroj: vlastní zpracování

Hmotnost dílčích částí bude odhadnuta z příslušného objemu a hustoty oceli.

$$J_k = \pi \cdot l_k \cdot (r_{1k}^2 - r_{2k}^2) \cdot \rho_{oceli} \cdot (r_{1k}^2 + r_{2k}^2)$$

$$J_{souč.} = \sum J_k = 3,64 \text{ kg} \cdot \text{cm}^2$$

Do výsledné hodnoty momentu setrvačnosti musíme také přičíst moment setrvačnosti matice od kuličkového šroubu.



Obrázek 21. Nákres matice od kuličkového šroubu.

Zdroj: vlastní zpracování

Analogickým způsobem dostáváme:

$$J_{matice} = 0,72 \text{ kg} \cdot \text{cm}^2$$

Celkový moment setrvačnosti rotující hmoty:

$$J_{rh} = J_{souč.} + J_{matice} = 3,64 + 0,72 = 4,36 \text{ kg} \cdot \text{cm}^2$$

5 Rotační a translační pohyb

5.1 Pohybová rovnice

5.1.1 Mechanická soustava konající rotační pohyb

$$\sum_{i=1}^n M_i + M_d = 0$$

M_i hnací a zátěžné momenty

M_d dynamický moment

$$M_d = \frac{d}{dt}(J \cdot \omega) = J \frac{d\omega}{dt} + \omega \frac{dJ}{dt} \xrightarrow{J-\text{konst}} M_d = J \frac{d\omega}{dt}$$

J moment setrvačnosti soustavy

ω úhlová rychlost soustavy

Typická pohybová rovnice motoru:

$$M_m = M_z + J \frac{d\omega}{dt}$$

Mechanický výkon na hřídeli motoru

$$P = M \cdot \omega$$

5.1.2 Mechanická soustava konající translační pohyb

$$\sum_{i=1}^n F_i + F_d = 0$$

F_i posuvné síly

F_d dynamické síly

$$M_d = \frac{d}{dt}(m \cdot v) = m \frac{dv}{dt} + v \frac{dm}{dt} \xrightarrow{m-\text{konst}} M_d = m \frac{dv}{dt}$$

m hmotnost soustavy

v rychlost soustavy

Typická pohybová rovnice motoru:

$$F = F_z + m \frac{dv}{dt}$$

Mechanický výkon na hřídeli motoru

$$P = F \cdot v$$

Moment přenášený na pravou stranu M_1 je tvořen momentem dodávaným motorem bez momentu který je potřeba mít pro roztáčení setrvačných hmot.

$$M_1 = M_m - J_{celk} \frac{d\omega}{dt}$$

Uhlová rychlost otáčení se přepočítá na posuvnou rychlost

$$\omega = \frac{2\pi \cdot v}{P}$$

Sila F_2 se rozloží na dynamickou silu a posuvnou silu, která bude změřena siloměrem a přenesena do zkoušeného objektu.

$$F_2 = F_z + m \frac{dv}{dt}$$

Účinnost takového přenosu je velmi vysoká a za předpokladu zanedbatelného prokluzu kuličkového šroubu uvažujeme $\eta = 1$.

Výsledná bilance

$$\begin{aligned} \left(M_m - J_{celk} \frac{d\omega}{dt} \right) \cdot \omega_1 &= \left(F_z + m_p \frac{dv_2}{dt} \right) \cdot v_2 \\ \left(M_m - J_{celk} \cdot \frac{2\pi}{P} \cdot \frac{dv_2}{dt} \right) \cdot \frac{2\pi \cdot v_2}{P} &= \left(F_z + m_p \frac{dv_2}{dt} \right) \cdot v_2 \\ \left(M_m - J_{celk} \cdot \frac{2\pi}{P} \cdot \frac{dv_2}{dt} \right) \cdot \frac{2\pi}{P} &= F_z + m_p \frac{dv_2}{dt} \end{aligned}$$

Znamé veličiny

Moment setrvačnosti $J = 0,00064 \text{ kg} \cdot \text{m}^2$

Stoupání závitu $P = 5 \text{ mm}$

Hmotnost pistu $m = 10 \text{ kg}$

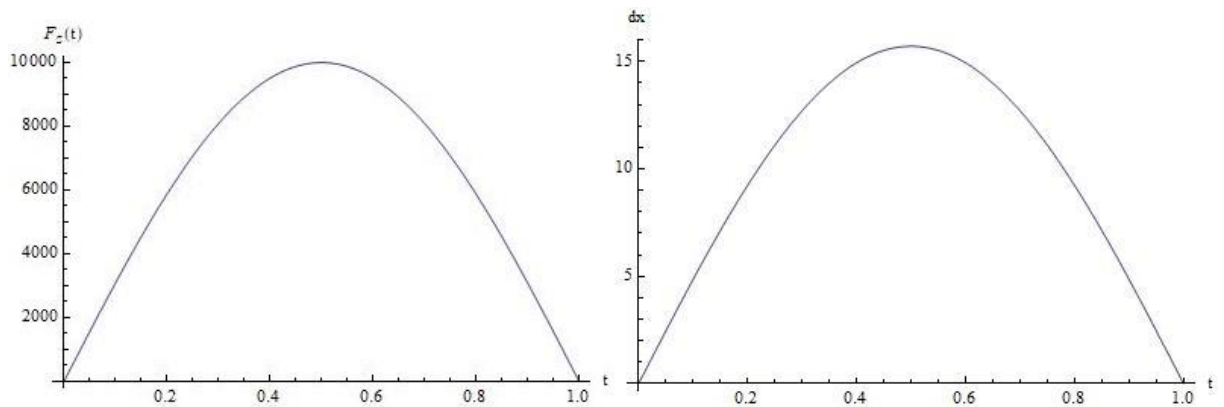
Frekvence $f = 10 \text{ Hz}$

Vyzkoušíme různé průběhy síly a zdvihu

Síla $F_z = 10000 \text{ N}$

Zdvih $x = 10 \text{ mm}$

Považujeme průběhy obou veličin za sinusové.



Obrázek 23. Sinusové průběhy síly a zdvihu. Zdroj: vlastní zpracování

Pro zdvih platí

$$x(t) = \int_0^{\pi} v(t) dt$$

$v(t)$ je ve tvaru $v(t) = a \cdot \sin(\pi \cdot f \cdot t)$, kde f je frekvence, potom

$$\int_0^{\pi} a \cdot \sin(\pi \cdot f \cdot t) = 10 \cdot 10^{-3}$$

$$a = 5 \pi \cdot f \cdot 10^{-3}$$

$$v(t) = 5 \pi \cdot f \cdot 10^{-3} \cdot \sin(\pi \cdot f \cdot t)$$

Průběh síly je dán

$$F_z(t) = F_z \cdot \sin(\pi \cdot f \cdot t) = 10000 \cdot \sin(\pi \cdot f \cdot t)$$

Dosazením zkušných průběhů do bilance

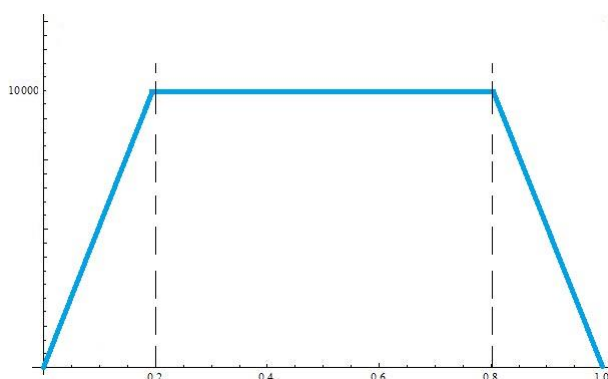
$$\left(M_m - J_{celk} \cdot \frac{2\pi}{P} \cdot \frac{dv_2}{dt} \right) \cdot \frac{2\pi}{P} = F_z + m_p \frac{dv_2}{dt}$$

Vypočítáme maximální potřebný moment pro různé frekvence. Testovací rozsah frekvence byl od 1 do 10 Hz s krokem 1 Hz. S rostoucí frekvencí je potřeba mít větší maximální moment. Rozsahu frekvence od 1 do 10 Hz odpovídá maximální potřebný moment v hodnotě od 7,95 do 8,85 Nm.

Pro frekvenci 10 Hz veličiny dosahují těchto hodnot

Maximální rychlost zdvihu	$v_{max} = 157 \text{ mm/s}$
Maximální otáčky	$n_{max} = 1885 \text{ ot/min}$
Maximální zrychlení	$\frac{d\omega}{dt} = 6201 \text{ rad/s}^2$
Maximální moment	$M_{max} = 8,85 \text{ Nm}$

Ted' vyzkoušíme případ, kdy **průběhy síly a zdvihu** budou **lichoběžníkové**.



Obrázek 24. Lichoběžníkové průběhy síly/zdvihu
Zdroj: vlastní zpracování

Lichoběžníky obou veličin jsem si zvolil následující: 0,2T – náběh, dále 0,6T – konst., 0,2T – sestup. Tim pádem směrnice je závislá na frekvenci.

Dále analogickým způsobem dosazujeme do bilanční rovnice a počítáme.

Pro frekvenci 10 Hz veličiny dosahují těchto hodnot

Maximální rychlost zdvihu $v_{max} = 125 \text{ mm/s}$

Maximální otáčky $n_{max} = 1500 \text{ ot/min}$

Maximální zrychlení $\frac{d\omega}{dt} = 7854 \text{ rad/s}^2$

Maximální moment $M_{max} = 7,95 \text{ Nm}$

Porovnání dle typu křivky síly a zdvihu

Na mechanické soustavě jsem teoretický vyzkoušel dva druhy křivek: sinus a lichoběžník. Jak je vidět z tabulky níže, maximální zrychlení u lichoběžníkového průběhu je vyšší než u sinusového. Navíc u sinusu toto zrychlení hladce klesá až na nulu, když u lichoběžníku je to stále konstantní, než rychlost nabyde maxima. Tato skutečnost může negativně ovlivnit soustavu, zejména její mechanickou část. Je potřeba provést ještě hlubší analýzu a testování. Ostatní hodnoty u lichoběžníku jsou nižší.

		sinus	lichoběžník
Maximální rychlost zdvihu	$v_{max} \text{ [mm/s]}$	157	125
Maximální otáčky	$n_{max} \text{ [ot/min]}$	1885	1500
Maximální zrychlení	$d\omega/dt \text{ [rad/s}^2\text{]}$	6201	7854
Maximální moment	$M_{max} \text{ [Nm]}$	8,85	7,95

Tabulka 5. Porovnání dle typu křivky síly a zdvihu

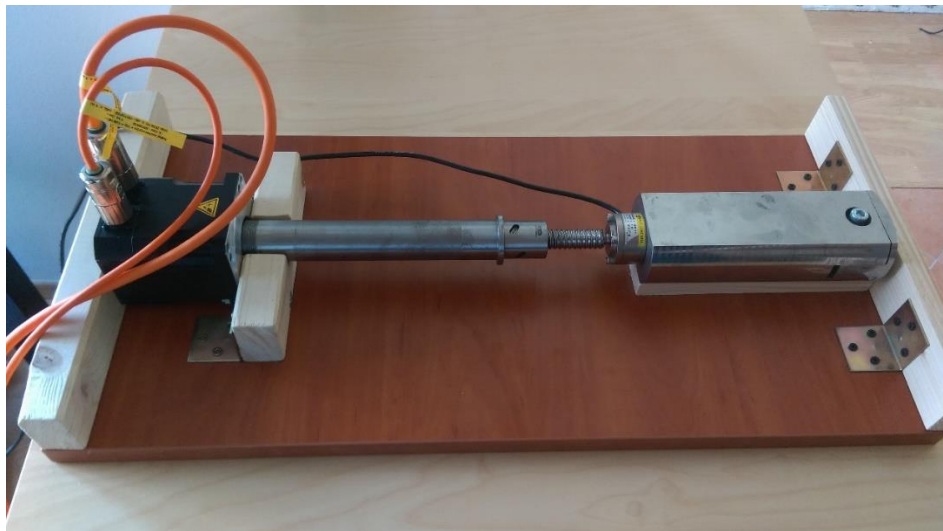
6 Realizace

Pro vyzkoušení soustavy jako takové, bylo potřeba ji nejprve sestavit. Hardware se skládá ze dvou částí: z elektrické a mechanické. Hraničním bodem je motor. Hlavními prvky elektrické části jsou střídač a řídicí jednotka. V mechanické části to jsou motor, kuličkový šroub a siloměr. Softwarovými záležitostmi byly: nastavení samotného střídače a vytvoření programu pro řídicí jednotku.

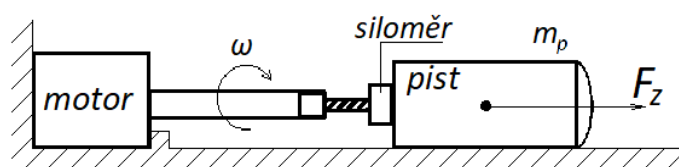
6.1 HW

6.1.1 Mechanická část

Mechanická část představuje motor s nasazenou spojkou, která spojuje rotor motoru s maticí kuličkového šroubu. Samotný kuličkový šroub je přišroubován k siloměru, a siloměr následně k pistu. Pak tam ještě axiální ložiska na spojce mezi motorem a maticí a kryt který drží všechno pohromadě. Původně se plánovalo, že mechanická část bude zajištěna strojaři. Ale očekávání nebyli splněny, je potřeba provést úpravy, které potřebují více času. Proto byla sestavena menší testovací pracoviště pro testování základních funkcí programu a statické testování síly.



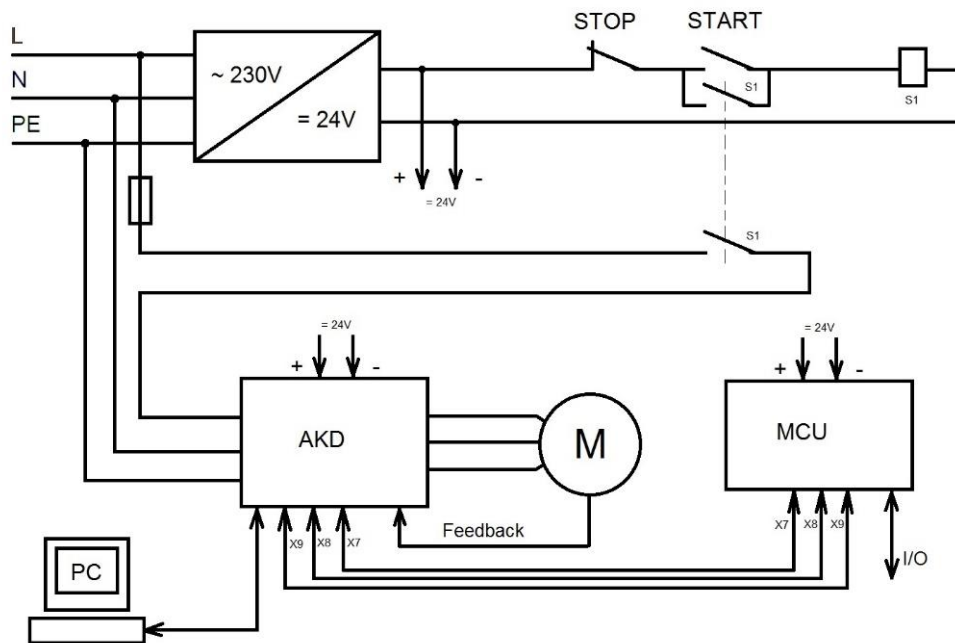
Obrázek 25. Foto mechanické části testovacího pracoviště
Zdroj: vlastní zpracování



Obrázek 26. Nákres mechanické soustavy
Zdroj: vlastní zpracování

6.1.2 Elektrická část

Veškeré hlavní prvky elektroniky jsem měl k dispozici, bylo potřeba jen pořídit malé drobnosti. Zapojení bylo provedeno dle následujícího schématu.



Obrázek 27. Schéma zapojení elektrické části testovacího pracoviště
Zdroj: vlastní zpracování

Celá soustava se napájí síťovým 1 fázovým napětím ~ 230 V/50 Hz. Měníč na stejnosměrné napětí ≈ 24 V poskytuje napájení pro vnitřní logiku střídače AKD a řídicí jednotku se soft procesorem. Silové napájení pro AKD je zapojeno přes jistič a tlačítka START, STOP. Střídač a řídicí jednotka komunikují přes rozhraní pojmenované X7 až X9. Do řídicí jednotky je na analogový vstup také připojen siloměr. Připojení počítače k AKD je nutné jen pro prvotní nastavení nebo případné testování a servis.

Veškerá elektronika vešla do pořízené pro tyto účely počítačové skříně, viz obrázek 28. Relé, jistič a svorkovnice jsou umístěny na montážním lištu.

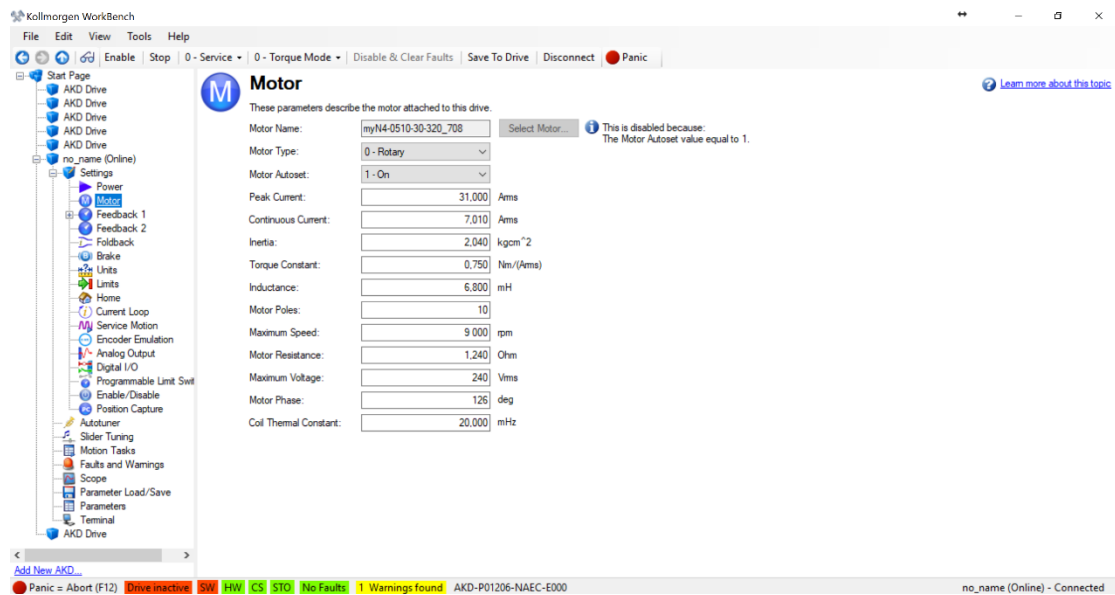


*Obrázek 28. Foto elektrické části testovacího pracoviště
Zdroj: vlastní zpracování*

6.2 SW

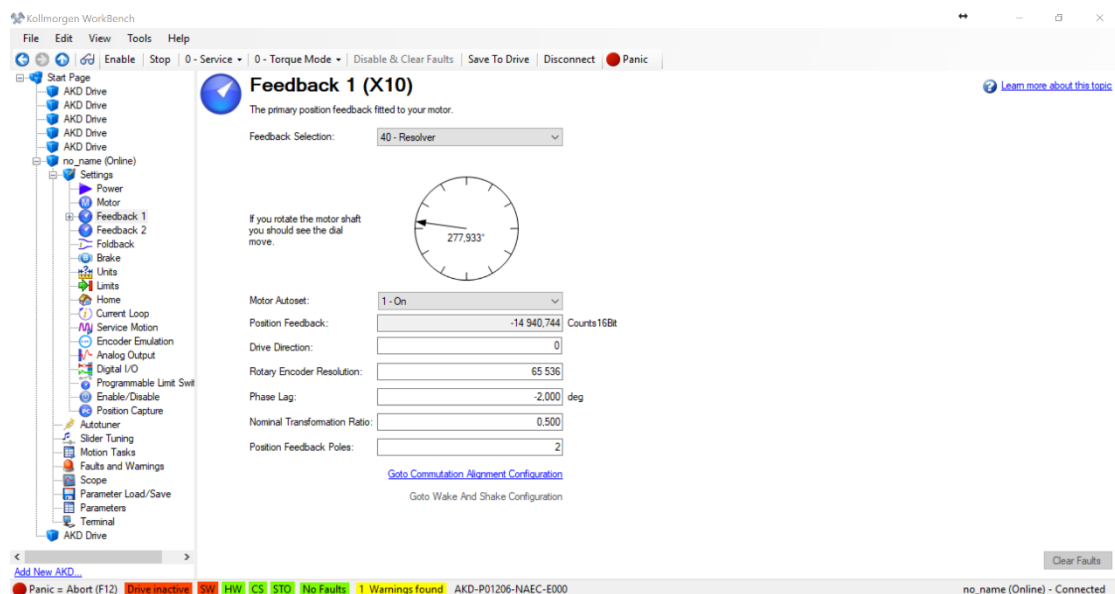
6.2.1 Nastavení AKD

Při řešení problematiky softwaru nejprve bylo potřeba oživit střídač. Po připojení ke střídači pomocí Ethernet kabelu je nutné zavést konfiguraci a veškeré parametry motoru, který bude střídačem řízen. Díky návaznosti firem výrobců motoru a střídače, stačilo stáhnout knihovnu řady motorů TGN, naimportovat do AKD a pak zvolit příslušný typ motoru.



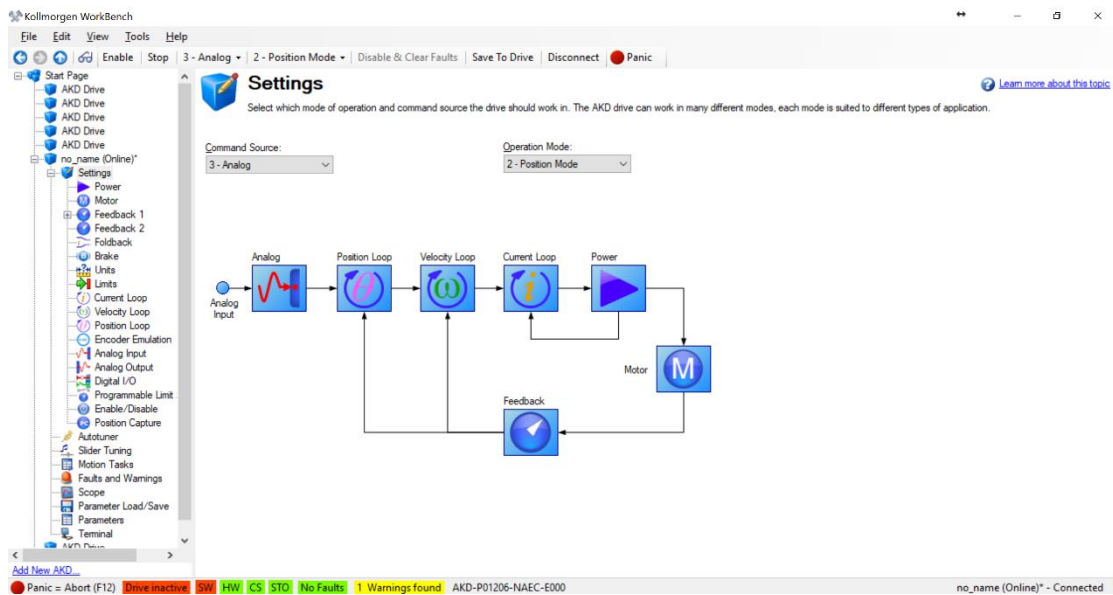
Obrázek 29. Záložka Motor v programu Kollmorgen WorkBench

Ve záložce Feedback je potřeba uvést jaký typ snímače polohy má motor. Motor TGN4-0510 je vybaven resolverem.



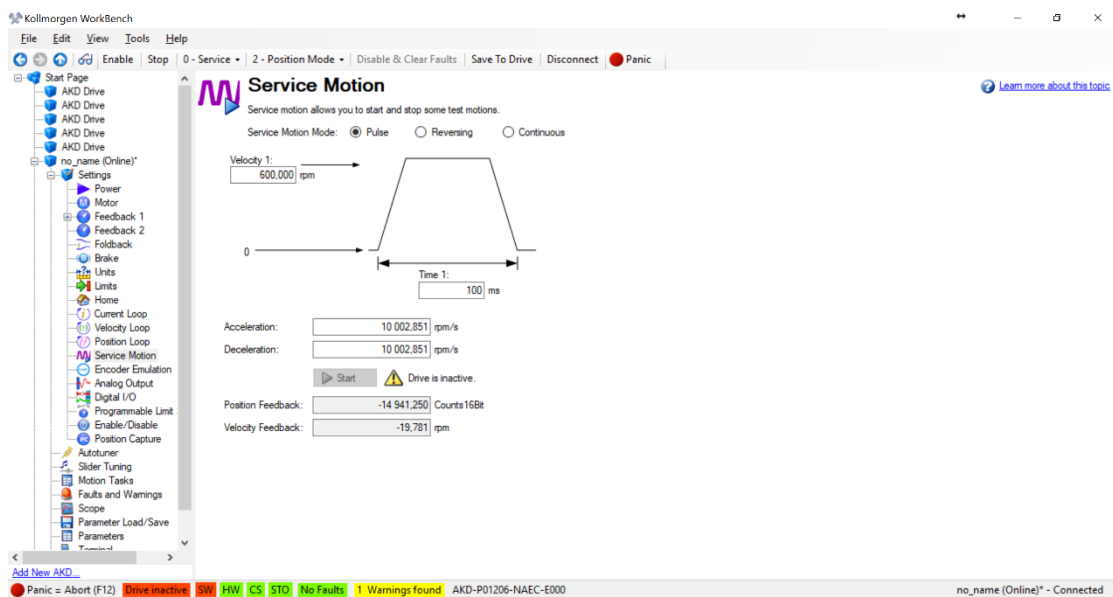
Obrázek 30. Záložka Feedback 1 v programu Kollmorgen WorkBench

Ve záložce Settings lze nastavit zdroje vstupního signálu pro regulační smyčku. V provozu to bude analogový vstup, na který bude posílána žádaná hodnota z řídicí jednotky. Také na této záložce lze vybrat, které regulační smyčky zabudované do AKD chceme používat. To jsou buď samotná proudová, proudová plus rychlostní nebo proudová, rychlostní a polohová. Při zapnutí každé smyčky objeví se příslušná záložka, kde lze nastavovat koeficienty regulátoru.



Obrázek 31. Záložka Settings v programu Kollmorgen WorkBench

V servisním modu lze testovat motor ve třech režimech. To jsou puls, revers nebo kontinuální režim. Vše je intuitivní díky grafickému interfejsu.



Obrázek 32. Záložka Servis v programu Kollmorgen WorkBench

6.2.2 Program

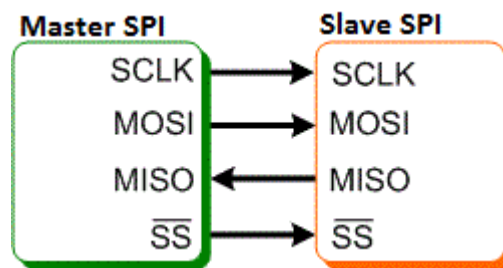
Před napsáním samotného řídicího programu, bylo potřeba nakonfigurovat FPGA se soft procesorem. Základní konfigurace již byla provedena panem Zoubkem, po výrobě desky plošného spoje. Mým úkolem bylo připojit potřebné periferie k FPGA. Struktura FPGA se kreslila v programu OrCad.

Prvním na řadě byl analogově digitální (A/D) převodník, pro zpracování analogového signálu ze siloměru. A/D převodník osazený na této desce je MCP3204

od firmy Microchip. To je čtyř kanálový 12 bitový AD převodník s SPI sériovým interfejsem. Napájení je 3.3 V, maximální frekvence hodin při tomto napájecím napětí musí být maximálně 1 MHz.

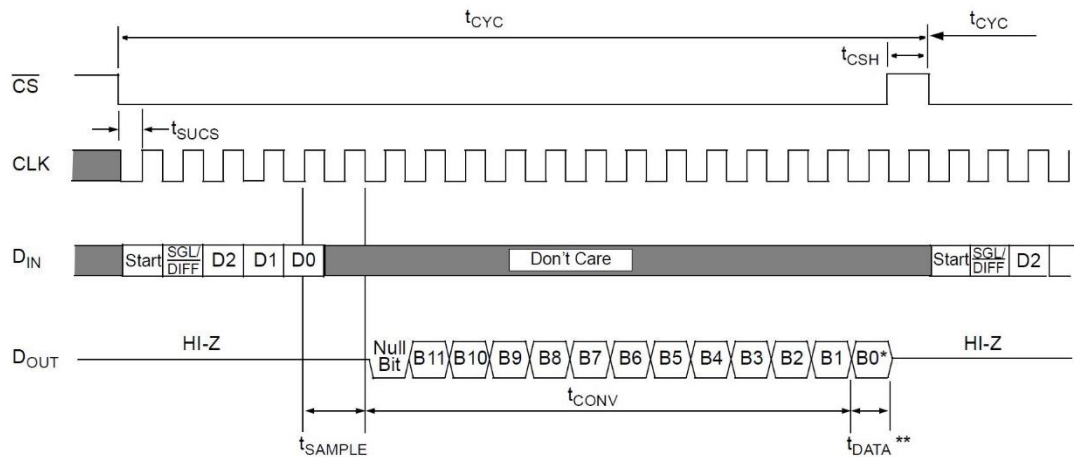
Krátce o SPI

SPI – zkratka Serial Peripheral Interface, tj. sériové periferní rozhraní, používá se pro rychlou komunikaci na kratší vzdálenosti, typicky v rámci plošného spoje. Příkladem použití je komunikace mezi procesorem a externími paměťovými moduly nebo A/D převodníkem. Zařízení na SPI sběrnici jsou řídicí (Master) a podřízené (Slave). Master řídí komunikace podle hodinového signálu a určuje, s jakým zařízením bude komunikovat (při logické nule pinu SS nebo CS). Slave vysílá data podle hodinového signálu, pokud je aktivován. [4]



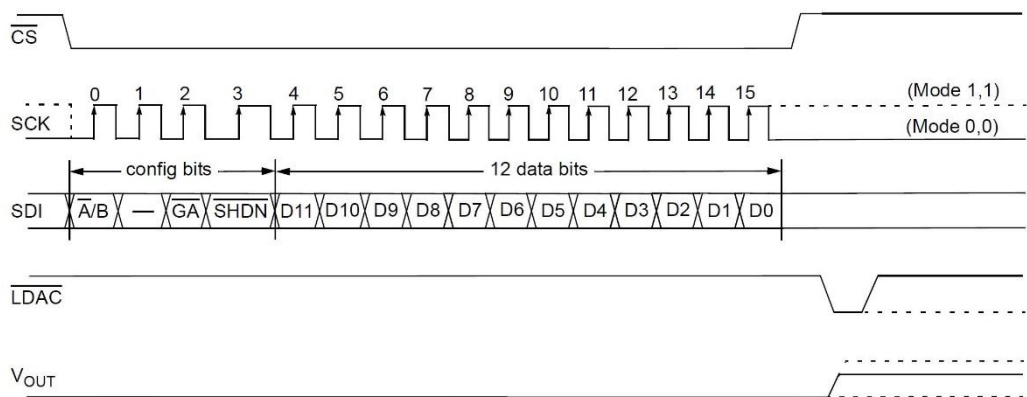
Obrázek 33. Jednoduché zapojení Master – Slave
SCLK – „Serial Clock“, hodinový signál
MOSI – „Master Out, Slave In“, výstup z Masteru
MISO – „Master In, Slave Out“, výstup ze Slave
SS – „Slave Select“, volba podřízeného
Zdroj: [4]

Průběh komunikace s A/D převodníkem je znázorněn na obrázku 34. Jak plyne z protokolu SPI, nejprve je potřeba nastavit logickou nulu na pinu CS. Dále linkou DIN posíláme data obsahující číslo kanálu, ze kterého chceme číst, a za odpověď dostáváme 12 bit dat na lince DOUT.



Obrázek 34. Průběh komunikace s A/D převodníkem
Zdroj: [14]

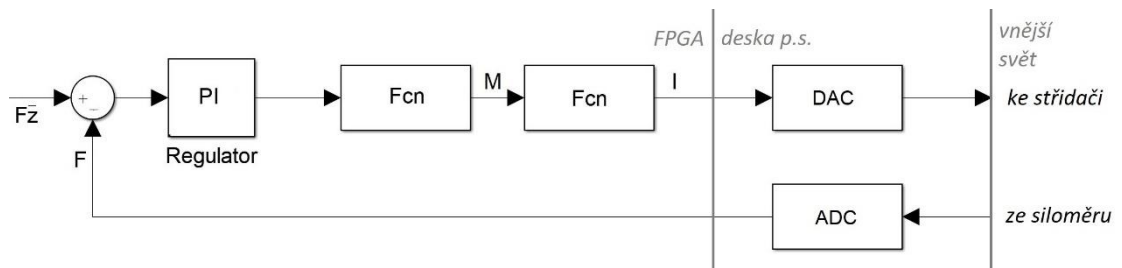
Další periférií potřebné pro naši úlohu je digitálně analogový (D/A) převodník, sloužící pro posílání analogového signálu do AKD. D/A převodník MCP4822 od firmy Microchipje 2 kanálový 12 bitový AD převodník s SPI sériovým interfejsem. Maximální frekvence hodin je 20 MHz.



Obrázek 35. Průběh komunikace s D/A převodníkem
Zdroj: [15]

Začátek komunikace je podobný jako u A/D převodníku, pin CS do logické nuly, pak na SDI linku posílají 4 konfigurační bity, a následně 12 bitů s daty. Na konci je potřeba pin CS vrátit do logické 1 a pin LDAC krátkodobě nastavit do logické nuly.

Blokové schéma řídicího programu je na obrázku 36.



Obrázek 36. Blokové schéma řídicího programu
Zdroj: vlastní zpracování

Žádaná hodnota a naměřená hodnota síly vzájemně se odečtou, a tím vznikne regulační odchylka. Regulační odchylka pokračuje do regulátoru. Dále jsou funkční bloky, které přepočítávají sílu na moment, a moment na proud, který je vstupní veličinou regulační proudové smyčky střídače. Síla naměřená siloměrem vstupuje jako naměřená hodnota do regulátoru. Tento program je v nekonečné smyčce v hlavním programu *main()*.

Závěr

Cílem této diplomové práce bylo navrhnout elektromechanickou testovací konstrukci poháněnou BLDC servomotorem, která slouží k testování autosedaček a následně posoudit, zda všechny elementy soustavy odpovídají teoretickým požadavkům, popřípadě jaká mají omezení.

V první části této práce jsem popsal obecnou teorii BLDC motorů z pohledu jejich mechanické konstrukce a principu činnosti. Odvodil jsem matematický model BLDC motoru z náhradního schématu. Pro provedení komutace a dosažení maximálního točivého momentu je vyžadovaná znalost polohy rotoru. Tuto informaci zajišťují sensory polohy, jako jsou Hallové senzory, enkodéry nebo resolvery, ale je také možné použít bezsenzorovou metodu snímání polohy rotoru. Pro provádění samotné komutaci je potřeba mít střídač, sepnutí tranzistorů je prováděno řídicím procesorem. Dále se tato kapitola věnuje nejpoužívanějšímu řídicímu algoritmu třífázového střídače – six-step komutaci.

Ve čtvrté kapitole je uveden popis jednotlivých částí elektromechanické testovací konstrukce, jejich funkce a základní parametry. Zároveň jsem provedl výpočty kuličkového šroubu a matice, kde jsem určil kritické otáčky, maximální provozní otáčky, kritické a provozní vzpěrné zatížení kuličkového šroubu a maximální provozní rychlost matice z maximálních provozních otáček kuličkového šroubu. Kuličkový šroub dle vypočítaných hodnot zcela vyhovuje pro testovací konstrukce. Je nutné testovat vzpěrné zatížení dynamický, a zkontrolovat, zda síly nepřesahují hranice i při tomto testování.

V páté kapitole byly podrobně probrány translační a rotační pohyby. Odvodil jsem rovnici přenosu energie při transformaci mezi těmito pohyby. Je potřeba zmínit, že na dynamiku mají největší vliv momenty setrvačnosti rotujících hmot, a hmotnost posouvaných hmot. V současném stavu téměř 2/3 celkového momentu setrvačnosti tvoří spojka mezi rotorem a kuličkovým šroubem. Pro lepší dynamiku je potřeba hmotnost spojky zmenšit. Pist, který váží skoro 10 kg nepřináší klady k dynamice. Většina vstupních hodnot pro výpočet mechanické soustavy je dána parametry prvků, ze kterých se skládá. Neznámými jsou síla a zdvih, kterým bychom chtěli testovat objekt. Dále byly provedeny výpočty pro sinusové a lichoběžníkové průběhy. Důvodem je jednoduchost: sinus – v teoretických výpočtech, lichoběžník – v praktické realizaci. Další varianty průběhů vyžadují delší analýzu a následné testování.

Poslední kapitola je věnovaná realizaci testovacího pracoviště. Po sestavení hardwaru testovací konstrukce, bylo potřeba naladit software. Provedl jsem konfiguraci FPGA se soft procesorem a připojení periferie k němu. Pak jednoduchým programem bylo provedeno statické testování. Další testování bude možné provést, až bude připraveno velké testovací pracoviště, na které původně byl zamýšlen.

Seznam použité literatury

- [1] MICROCHIP. *Brushless DC Motor Control Made Easy*. 2011. Dostupné z: <http://ww1.microchip.com/downloads/en/AppNotes/00857a.pdf>
- [2] MICROCHIP. *Brushless DC (BLDC) Motor Fundamentals*. 2003. Dostupné z: <http://ww1.microchip.com/downloads/en/AppNotes/00885a.pdf>
- [3] OZTURK, Salih Baris. *Modeling, Simulation and Analysis of Low-cost Direct Torque Control of PMSM Using Hall-effect Sensors*. 2005. Dostupné z: <http://www.kves.utc.sk/kvesnew/dokumenty/%C5%A1ep/DTC-Ozturk.pdf>
- [4] STIKEYEV, K. *Rozhraní otáčkového čidla*. Bakalářská práce. Praha: České vysoké učení technické v Praze, Fakulta elektrotechnická, 2015.
- [5] Zbynek Jehlar, *Vliv externích elektromagnetických poli na funkci snímačů otáček*, diplomová práce, Brno, 2009 [online]. Dostupné z: https://www.vutbr.cz/www_base/zav_prace_soubor_verejne.php?file_id=14936
- [6] Firemní materiály TG Drives: *Servomotory řady TGN*. Dostupné z: <http://www.tgdrives.cz>
- [7] Firemní materiály Kollmorgen: *AKD Servo Drive Installation Manual*; Kollmorgen, 2016 Dostupné z: <http://www.kollmorgen.com>
- [8] HAMMER, J. *Elektromechanická alternativa hydraulické lineární tahové jednotky*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2008. 86 s. Vedoucí diplomové práce Ing. Jaroslav Kašpárek.
- [9] *Linear Motion Technology Handbook*. R310EN 2017 (2006.07): Bosch Rexroth AG. Printed in Germany, 2007
- [10] Firemní materiály GTEN *Ball Screw Technology*. Dostupné z: <http://www.gtenballscrew.com.tw>
- [11] Firemní materiály DACELL. Dostupné z: <http://www.dacell.com/>
- [12] Balátě, J.: *Automatické řízení*; BEN, Praha 2004
- [13] Firemní materiály Xilinx: *MicroBlaze Processor Reference Guide*, UG081; Xilinx, 2012
- [14] MICROCHIP. *2.7V 4-Channel/8-Channel 12-Bit A/D Converters with SPI*. 2002. Dostupné z: <http://ww1.microchip.com/downloads/en/DeviceDoc/21298c.pdf>
- [15] MICROCHIP. *12-Bit DAC with Internal Vref and SPI Interface*. 2005. Dostupné z: <http://ww1.microchip.com/downloads/en/DeviceDoc/21953a.pdf>

Seznam obrázků

Obrázek 1. Zjednodušená konstrukce BLDC motoru.....	9
Obrázek 2. Náhradní schéma BLDC motoru	10
Obrázek 3. Zjednodušené náhradní schéma BLDC motoru.....	12
Obrázek 4. Signály z Hallových senzorů a průběhy zpětného EMF.....	14
Obrázek 5. Výstupní signály inkrementálního čidla.....	15
Obrázek 6. Resolver a řídicí průběhy sinusových signálů.	16
Obrázek 7. Jednotlivé přesnosti resolveru.	17
Obrázek 8. Schéma třífázového střídače se zátěží	19
Obrázek 9. Vektor magnetického pole statoru	20
Obrázek 10. Servomotory řady TGN4-0510.....	21
Obrázek 11. Digitální servozsilovač AKD řady P01206	22
Obrázek 12. Řídicí jednotka se soft procesorem.....	23
Obrázek 13. Blokové schéma řídicí jednotky se soft procesorem	24
Obrázek 14. Integrovaná recirkulace	24
Obrázek 15. Kuličkový šroub a matice.	25
Obrázek 16. Nebezpečný rozkmit kuličkového šroubu vlivem kritických otáček..	25
Obrázek 17. Nebezpečné axiální vzpěrné zatížení kuličkového šroubu.	26
Obrázek 18. Siloměr UM-T1.	28
Obrázek 19. Nákres spojky motoru a maticí.....	29
Obrázek 20. Dutý válec.....	29
Obrázek 21. Nákres matice od kuličkového šroubu.....	29
Obrázek 22. Nákres mechanické soustavy.....	31
Obrázek 23. Sinusové průběhy síly a zdvihu.	33
Obrázek 24. Lichoběžníkové průběhy síly/zdvihu	34
Obrázek 25. Foto mechanické části testovacího pracoviště.....	35
Obrázek 26. Nákres mechanické soustavy.....	35
Obrázek 27. Schéma zapojení elektrické části testovacího pracoviště	36
Obrázek 28. Foto elektrické části testovacího pracoviště	37
Obrázek 29. Záložka Motor v programu Kollmorgen WorkBench	38
Obrázek 30. Záložka Feedback 1 v programu Kollmorgen WorkBench.....	38
Obrázek 31. Záložka Settings v programu Kollmorgen WorkBench	39
Obrázek 32. Záložka Servis v programu Kollmorgen WorkBench	39

Obrázek 33. Jednoduché zapojení Master – Slave.....	40
Obrázek 34. Průběh komunikace s A/D převodníkem.....	41
Obrázek 35. Průběh komunikace s D/A převodníkem.....	41
Obrázek 36. Blokové schéma řídicího programu.....	42

Seznam příloh

Příloha č. 1: Technické parametry motoru TGN4-510-30-320

Příloha č. 2: Technická data servozesilovačů AKD-P01206 s napájením 230 V

Příloha č. 3: Technické parametry kuličkového šroubu

Příloha č. 4: Technické parametry siloměru UM-T1

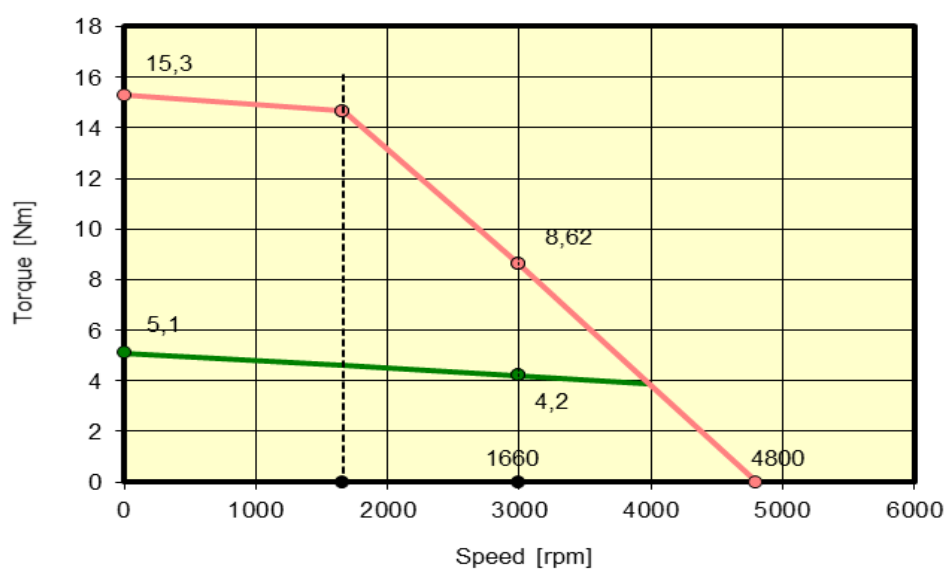
Příloha č. 5: Osazovací plán horní (top) a spodní (bottom) strany desky plošného spoje

Příloha č. 1: Technické parametry motoru TGN4-510-30-320

			320 VDC
Magnety Nd-Fe-B			TGN4-510
Klidový moment	M_0	Nm	5,1
Klidový proud	I_0	A	6,78
Jmenovitý moment	M_N	Nm	4,2
Jmenovité otáčky	n_N	min.^{-1}	3000
Jmenovitý výkon	P_N	W	1319
Jmenovitý proud	I_N	A	7,01
Maximální moment	M_{max}	Nm	15,3
Maximální proud	I_{max}	A	31
Max. otáčky mech.	n_{max}	min.^{-1}	9000
Momentová konstanta	K_M	Nm/A	0,75
Napěťová konstanta	K_E	V/1000 min.^{-1}	45,5
Počet pólů motoru	$2p$	–	10
Odpor dvě fáze	$R_{2\text{Ph}}$	Ω	1,24
Indukčnost dvě fáze	$L_{2\text{Ph}}$	mH	6,8
Vlastní moment setrvačnosti	J	kgcm^2	2,04
Hmotnost bez brzdy	m	kg	3,8
Hmotnost s brzdou	m_{Br}	kg	4,6
Brzd. moment brzdy	M_{Br}	Nm	9

Momentová charakteristika

Torque/speed curves



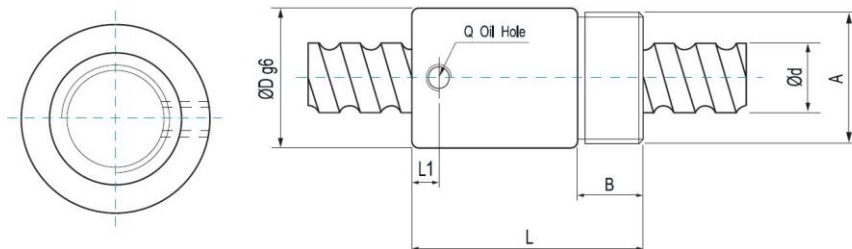
Příloha č. 2: Technická data servozesilovačů AKD-P01206 s napájením 230 V

Parametry	Jednotka	AKD-P01206
Jmenovité napětí	V~	3x108-264 V / 50-60 Hz 1x108-264 V / 50-60 Hz
Jmenovitý zdánlivý výkon (provoz S1)	kVA	3.82
Jmenovitý proud (±3 %)		
– při jmenovitém napětí 120 V	Aef	12
– při jmenovitém napětí 240 V	Aef	12
Maximální proud (max. 5s, ±3 %)	Aef	30
Trvalý brzdný výkon interního odporu (RBint)	W	100
Brzdná energie kondenzátorů meziobvodu	Ws	160 při 120 V 55 při 240 V
Trvalý brzdný výkon ext. odporu	kW	3
Maximální externí brzdný výkon	kW	5.4
Rozměry		
- výška	mm	195
- šířka	mm	76
- hloubka	mm	186
- hloubka s konektory a kabely	mm	215

Пříloha č. 3: Technické parametry kuličkového šroubu

GTEN BALL SCREW TECHNOLOGY CO., LTD.

7.11 Type: RSU



單位 : mm

型號	規格											
	d	l	Da	D	A	B	L	Q	L1	n	Ca(Kgf)	Coa(kgf)
▲ 1604-3	16	4	2.381	29	M22X1.5P	8	32	-	-	T3	737	940
1605-4	16	5	3.175	32	M30X1.5P	16	56	M6	6.5	T4	1344	1525
2005-4	20	5	3.175	38	M35X1.5P	16.5	59.5	M6	7	T4	1512	1995
2505-4	25	5	3.175	42	M40X1.5P	17	60	M6	7	T4	1704	2581
2510-4	25	10	4.762	42	M40X1.5P	17	90	M6	10	T4	2881	3695
3205-4	32	5	3.175	52	M48X1.5P	19	60	M6	7	T4	1924	3403
3210-4	32	10	6.35	52	M48X1.5P	19	93	M6	12	T4	4834	7835
4005-4	40	5	3.175	58	M56X1.5P	19	59	M8	6	T4	2142	4342
4010-4	40	10	6.35	65	M60X1.5P	27	102	M8	12	T4	5399	10074
5010-4	50	10	6.35	78	M72X1.5P	29	104	M8	12	T4	5933	12313

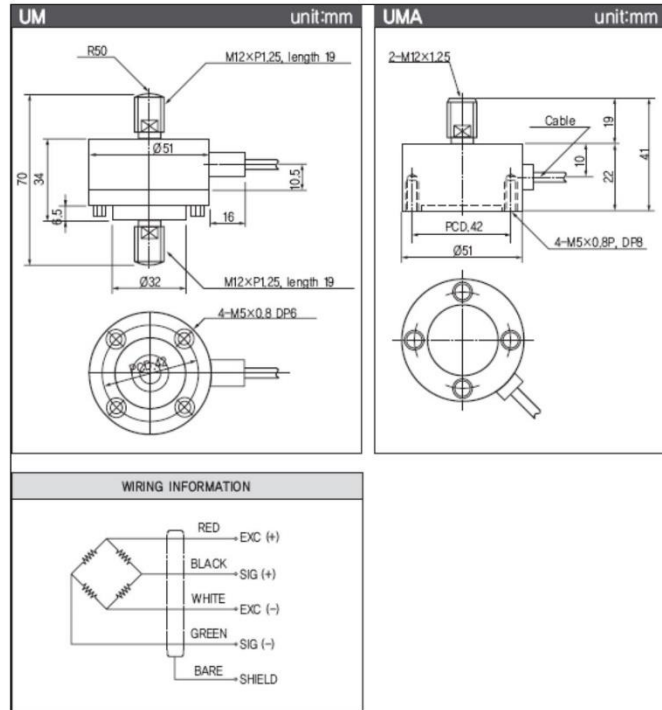
▲ 無刮刷器

Příloha č. 4: Technické parametry siloměru UM-T1

UM, UMA

Compression or Tension load cell.

These load cells are extremely small and lightweight.

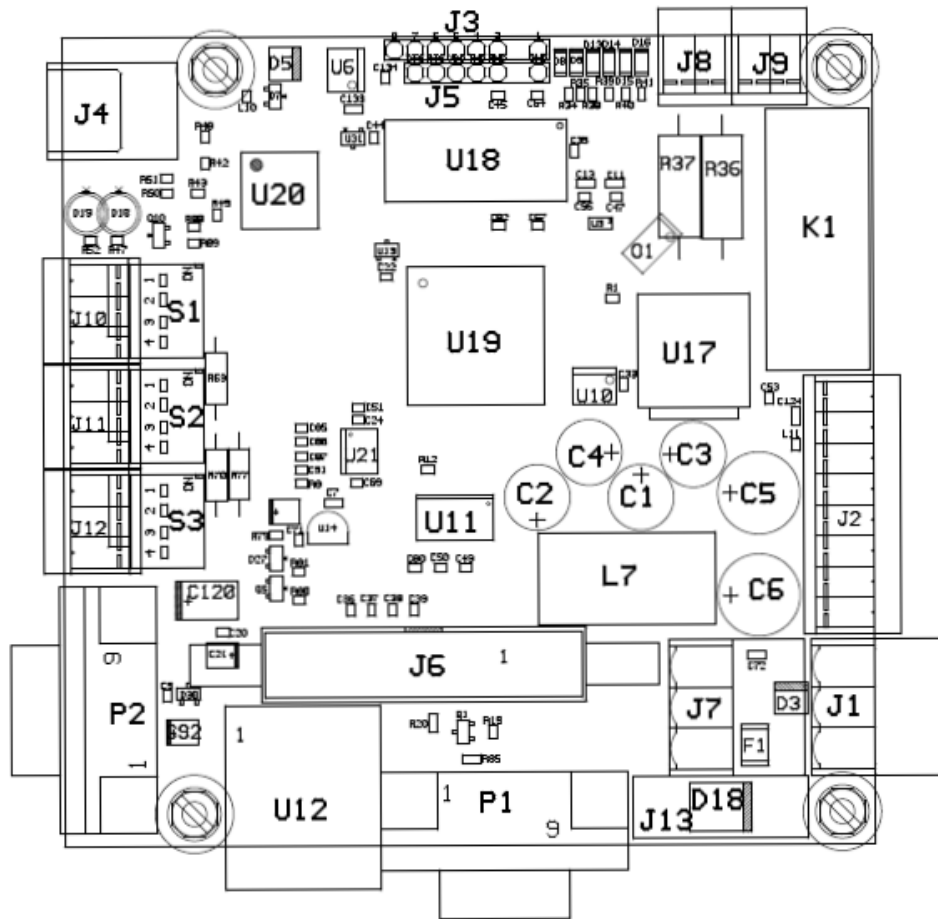


SPECIFICATIONS

Specifications	Accuracy
	UM
Rated capacity(R.C.)	50kgf, 100kgf, 200kgf, 500kgf, 1tf, 2tf (490.3N, 980.7N, 1.961kN, 4.903kN, 9.807kN, 19.61kN)
Rated output(R.O.)	2mV/V±0.4%
Nonlinearity	0.15% of R.O.
Hysteresis	0.1% of R.O.
Repeatability	0.05% of R.O.
Zero balance	±2% of R.O.
Temperature effect, on rated output	0.1% of LOAD/10°C
Temperature effect, on zero balance	0.05% of R.O./10°C
Temperature range, compensated	-10~70 C
Temperature range, safe	-10~80°C
Terminal resistance input	350 ±50Ω
Terminal resistance output	350 ±2Ω
Insulation resistance bridge/case	2000MΩ
Excitation recommended	10V
Safe overload	150% R.C
Cable length	Φ5mm 4core, 3m

Příloha č. 5: Osazovací plán horní (top) a spodní (bottom) strany desky plošného spoje

DRB-1, Top



DRB-1, Bottom

